

УДК 681.3, 621.372.542

РАСПОЗНАВАНИЕ И КОРРЕКЦИЯ АРТЕФАКТОВ НА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ*

С. А. Бибиков^{1, 2}, Р. К. Захаров¹, А. В. Никоноров¹,
В. А. Фурсов², П. Ю. Якимов²

¹Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Самарский государственный аэрокосмический университет
им. академика С. П. Королёва»,

443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

²Учреждение Российской академии наук

Институт систем обработки изображений РАН,

443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 151

E-mail: bibikov.sergey@gmail.com

Рассматривается задача автоматизации ретуширования точечных артефактов в процессе предпечатной подготовки изображений. Предложен новый алгоритм распознавания и локализации множественных точечных бликов, основанный на применении так называемого показателя сопряжённости. Разработана схема построения обучающих правил для настройки на различные типы артефактов. Приведён пример, иллюстрирующий работоспособность предложенного алгоритма на реальном изображении.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, точечный блик, цветовая коррекция, распознавание, идентификация.

Введение. В последние годы растёт спрос на новые информационные технологии цветовой коррекции цифровых изображений в различных приложениях. Задачу цветовой коррекции обычно решают профессиональные корректоры с использованием стандартных средств, например инструментальной среды обработки изображений Adobe Photoshop. К сожалению, технологические и вычислительные возможности этих систем ограничены и коррекция цветных изображений занимает длительное время: «ручная» обработка изображения объёмом около 30 Мпикселей (в зависимости от характера и интенсивности искажений) может занимать до 10 ч. Даже для предпечатных процессов такие временные затраты являются существенными, а в системах видеоконтроля и видеонаблюдения просто недопустимы, так как решения должны приниматься в реальном времени. Поэтому актуальна задача построения информационной технологии обнаружения и устранения искажений, отличающейся высокой степенью автоматизации.

В работе [1] рассматривалась автоматизированная технология цветовой коррекции тени от рамки, образующейся вследствие того, что в момент съёмки разные области полотна находятся на различных расстояниях от осветителей. Одним из наиболее распространённых видов искажений на изображениях являются блики. Бликом будем называть область повышенной яркости, возникающую при регистрации изображений из-за зеркального или диффузного отражения света от поверхности регистрируемого объекта. В зависимости от размеров и характера отражающих поверхностей блики могут иметь разнообразные фор-

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 09-07-00269-а).

му и размеры. В частности, блики на зеркальных поверхностях (например, окон зданий и автомобилей) обычно имеют большие размеры и характерную «звёздообразную» форму.

В данной работе ограничимся рассмотрением бликов небольших размеров (площадью в 16–36 пикселей), появляющихся при регистрации произведений живописи для создания репродукций. Такие блики возникают вследствие отражения от мазков масляной краски и присутствуют на цифровом изображении в виде большого числа мелких ярких точек. В отличие от других типов бликов будем называть их множественными точечными бликами или артефактами.

В работах [1, 2] рассматривались алгоритмы обнаружения, локализации и цветовой коррекции множественных точечных бликов, основанные на использовании обработки скользящим окном. Чтобы принять решение о наличии блика в окне заданного фиксированного размера, для каждого его положения вычисляются характеристики абсолютной и относительной (по сравнению с окрестностью) яркости. Проблема состоит в том, что размеры точечных бликов могут различаться в довольно значительных пределах даже на одном изображении. Поэтому для повышения качества коррекции артефактов необходимо предусмотреть разбиение множества точечных артефактов на классы (типоразмеры), а в информационную технологию ввести процедуру их распознавания. При обучении распознаванию для каждого класса должен формироваться обучающий (эталонный) набор бликов соответствующего типоразмера.

В данной работе предпринимается попытка выработать некоторые общие рекомендации и подходы к построению решающих правил и процедур и выстроить целостную технологию обнаружения, локализации и цветовой коррекции бликов. В частности, предлагается алгоритм распознавания и локализации множественных точечных бликов с применением так называемого показателя сопряжённости. Создаётся схема построения обучающих правил для настройки на различные типоразмеры артефактов. Описывается алгоритм цветовой коррекции, основанный на идентификации полиномиальной модели. Приводится пример, иллюстрирующий работоспособность рассмотренного алгоритма на реальном изображении.

