

УДК 519.95

МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ МЕТОД АДАПТИВНОЙ КОРРЕКЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ МАТРИЦЫ ДАТЧИКОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Ю. П. Пытьев, С. С. Задорожный
(кафедра компьютерных методов физики)

Методами морфологического анализа изображений дано решение проблемы адаптивной коррекции датчиков без их специального тестирования в процессе решения содержательной задачи интерпретации измерения.

Введение

При интерпретации изображений, формируемых матрицей датчиков, возникает серьезная проблема, обусловленная разбросом и временной нестабильностью характеристик отдельных датчиков. Она в той или иной степени характерна для ПЗС-видеодатчиков инфракрасного диапазона, фазированных антенных решеток миллиметрового диапазона и особенно для матриц тензодатчиков. Последние, в частности, с успехом применяются для обнаружения опухолей в мягких тканях при медицинских исследованиях, поскольку картина распределения давления на поверхности матрицы датчиков, прижатой к исследуемой ткани, несет информацию о положении, твердости и размере опухоли [1, 2].

В работе методами морфологического анализа изображений дано решение проблемы адаптивной коррекции датчиков без их специального тестирования в процессе решения содержательной задачи интерпретации измерения.

1. Адаптивная эквализация датчиков

Для рассматриваемых в работе матриц характерен значительный разброс параметров отдельных датчиков. При одном и том же значении входного воздействия выходные сигналы датчиков могут существенно отличаться, причем их характеристики «плывут» во времени, изменяясь от измерения к измерению. Тенденция к старению у различных датчиков также проявляется по-разному. Все это приводит к непредсказуемым искажениям изображений исследуемых объектов и затрудняет их интерпретацию.

Проблема адаптивной эквализации в данной работе рассматривается как проблема коррекции характеристик прибора и преобразования его показаний к виду, не зависящему от вариации характеристик отдельных датчиков. Адаптивная эквализация должна рассматриваться как процедура, органически встроенная в процесс измерения параметров исследуемого объекта и обеспечивающая стабилизацию тех показаний прибора, которые лежат в основе анализа и интерпретации измерений.

Обозначим Z_i выходной сигнал i -го датчика, $i = 1, \dots, N$. Эквализацией назовем преобразование

$$Z_i \rightarrow k_i Z_i + b_i, \quad i = 1, \dots, N, \quad (1)$$

в котором начальное смещение выходного сигнала b_i и коэффициент усиления k_i i -го датчика, $i = 1, \dots, N$, должны быть выбраны так, чтобы при равных входных воздействиях выходные сигналы всех датчиков совпадали.

Задачу можно было бы решить путем тестирования, обеспечив, например, равные давления на датчики и определив затем k_i и b_i , $i = 1, \dots, N$, так, чтобы преобразованные выходные сигналы стали равными. Этот путь, очевидно, неприемлем, ибо при таком подходе реальный прибор нуждался бы в тестировании и юстировке перед каждым измерением.

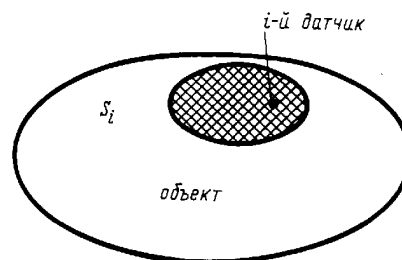


Рис. 1. Расположение датчиков на исследуемом объекте

Суть проблемы рассмотрим на примере матрицы датчиков, прижатой к исследуемой ткани с целью регистрации распределения давления на ее поверхности (рис. 1). Рассмотрим эту процедуру при условии, что ткань находится между двумя плоскостями, на одной из которых расположена матрица датчиков давления. Регистрация распределения давления производится при различных усилиях, прилагаемых к плоской матрице датчиков, и при различных ее ориентациях относительно ткани. При каждом акте регистрации с тканью соприкасается часть датчиков матрицы, вообще говоря, изменяющаяся от акта к акту. Распределения сигналов на датчиках, регистрируемые в каждом акте, будем называть изображениями распределения давления. Такое название соответствует представлению сигналов матрицы датчиков на дисплее компьютера, где каждому датчику отвечает фиксированная точка экрана, яркость в которой передает величину выходного сигнала датчика.

