

В.П. Малайчук, С.В. Клименко, А.Т. Кудреватых
**ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
НЕДОСТУПНЫХ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

Аннотация. Предложен визуально-аналитический метод исследования матриц измерений цифровых изображений объектов, недоступных для визуального наблюдения, с неизвестными статистическими закономерностями и отсутствием эталонов, путем сканирования и сжатия матриц скачкообразно-подвижным окном или и последующей сравнительной обработкой гистограмм строк и столбцов, и выделения текстур по критерию хи-квадрат.

Ключевые слова: цифровое изображение, флуктуация, визуально-аналитический анализ.

Постановка задачи

Информация о состоянии технических объектов, поверхности которых недоступны для визуального наблюдения, содержится в тех или иных видах пространственных изменений яркости (структурах) их цифровых изображений. Цифровые изображения описываются матрицами измерений яркости с неизвестными статистическими закономерностями [1]. Они могут быть разделены на два класса: 1) это низкочастотные (медленные) пространственные изменения яркости; 2) быстрые (высокочастотные) изменения яркости на поверхностях контролируемых объектов (флуктуации). Их информативность исследуется путем статистической обработки матриц взаимно автокоррелированных не стационарных выборок случайных величин с целочисленными значениями от нуля до 255 $X(i, j)$, где i и j - координаты точки, в которой измеряется яркость изображения. Цель обработки – выделить участки изменения яркости (текстуры) и оценить их параметры (координаты, размеры, форма, интенсивность, коррелированность) в условиях отсутствия эталонных (обучающих) образцов поверхностей технических объектов.

Исследование начинается с проверки гипотезы об однородности распределения яркости цифрового изображения и если гипотеза подтверждается, то на этом обработка прекращается. В противном случае продолжается исследование цифрового изображения путем обработки матрицы низкочастотных и высокочастотных измерений.

Первичная обработка измерений цифрового изображений

Рассматривается матрица измерений с авто и взаимно коррелированными целочисленными величинами от нуля до 255 единиц яркости. Законы распределения вероятностей их неизвестны, но могут быть построены для визуального рассмотрения их гистограммы и оценены статистические параметры (начальные и центральные моменты, коэффициенты корреляции и корреляционные функции).

В исследовании цифровых изображений получателем информации является, как правило, оператор, так что метод их обработки называется визуально-аналитическим. Слабый контраст цифрового изображения создает трудности для визуального наблюдения, обусловленные большим ограничением диапазона яркости $\Delta X = X_{\max} - X_{\min}$, хотя в цифровом представлении могут запоминаться измерения от 0 до 255 значений яркости. Диапазон яркости можно измерить путем линейного контрастирования цифрового изображения [2]. Это линейное преобразование матрицы измерений яркости $X(i, j)$ в матрицу $X^*(i, j)$ с диапазона $X_{\max} - X_{\min}$ в диапазон $X^*_{\max} - X^*_{\min}$.

$$X^*(i, j) = \frac{X(i, j) - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} (X^*_{\max} - X^*_{\min}) + X^*_{\min},$$

при этом сохраняется вид закона распределения измерений яркости $X(i, j)$.

Если в изображении большое число участков имеет невысокую яркость, то для выравнивания яркости можно изменить ее гистограмму, то есть закон распределения вероятности путем следующего нелинейного преобразования. Сначала вычислить эмпирическую функцию распределения вероятности $F^*(q)$

$$F^*(q) = \frac{1}{N_1 \cdot N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} \text{sgn}[q - X(i, j)], \quad q = 0, 1, 2, \dots, 255$$

и сформировать матрицу яркости $X^*(i, j)$ по формуле

$$X^*(i, j) = (X^*_{\max} - X^*_{\min}) F^*(X(i, j)) + X^*_{\min}.$$

Оценка интегральных параметров цифрового изображения

Визуально-аналитический анализ интегральных параметров цифровых изображений позволяет провести гипотезу об однородности изображения (отсутствия структур). Определим среднее интегральное значение измерений яркости, выборочную дисперсию $\overline{X}, \overline{D}^*$ и эмпирический закон распределения вероятностей яркости цифровую гистограмму

$$\Gamma(q(k)) = W^*(q(k)) = F^*(q(k)) - F^*(q(k) - 1), \quad q(k) = 0, 1, 2, \dots, 255.$$

Эти интегральные показатели характеризуют усредненное значение яркости изображения, разброс яркостей $\sqrt{\overline{D}^*}$ и ее вероятностное распределение. Ожидается равенство оценок, если изображение однородное

$$\overline{X} \approx \overline{q^*} \approx \sum_{k=0}^{255} q(k)W(q(k)) \approx q_{\max}^*$$

где q_{\max}^* – значение яркости, вероятность которого максимальна $W(q_{\max}^*) = W_{\max}$.