1. Формирование системы признаков бликов. Для решения задач обнаружения, локализации и распознавания типа блика необходимо выбрать систему признаков. Предполагается, что цветные изображения заданы в цветовом пространстве RGB, а соответствующие указанным компонентам три функции яркости в области каждого пикселя определяются как $f_R(x, y)$, $f_G(x, y)$, $f_B(x, y)$. Введём в рассмотрение функцию общей яркости $f(x, y)$, являющуюся взвешенной суммой указанных функций:

$$f(x, y) = 0,3f_R(x, y) + 0,59f_G(x, y) + 0,11f_B(x, y), \quad (1)$$

коэффициенты которой задаются эмпирически [3].

Пусть W_1 — область изображения, покрытая бликом, и W_0 — некая её окрестность. Рассмотрим функцию принадлежности

$$\begin{cases} I_0(x, y) = 1, & (x, y) \in W_1, \\ I_0(x, y) = 0, & (x, y) \notin W_0. \end{cases} \quad (2)$$

В соответствии с приведённым выше описанием механизма возникновения точечных артефактов будем полагать, что в области W_1 имеет место точечный блик, если выполняются следующие неравенства:

$$\max_{(x, y) \in W_1} f(x, y) = f \geq f_1, \quad (3)$$

$$\frac{M_{(x,y) \in W_1} f(x,y)}{M_{(x,y) \in W_0} f(x,y)} = M \geq M_1, \quad (4)$$

$$\sum_{(x,y) \in W_1} I_0(x,y) = S \leq S_1, \quad (5)$$

$$D(W_1) = D \leq D_1. \quad (6)$$

Неравенство (3) накладывает ограничение на минимальную величину абсолютной яркости, а (4) — на величину относительной яркости. Здесь $Mf(x,y)$ — среднее значение функции яркости, $D(W_1)$ — диаметр области, т. е. значение, определяющее степень компактности области. В работе [4] указанные признаки использовались для автоматического обнаружения бликов с фиксированными настройками пороговых значений величин f, M, S, D . При этом блики, отличающиеся по размерам (слишком крупные и/или мелкие), часто оставались необнаруженными.

Другая проблема, с которой приходится сталкиваться, состоит в том, что обычно в некоторой окрестности фиксируется несколько точек, в каждой из которых выполняются указанные выше условия (3)–(6), и не ясно, какая же из этих точек является центральной точкой блика. Попытка сузить эту область заданием более высоких порогов приводит к пропускам бликов. Если же пороги снижены, число точек, претендующих на наличие блика, возрастает. При этом в непосредственной близости друг от друга могут фиксироваться блики с разными размерами областей W_1 и W_0 .

Таким образом, в общей информационной технологии на начальном этапе могут быть выделены лишь некоторые области, «подозрительные» на наличие блика, и может использоваться упрощённая схема обнаружения, основанная на проверке лишь одного условия (3). Далее, до выполнения собственно цветовой коррекции артефактов на каждом из полученных множеств точек должна решаться задача локализации и распознавания типа блика.

2. Построение алгоритма распознавания. Для построения процедуры распознавания целесообразно ввести унифицированные обозначения для признаков. В частности, введём вектор

$$\mathbf{x}_i = [x_1(i), x_2(i), x_3(i), x_4(i)]^T \quad (7)$$

размерности $N \times 1$ (в данном случае вектор размерности 4×1), где $x_1 = f(i)$; $x_2 = M(i)$; $x_3 = S(i)$; $x_4 = D(i)$.

В общем случае решение задачи распознавания состоит в конструировании решающей функции $g: R^n \mapsto \{0, 1, 2, \dots, k\}$, которая для каждого вектора \mathbf{x}_i вырабатывает решение о его принадлежности к некоторому классу.