При каждом очередном акте регистрации сигналов положение ткани относительно матрицы датчиков отличается от предыдущего, в результате на экране компьютера изображение в каждом акте перемещается и слегка изменяется. Последнее обуслов-

лено несколькими причинами: небольшим изменением усилия, прилагаемого к матрице датчиков, и изменением ее наклона, небольшим изменением области ткани, прилегающей к матрице датчиков, а также тем, что в каждом очередном акте часть датчиков теряет контакт с тканью, в то время как другая часть, ранее не соприкасавшаяся с тканью, оказывается в контакте, причем выходные сигналы контактирующих датчиков в силу упомянутого выше разброса характеристик могут существенно отличаться от сигналов близлежащих датчиков, контактировавших с тканью в предыдущем акте. Все это приводит к тому, что в каждом акте регистрации изображение получается довольно пестрым (из-за разброса характеристик датчиков), перемещающимся по экрану от акта к акту и при этом эволюционирующим.

Следует заметить, что только априорные предположения о достаточно «гладком» распределении давления на поверхности ткани и о «малости» его изменения от акта к акту позволяют пестроту изображения объяснять разбросом характеристик датчиков. Без таких предположений оценить и скорректировать характеристики датчиков путем текущего анализа изображений невозможно, поскольку в общем случае (без априорной информации об исследуемом объекте) в каждом изображении невозможно отделить то, что относится к свойствам датчиков, от того, что относится к свойствам объекта.

Для решения задачи адаптивной эквализации датчиков следует прежде решить достаточно трудную задачу совмещения изображений для того, чтобы появилась возможность сравнивать сигналы различных датчиков, отвечающие одному и тому же месту поверхности ткани при примерно одинаковом усилии, прилагаемом к матрице датчиков. Рассмотрим задачу эквализации, считая, что проблема совмещения изображений решена^{*)}.

Речь пойдет о методе адаптивной эквализации, который не требует выполнения процедуры специального тестирования.

Пусть S_i — множество позиций на ткани, занимаемых датчиком с номером « i », Z_{si} — выходной сигнал i -го датчика, находящегося в позиции $s \in S_i$, $i = 1, \dots, N$ (N — общее число датчиков).

При эквализации выходные сигналы датчиков должны быть преобразованы согласно правилу (1), обеспечивающему выравнивание их характеристик. В процессе съема данных (сканирования) объект (ткань) перемещается относительно датчиков. Потребуется, чтобы процедура съема данных была организована так, чтобы всегда в процессе сканирования несколько датчиков попадали в одно и то же место объекта при примерно равных давлениях.

Пусть Z_s , $s \in S$, — изображение, сформированное путем совмещения и последующего поточечного усреднения изображений ткани, отвечающих примерно одинаковому суммарному давлению на датчики. Для определения k_i , b_i , $i = 1, \dots, N$, воспользуемся

условием

$$\sum_{i=1}^N \sum_{s \in S_i} (k_i Z_{si} + b_i - Z_s)^2 \sim \min_{\{k_i, b_i\}},$$

согласно которому преобразованный выходной сигнал $k_i Z_{si} + b_i$ i -го датчика в положении $s \in S_i \subset S$ должен как можно меньше отличаться от среднего значения Z_s сигналов всех датчиков в этом же положении $s \in S$.

Необходимые и достаточные условия минимума записываются в виде следующих уравнений:

$$\sum_{s \in S_i} (k_i Z_{si} + b_i - Z_s) = 0, \quad (2)$$

$$\sum_{s \in S_i} (k_i Z_{si} + b_i - Z_s) Z_{si} = 0, \quad i = 1, \dots, N. \quad (3)$$

Из (2) следует, что $b_i = -(k_i \bar{Z}_{*i}^{(i)} - \bar{Z}_*^{(i)})$, где $\bar{Z}_{*i}^{(i)} = \frac{1}{N(S_i)} \sum_{s \in S_i} Z_{si}$, $i = 1, \dots, N$, $\bar{Z}_*^{(i)} = \frac{1}{N(S_i)} \sum_{s \in S_i} Z_s$, $N(S_i)$ — число элементов (позиций S_i), $i = 1, \dots, N$. Из (3) получаем

$$k_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_{ii}}, \quad i = 1, \dots, N,$$

где

$$\sigma_i = \sum_{s \in S_i} (Z_s - \bar{Z}_*^{(i)})(Z_{si} - \bar{Z}_{*i}^{(i)}),$$

$$\sigma_{ii} = \sum_{s \in S_i} (Z_{si} - \bar{Z}_{*i}^{(i)})^2, \quad i = 1, \dots, N.$$

Скорректированные сигналы датчиков получают путем подстановки найденных значений k_i , b_i , $i = 1, \dots, N$, в соотношения (1).