Если один яркостный показатель цифрового изображения – это коррелированность измерений яркости. Показатель коррелированности характеризует статические связи измерения $X(i, j)$ с его ближайшими соседними измерениями $X(i + m_1, j + m_2)$, где $m_1, m_2 = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm d$. Рассмотрим скачкообразное квадратное окно размером n_0 , координаты центра которого i_0, j_0 изменяются скачком на расстояние n_0 . Тогда $i_0(k) = i_0(k - 1) + n_0$, $j_0(k) = j_0(k - 1) + n_0$, $i_0(1) = j_0(1) = 0, 5(n_0 + 1)$, $d = 0, 5(n_0 + 1)$, $k = 1, 2, 3, \dots, N - d$, N – размер матрицы $X(i, j)$.

Ковариация $R(i_0, j_0)$ подвижного окна с координатами $i = i_0, j = j_0$ вычисляется по формуле

$$\overline{R}^*(i_0, j_0) = \frac{1}{n_0^2 - 1} \sum_{m_1=-d}^d \sum_{m_2=-d}^d X(i_0, j_0)X(i_0 + m_1, j_0 + m_2).$$

Используя ее 4 оценки средних значений измерений подвижного окна по строкам и столбцам в каждой точке $i_0(k)$ и $j_0(k)$,

выборочные дисперсии, средние значения их квадратов, оценим коррелированности строк и столбцов и матрицы по строкам и столбцам.

Вторичная обработка измерений цифрового изображений

Измерения $X(i, j)$ в пределах подвижного окна – это случайные величины, содержащие информацию о яркости изображения в окрестности точки $i_0(k_1)$ и $j_0(k_2)$. Среднее значение яркости в этой точке равно

$$\overline{X}(i_0(k_1), j_0(k_2)) = \frac{1}{n_0^2 - 1} \sum_{m_1=-d}^d \sum_{m_2=-d}^d X(i_0(k_1) + m_1, j_0(k_2) + m_2).$$

Разности соседних измерений и среднего – это флуктуации яркости в пределах подвижного окна и их информационными показателями могут служить выборочная дисперсия и коррелированность

$$\overline{D}^*(i_0(k_1), j_0(k_2)) = \frac{1}{n_0^2 - 1} \sum_{m_1=-d}^d \sum_{m_2=-d}^d (X(i_0(k_1) + m_1, j_0(k_2) + m_2) - \overline{X}(i_0(k_1), j_0(k_2)))^2$$

$$r(i_0(k_1), j_0(k_2)) = \frac{\overline{R}^*(i_0(k_1), j_0(k_2)) - \overline{X}^2(i_0(k_1) + m_1, j_0(k_2) + m_2)}{D^*(i_0(k_1), j_0(k_2))}.$$

Информация о текстурах цифрового изображения содержится в трех матрицах случайных величин $\overline{X}(i_0(k_1), j_0(k_2))$, $\overline{D}^*(i_0(k_1), j_0(k_2))$ и $r(i_0(k_1), j_0(k_2))$. Она может быть получена путем их компьютерной визуально-аналитической обработки и анализа, начиная с визуального рассмотрения матриц $\overline{X}(i_0(k_1), j_0(k_2))$, $\overline{D}^*(i_0(k_1), j_0(k_2))$ и $R(i_0(k_1), j_0(k_2))$ выделение и описание тех или иных неоднородностей (текстур), изучения гистограмм и оценки статистических параметров.

Упростим обозначения $i_0(k_1) = k_1$, $j_0(k_2) = k_2$ и исследуем матрицы $\overline{X}^*(k_1, k_2)$, $\overline{D}^*(k_1, k_2)$ и $\overline{R}^*(k_1, k_2)$, содержащие информацию о текстурах нестабильности яркости, изменчивости ее флуктуаций и коррелированности, путем анализа статистических закономерностей строк и столбцов усредненных трех матриц.