В данном случае одновременно должны решаться задачи определения класса (типа блика) и его локализации в некоторой области точек изображения, выделенной как множество точек, подозрительных на блик. При этом предполагается, что заданы K векторов вида (7), являющиеся классами эталонных бликов, которые отличаются геометрическими и яркостными характеристиками. Будем полагать, что для каждого класса задано M векторов так, что для каждого k -го класса может быть составлена матрица размера $N \times M$:

$$\mathbf{X}_k = [\mathbf{x}_1(k), \mathbf{x}_2(k), \dots, \mathbf{x}_M(k)], \quad k = 1, \dots, K. \quad (8)$$

Введём в рассмотрение так называемый показатель сопряжённости с подпространством, натянутым на векторы признаков образов объектов из заданного класса:

$$R_k = \frac{\mathbf{x}^T \mathbf{X}_k [\mathbf{X}_k^T \mathbf{X}_k]^{-1} \mathbf{X}_k^T \mathbf{x}}{\mathbf{x}^T \mathbf{x}}. \quad (9)$$

Здесь \mathbf{x} — вектор признаков неизвестного образа, предъявленный для установления близости к k -му классу, а \mathbf{X}_k — матрица размера $N \times M$ (8).

В предположении, что для каждого (k -го) класса сформирована матрица размера $N \times N$:

$$\mathbf{Q}_{k,R} = \mathbf{X}_k [\mathbf{X}_k^T \mathbf{X}_k]^{-1} \mathbf{X}_k^T, \quad (10)$$

строится решающая функция $g(\mathbf{x})$. Вектор \mathbf{x} является образом искомого объекта (блика) и принадлежит m -му классу, т. е. $g(\mathbf{x}) = m$, $m = 1, 2, \dots, K$, если

$$R_m = \max_{k, i, j} R_k(i, j), \quad (11)$$

где

$$R_k(i, j) = \frac{\mathbf{x}_{i,j}^T \mathbf{Q}_k \mathbf{x}_{i,j}}{\mathbf{x}_{i,j}^T \mathbf{x}_{i,j}}. \quad (12)$$

Таким образом, для построения процедуры распознавания необходимо на этапе обучения для каждого предполагаемого типа (класса) бликов с использованием матрицы (8) построить по соотношению (10) матрицу \mathbf{Q}_k размера $N \times N$. Подчеркнём, что максимум показателя сопряжённости $R_k(i, j)$ ищется по всем классам и всем точкам области, подозрительным на наличие блика.

3. Определение параметров решающих правил. Как указывалось выше, на этапе обучения требуется для каждого типа (k -го класса) бликов построить матрицу \mathbf{Q}_k размера $N \times N$ и выбрать пороговые значения величин f, M, S, D , фигурирующих в неравенствах (3)–(6). Для этого следует задать по несколько (в данном случае не более четырёх) эталонных бликов каждого типа. Эта часть работы трудно формализуема и для каждого конкретного изображения обычно выполняется пользователем вручную. После того как фрагменты изображения, содержащие по одному эталону блика определённого типа, заданы, для каждого из них необходимо найти центральную точку, границы и подобрать размеры областей W_1 и W_0 .

Определение центральной точки блика осуществляется с использованием оконной модели [3], которая представляется в виде двух вложенных квадратов с общим центром (x_0, y_0) . Размеры областей задаются пользователем на основе ориентировочных оценок размеров блика данного типа. Полагают, что область внутреннего квадрата содержит блик. Возможная неточность в оценке размеров областей на данном этапе не имеет существенного значения, так как для поиска центральной точки используются значения относительной яркости (4):

$$M(x_0, y_0) = \sum_{x_i, y_i \in W_1} f(x_i, y_i) \left[\sum_{x_i, y_i \in W_0} f(x_i, y_i) \right]^{-1}, \quad (13)$$

вычисляемые на полутоновом изображении. Центральной считается точка (x_0, y_0) , для которой указанное значение $M(x_0, y_0)$ на выделенном фрагменте, содержащем один эталонный блик, достигает максимума.