Работа алгоритма иллюстрируется рис. 2–4, где представлены исходные несовмещенные изображения (рис. 2), изображения Z_s , $s \in S$, используемые для эквализации при разном числе кадров (рис. 3) и восстановленные с помощью эквализации изображения (рис. 4).

2. Морфологическое совмещение изображений ткани

Для реализации метода адаптивной эквализации необходимо предварительно сформировать изображение Z_s , $s \in S$.

Пусть $f(x)$, $x \in X$, — некоторое изображение ткани, которое назовем исходным. Будем считать также, что все остальные изображения получают из $f(\cdot)$ нелинейным (неизвестным) преобразованием

$$f(\cdot) \rightarrow F(f(\cdot)), \quad (4)$$

^{*)} Ее решение рассмотрено в следующем разделе.

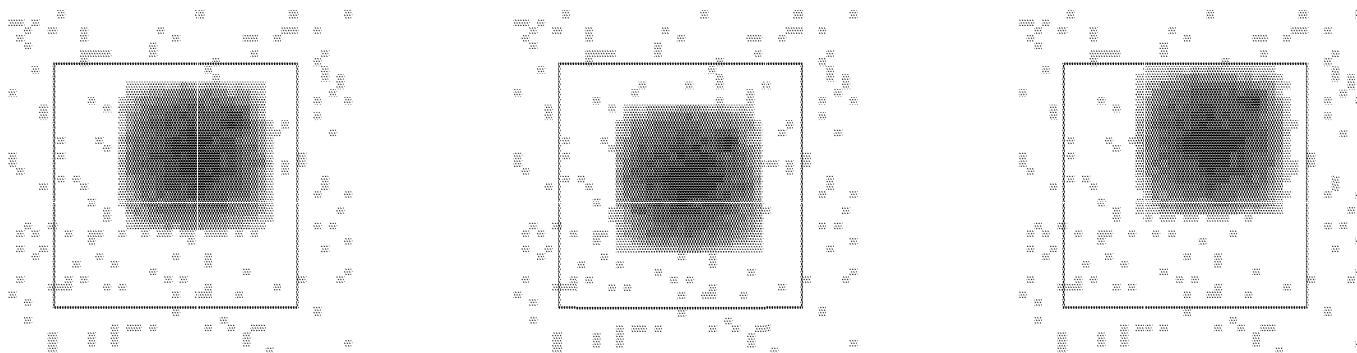


Рис. 2. Исходные несовмещенные изображения

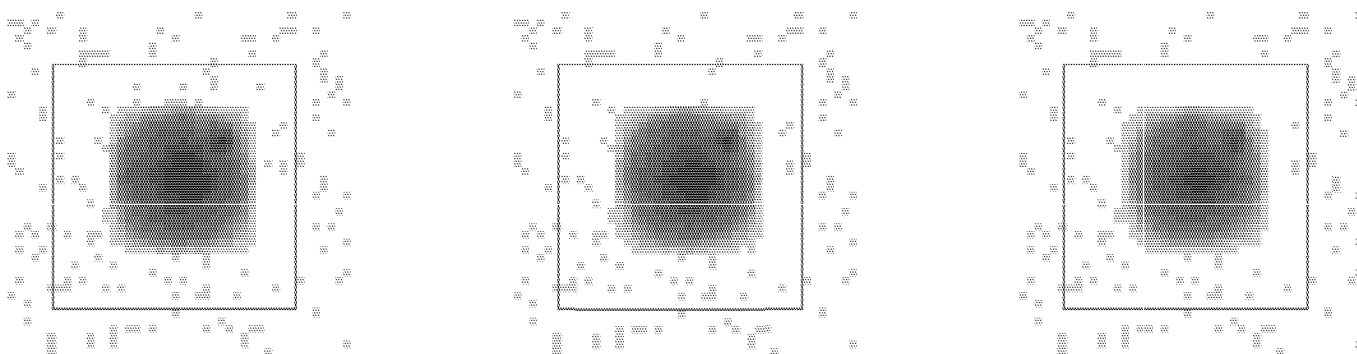


Рис. 3. Изображения $Z_s, s \in S$, используемые для эквализации при обработке 4, 8 и 16 кадров