Начнем с визуально-аналитического анализа гистограммных чисел строк и столбцов. Вычислим сначала значения яркости которых больше или равны значениям яркости измерений $q = 0, 1, 2, \dots, 255$ в каждой строке $\overline{X}^*(k_2 / k_1)$ и в каждом столбце $\overline{X}^*(k_1 / k_2)$

$$n_1(q / k_1) = \sum_{k=1}^{N_2} \operatorname{sgn} \left[q - \overline{X}^*(k_2 / k_1) \right], n_2(q / k_2) = \sum_{k=1}^{N_1} \operatorname{sgn} \left[q - \overline{X}^*(k_1 / k_2) \right].$$

Их разности – это ненормированные гистограммные числа строк и столбцов матриц $n(q, k_1)$ и $n(q, k_2)$

$$W(q / k_1) = n_1(q / k_1) - n_1((q - 1) / k_1),$$

$$W(q / k_2) = n_2(q / k_2) - n_2((q - 1) / k_2).$$

Они характеризуют закон распределения вероятностей яркости в данной строке k_1 и в столбце k_2 .

Их изменения от строки к строке и от столбца к столбцу являются признаком наличия текстуры, т.е. изменения стабильности яркости цифрового изображения. Для оценки их однородности используется критерий хи-квадрат путем сравнения ненормированных гистограммных чисел $W(q / k)$ и $W(q / k - 1)$ двух соседних выборок.

В результате такой обработки матриц гистограммных чисел формируются две выборки показателей однородности хи-квадрат $Z(k_1)$ и $Z(k_2)$, содержащих информацию об аномальных участках. Таким же методом исследуются усредненные матрицы дисперсий флуктуации и ковариаций, обрабатываются показатели их однородности и выделяются текстуры.

Эффективность рассмотренного метода зависит от выбора площади подвижного окна, поиска его оптимальных размеров. Основной метод – это метод перебора вариантов и сжатие матриц цифровых изображений, используя суммарно-разностные преобразования исходной матрицы $X(i, j)$. Выделим из нее матрицу 2x2 и запишем ее в виде

$$\begin{vmatrix} X(i-1, j-1) & X(i-1, j) \\ X(i, j-1) & X(i, j) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} X(2k_1-1, 2k_2-1) & X(2k_1-1, 2k_2) \\ X(2k_1, 2k_2-1) & X(2k_1, 2k_2) \end{vmatrix}$$

Эта матрица характеризуется двумя показателями средним значением ее элементов и средним значением их разности.

Средние значения суммы и разности равны

$$\overline{X}(k_1, k_2) = \frac{1}{4} [X(2k_1-1, 2k_2-1) + X(2k_1, 2k_2) + (X(2k_1, 2k_2-1) + X(2k_1-1, 2k_2))]$$

$$\overline{\Delta X}(k_1, k_2) = \frac{1}{2} [X(2k_1-1, 2k_2-1) - X(2k_1, 2k_2) + (X(2k_1, 2k_2-1) - X(2k_1-1, 2k_2))]$$

Средние значения и разности – это матрицы, содержащие информацию о медленных изменениях и флуктуациях яркости. Их статистические обработки позволяют выделить текстуру путем визуально-аналитического анализа гистограммных показателей средних значений дисперсий и ковариаций.

Выводы

Предложено решение задачи исследования цифровых изображений недоступных для наблюдения поверхностей технических объектов неразрушающего контроля путем сжатия матрицы измерений цифрового изображения и разделение ее на три матрицы: первая – медленно изменяющиеся измерения, и вторая и третья характеризующиеся высокочастотными измерениями (флуктуациями). Их статистические обработки позволяют выделить текстуру путем визуально-аналитического анализа гистограммных показателей средних значений дисперсий и ковариаций. Для сжатия используется метод сканирования скачкообразным подвижным окном или метод суммарно-разностного преобразования. Полученные матрицы обрабатываются путем сравнительного анализа гистограммных выборок их строк и столбцов и оценки однородности с использованием критерия хи-квадрат. Проверяется гипотеза об идентичности статистических закономерностях измерений строк и столбцов матриц, а также определение тех, которые не удовлетворяют этим требованиям. Таким образом, в условиях отсутствия эталонов, путем сканирования и сжатия матриц скачкообразным подвижным окном и последующей сравнительной обработки гистограмм строк и столбцов выделяются текстуры цифровых изображений, используя критерий хи-квадрат

ЛИТЕРАТУРА

1. Прэтт У. Цифровая обработка изображений // У. Прэтт / М.: Мир. – 1982. – 312с.
2. Фисенко В.Т., Фисенко Т.Ю. Компьютерная обработка и распознавание изображений // В.Т. Фисенко, Т.Ю. Фисенко / СПб. – 2008. – 192с.