Для определения границы эталонного блика используется так называемая функция контраста [1]. В полярной системе координат, заданной радиусом-вектором oz с началом в точке (x_0, y_0) , блик можно определить как область, множество граничных точек z^* которой являются точками максимумов функций контраста [1]:

$$F(z^*) = \max_{\forall z} \left\{ \sum_{z_i < z^*} f(z_i) - \sum_{z_i > z^*} f(z_i) \right\}, \quad (14)$$

вычисленных в направлении радиуса-вектора oz при его повороте вокруг начала координат o , в данном случае вокруг точки (x_0, y_0) на угол $[0, 2\pi]$. Граница блика в этой модели может быть представлена некоторой функцией, построенной путём интерполяции множества граничных точек. Если граница имеет сложную форму, описание которой в каком-либо параметрическом семействе функций затруднительно, более удобным может оказаться её описание в виде таблицы координат граничных точек.

Значения функции яркости в граничных точках эталонного блика позволяют назначить порог для построения функции принадлежности (2). После того как она становится известной, могут быть определены также пороговые значения для f , S и D и уточнены размеры областей W_1 и W_0 .

Для уточнения размеров областей W_1 и W_0 размеры вложенных квадратов с общим центром (x_0, y_0) подбираются из некоторого заданного ряда допустимых типоразмеров таким образом, чтобы достигался максимум функции относительной яркости (12):

$$M(x_0, y_0) = \max_{\forall W_0, W_1} \left\{ \sum_{x_i, y_i \in W_1} f(x_i, y_i) \left[\sum_{x_i, y_i \in W_0} f(x_i, y_i) \right]^{-1} \right\}. \quad (15)$$

Если размеры окон всех эталонных бликов определены, для каждого из них может быть сформирован вектор признаков (7), а из векторов признаков каждого типоразмера составлена соответствующая матрица \mathbf{X}_k (8). Напомним, что поскольку вектор \mathbf{x}_i имеет размерность 4×1 , число таких векторов в матрице \mathbf{X}_k не может быть больше четырёх, т. е. для каждого типа бликов может быть задано не более четырёх обучающих примеров. Число классов для каждого изображения определяется диапазоном изменения характеристик встречающихся на нём бликов и требованиями достижимой надёжности распознавания.

С учётом сформированных матриц \mathbf{X}_k далее для каждого класса (типа блика) по соотношению (10) вычисляется матрица \mathbf{Q}_k , которая используется в решающем правиле (11) на этапе локализации и распознавания бликов.

4. Цветовая коррекция бликов. Для замещения цвета пикселей в области точечного блика в работах [5, 6] применялся алгоритм, заключающийся в клонировании на область блика цвета и текстуры из его окрестности. Затем выполнялось гауссово размытие в области, несколько большей, чем область блика, позволяющее избежать резких границ между ретушированным участком и его окрестностью. В данном случае, следуя работам [7, 8], для замещения пикселей блика осуществляется идентификация параметров формальной модели с использованием информации о цвете в области вокруг бликов.

Предполагается, что цвет задан в пространстве RGB. Задача цветовой коррекции области блика решается для каждого цветового канала независимо с помощью одинаковых алгоритмов. Поэтому для простоты ограничимся описанием цветовой коррекции в канале R.

Будем считать, что цвета в области блика и его окрестности представляются некоторой моделью, например полиномиальной:

$$R(x_i, y_i) = c_1 x_i^2 + c_2 y_i^2 + c_3 x_i y_i + c_4 x_i + c_5 y_i + c_6. \quad (16)$$