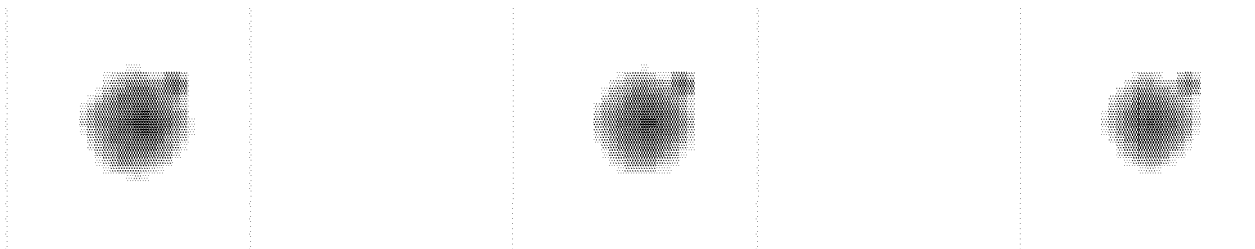


Рис. 4. Восстановленные с помощью эквализации изображения

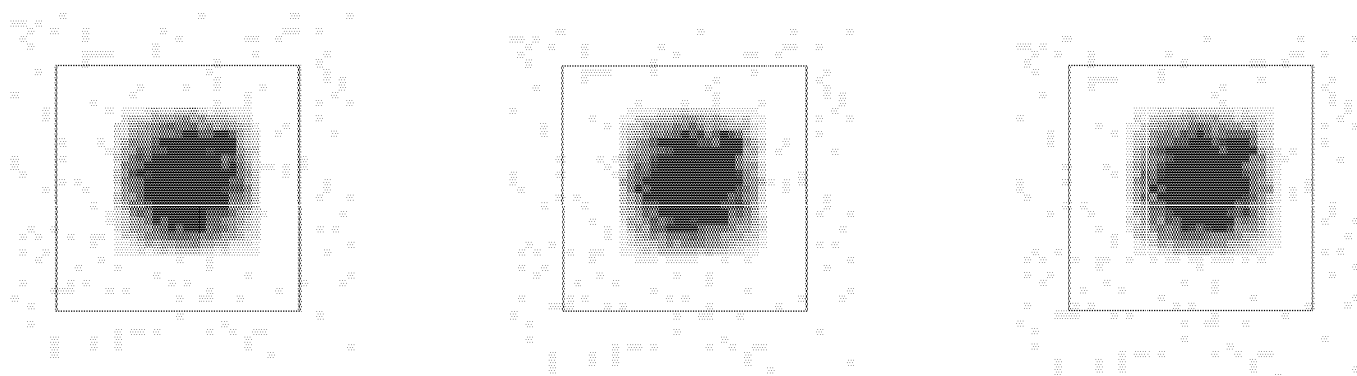


Рис. 5. Изображения, совмещенные морфологическим алгоритмом с точностью 1/4 пиксела

вызванным разной степенью нажатия на матрицу датчиков, и неизвестным сдвигом на поле зрения X , вызванным перемещением ткани относительно датчиков. Применяемые далее методы морфологического анализа изображений разработаны для распознавания изображений, подвергнутых неизвестному нелинейному преобразованию (4) [1].

Основным в морфологическом анализе является понятие *формы изображения* $f(\cdot)$. Это оператор P_f наилучшего приближения, определяемый как решение следующей задачи на минимум:

для любого изображения $g(\cdot)$

$$\min_{F(\cdot)} \int_X (g(x) - F(f(x)))^2 dx = \int_X (g(x) - P_f g(x)) dx.$$

Для решения задачи морфологического совмещения изображений ткани разработан алгоритм оптимального приближенного построения P_f , который сводится к следующему. На поле зрения X выделяются непересекающиеся области A_1, \dots, A_k , на которых значения $f(x)$, $x \in X$, примерно постоянны (с точностью до шума на изображении $f(\cdot)$). Число областей k и сами области определяются из условий оптимальности, согласно которым изображение $f(\cdot)$ и его «мозаичное», «кусочно-постоянное» приближе-

ние $\sum_{i=1}^k c_i \chi_{A_i}(\cdot)$ могут отличаться не более чем на уровень шума. Для этого достаточно область значений $f(\cdot)$ разбить на промежутки, длина которых равна среднеквадратичному значению шума, и отнести к A_i те точки $x \in X$, в которых значение $f(x)$ принадлежит i -му промежутку, $i = 1, \dots, k$ [1]. После того как оптимальное разбиение $X = A_1 \cup \dots \cup A_k$ найдено, оператор P_f задается равенством

$$P_f g(x) = \sum_{i=1}^k \frac{\chi_i(x)}{\mu(A_i)} \int_{A_i} g(z) dz,$$

где $\chi_i(x) = \begin{cases} 1, & x \in A_i \\ 0, & x \notin A_i \end{cases}$, $x \in X$, — характеристическая функция множества A_i , $\mu(A_i) = \int_{A_i} dz$ — площадь A_i , $i = 1, \dots, k$.

Оператор P_f позволяет идентифицировать (распознать) все изображения, отличающиеся от $f(\cdot)$ преобразованием (4), поскольку для любой функции $F(\cdot)$ величина $F(f(\cdot)) - P_f F(f(\cdot))$ сравнима с уровнем шума. Это свойство оператора P_f позволяет решать задачу совмещения изображения $g(\cdot)$ с изображением $f(\cdot)$, когда $g(\cdot)$ отличается от $f(\cdot)$ не только некоторым сдвигом на поле зрения, но и неизвестным нелинейным преобразованием, т. е. когда

$$g(x) = F(f(x + h)), \quad x \in X, \quad (5)$$

где функция $F(\cdot)$ и вектор сдвига $h \in X$ неизвестны.

Простейший алгоритм, позволяющий определить h и решить задачу совмещения, сводится к минимизации [2]:

$$J_y(g(\cdot)) = \|g_y(\cdot) - P_f g_y(\cdot)\| \sim \min_{y \in X},$$

где $g_y(x) = g(x - y)$, $x, y \in X$, и $\|g(\cdot)\|^2 = \int_X g^2(x) dx$.

Дело в том, что $\|g_y(\cdot) - P_f g_y(\cdot)\|_{y=h} \approx 0$, если $g(\cdot)$ определено выражением (5).

В работе для решения задачи совмещения использован функционал

$$J_y(g(\cdot)) = \frac{\|g_y(\cdot) - P_f g_y(\cdot)\|^2}{\|E g_y(\cdot) - P_f g_y(\cdot)\|^2}, \quad y \in X, \quad (6)$$

в котором $\|g_y(\cdot) - P_f g_y(\cdot)\|^2 = \int_X (g(x - y) - P_f g(x - y))^2 dx$, $E g_y(x) = \frac{1}{\mu(X)} \int_X g(x - y) dx$, причем сов-

мещаемые изображения таковы, что если носитель изображения $g(\cdot): X(g(\cdot)) = \{x \in X, g(x) > 0\} \subset X$, то при рассматриваемых $y \in X$ носитель изображения $g_y(\cdot): X(g_y(\cdot)) \subset X$.

Функционал (6) позволяет совмещать изображения с точностью до одного пиксела на экране монитора. Однако при медленном перемещении матрицы датчиков изображения ткани в двух последовательных кадрах оказываются смещенными на величину, меньшую, чем один пиксел. Это приводит к подергиванию наблюдаемых в процессе совмещения изображений, поскольку перемещение на долю пиксела заметно на экране, но не корректируется, так как сдвиг на долю пиксела не может быть определен путем решения задачи на минимум $J_y(g(\cdot)) \sim \min_{y \in X}$ и непосред-

ственно реализован. Для устранения этого эффекта и уточнения величины смещения совмещение изображений выполняется на сетке в 4 раза более частой, чем исходное изображение, путем интерполяции промежуточных значений сдвига, а при отображении изображения преобразуются к исходному размеру путем усреднения.

Работа морфологического алгоритма совмещения проиллюстрирована на рис. 5, где представлены совмещенные изображения.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «Перспективные информационные технологии» (грант 05.05.1078) министерства науки и технологий (отдел В. В. Бойко).

Литература

1. Pyt'ev Yu.P. // Pattern Recognition and Image Analysis. 1993. 3, No. 3. P. 19.
2. Пытьев Ю.П. // Математические методы исследования природных ресурсов Земли из космоса. М., 1984. С. 41.

Поступила в редакцию
19.09.97