Для построения алгоритма определения значений цвета в точках блика решается задача идентификации вектора $\mathbf{C} = [c_1, c_2, \dots, c_6]^T$ параметров модели (16) по опорным значениям цвета $R(x_i, y_i)$ [4], где (x_i, y_i) — точки из окрестности блика. Чтобы увеличить число опорных точек, окрестность блика расширяется методом дилатации. Для решения задачи идентификации по фактическим значениям цветовых координат в опорных точках используется линейная по параметрам модель

$$\mathbf{R} = \mathbf{X}\mathbf{C} + \boldsymbol{\xi}, \quad (17)$$

где

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} f_r(x_1^1, y_1^1) \\ f_r(x_2^1, y_2^1) \\ \vdots \\ f_r(x_I^1, y_I^1) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_6 \end{bmatrix}; \quad \boldsymbol{\xi} = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \vdots \\ \xi_I \end{bmatrix}; \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} (x_1^1)^2 & (y_1^1)^2 & x_1^1 y_1^1 & x_1^1 & y_1^1 & 1 \\ (x_2^1)^2 & (y_2^1)^2 & x_2^1 y_2^1 & x_2^1 & y_2^1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (x_I^1)^2 & (y_I^1)^2 & x_I^1 y_I^1 & x_I^1 & y_I^1 & 1 \end{bmatrix};$$

$\boldsymbol{\xi}$ — ошибки, связанные с неточностями аппроксимации модели.

Алгоритм для определения искоемых оценок параметров строится следующим образом. На первом шаге методом наименьших квадратов находится обычная оценка [9]

$$\hat{\mathbf{c}} = [\mathbf{X}^T \mathbf{X}]^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{R}. \quad (18)$$

Затем вычисляется весовая матрица

$$\mathbf{G} = \text{diag}[g_1, g_2, \dots, g_N],$$

состоящая из N диагональных элементов $g_n = g_0 / (\varepsilon + |\xi_n|)$, $n = \overline{1, N}$, где ξ_n — n -я компонента вектора $\boldsymbol{\xi}$, а g_0 определяется из условия нормировки

$$\sum_{n=1}^N g_n = N.$$

Здесь ε — число, заведомо меньшее самого малого значения ξ_n , которое вводится для того, чтобы исключить возможность деления на нуль.

С использованием полученной таким образом весовой матрицы повторяется вычисление оценок параметров функции преобразования по методу взвешенных наименьших квадратов:

$$\hat{\mathbf{c}} = [\mathbf{X}^T \mathbf{G}_i \mathbf{X}]^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{G}_i \mathbf{R}. \quad (19)$$

В результате получают оценки, которые с высокой степенью приближения являются оценками метода наименьших модулей [10, 11].

5. Информационная технология и результаты экспериментов. Информационная технология, с помощью которой осуществлялась экспериментальная проверка описанного выше алгоритма, строится следующим образом. Сначала происходит выявление локальных областей, подозрительных на наличие бликов. Для обнаружения точек, подозрительных на наличие блика, применяется характеристика абсолютной яркости (3). В

результате реализации этой процедуры формируется бинарное изображение с большим количеством выявленных локальных областей, в каждой из которых содержится множество точек, подозрительных на блики.

Далее «просматриваются» значения показателей $R_k(i, j)$, полученные на множестве точек, принадлежащих отдельной замкнутой локальной области, подозрительной на наличие бликов. Решение о типе блика и координатах его центральной точки здесь принимается в соответствии с решающим правилом (11). Для выявления всех бликов на изображении этой процедуре подвергаются все выделенные локальные области. Для каждого найденного таким образом артефакта проверяется выполнение условий существования блика (3)–(6). После того как установлены координаты центров и типы (размеры) всех бликов, осуществляется их цветовая коррекция (ретуширование) с использованием модели (16), параметры которой определены в результате решения задачи идентификации, описанной в разд. 3.

На рисунке, a – d приведены примеры применения описанной технологии к обработке фрагмента реального изображения. На рисунке, a дано исходное изображение, содержащее большое число артефактов в виде точечных бликов различных размеров.



На рисунке, *b* показан результат обработки с фиксированными настройками алгоритма. Размеры окон W_1 и W_0 задавались равными 4×4 и 8×8 соответственно.

На рисунке, *c, d* представлены изображения, полученные с использованием алгоритма локализации и распознавания по показателю сопряжённости. Рисунок, *c* иллюстрирует изображение, полученное при задании двух классов (размеры окон $W_1 = 4 \times 4$, $W_0 = 8 \times 8$ и $W_1 = 6 \times 6$, $W_0 = 12 \times 12$), а рисунок, *d* — при задании трёх классов (размеры окон $W_1 = 4 \times 4$, $W_0 = 8 \times 8$; $W_1 = 6 \times 6$, $W_0 = 12 \times 12$ и $W_1 = 8 \times 8$, $W_0 = 14 \times 14$).

Заключение. Представленная в данной работе информационная технология обнаружения, распознавания, локализации и коррекции точечных артефактов (бликов) на цифровых изображениях реализована в виде программного комплекса, предназначенного для предпечатной подготовки репродукций произведений живописи [4]. Основным достоинством разработанного алгоритма является возможность достижения высокой степени автоматизации процесса коррекции цифровых изображений. При этом автоматизированная обработка реальных изображений обычно позволяет получить результат, не требующий дополнительной ручной доводки.

При разработке и описании алгоритма, а также постановке экспериментов авторы ориентировались, прежде всего, на задачу цветовой коррекции артефактов на цифровых изображениях произведений живописи. Поэтому описанная технология, скорее всего, найдёт применение в процессах предпечатной подготовки изображений в полиграфии, при создании виртуальных музеев и др. Вместе с тем эти результаты могут иметь более широкое значение. В частности, предложенная технология может использоваться для обработки изображений в системах дистанционного зондирования Земли, устранения артефактов на изображениях в системах видеоконтроля и видеонаблюдения и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бибиков С. А., Никоноров А. В., Фурсов В. А.** Информационная технология коррекции теневых искажений на цветных цифровых изображениях // Компьютерная оптика. 2010. **34**, № 1. С. 124–131.
2. **Bibikov S. A., Fursov V. A., Nikonorov A. V.** Shadow artifacts correction on fine art reproductions // Proc. of the IMTA 2010 in conjunction with VISIGRAPP 2010. Angers, France, 17–21 May, 2010. P. 3–12.
3. **Джадд Д., Вышецки Г.** Цвет в науке и технике. М.: Мир, 1978. 580 с.
4. **Бибиков С. А., Никоноров А. В., Фурсов В. А., Якимов П. Ю.** Исследование эффективности технологии CUDA в задаче распределенной предпечатной подготовки цифровых изображений // Тр. Всеросс. суперкомпьютерной конф. «Научный сервис в сети Интернет: масштабируемость, параллельность, эффективность». М.: Изд-во МГУ, 2009. С. 204–207.
5. **Фурсов В. А., Никоноров А. В.** Распределенный алгоритм коррекции точечных артефактов на цветных изображениях // Тр. Четвертой междунар. конф. «Параллельные вычисления и задачи управления» (РАСО'2008). Москва, 27–29 октября 2008. С. 1087.
6. **Никоноров А. В., Фурсов В. А.** Распределенная вычислительная среда коррекции цветных изображений // Тр. XV Всеросс. науч.-метод. конф. «Телематика 2008». С.-Пб., 23–26 июня 2008. С. 88–89.
7. **Бибиков С. А., Фурсов В. А.** Цветовая коррекция на основе идентификации моделей по тестовым фрагментам изображений // Компьютерная оптика. 2008. **32**, № 3. С. 302–307.

8. **Бибиков С. А.** Идентификация параметров модели цветовой коррекции точечных бликов // Математическое моделирование и краевые задачи: Тр. Седьмой всеросс. науч. конф. с международным участием. Ч. 4. Информационные технологии в математическом моделировании. Самара: СамГТУ, 2010. С. 19–21.
9. **Лоусон Ч., Хенсон Р.** Численное решение задач метода наименьших квадратов: Пер. с англ. М.: Наука, 1986. 232 с.
10. **Мудров В. И., Кушко В. Л.** Методы обработки измерений: Квазиправдоподобные оценки. М.: Радио и связь, 1983. 304 с.
11. **Фурсов В. А.** Идентификация моделей систем формирования изображений по малому числу наблюдений. Самара: СГАУ, 1998. 218 с.

Поступила в редакцию 1 марта 2011 г.
