

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КОРРЕКЦИИ ТЕНЕВЫХ ИСКАЖЕНИЙ НА ЦВЕТНЫХ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Сергей Алексеевич Бибиков¹ (аспирант, bibikov.sergei@gmail.com),

Артем Владимирович Никоноров¹ (доцент, admin@mcdk.com),

Владимир Алексеевич Фурсов² (в.н.с., fursov@smr.ru)

¹ Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева,

² Учреждение Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН

Аннотация

В работе рассматривается информационная технология коррекции теневых искажений на цветных цифровых изображениях, получаемых путем фотографирования произведений живописи с целью их репродукции. Теневые искажения возникают вследствие различной интенсивности освещения картины с двух сторон. Решается задача выделения области тени и последующей цветовой коррекции в этой области. Приводятся результаты обработки реальных изображений по предложенной технологии.

Ключевые слова: обработка изображений, теневые искажения, цветовая коррекция, идентификация.

Введение

Цифровые изображения произведений живописи используются при создании репродукций картин, виртуальных музеев и цифровых каталогов хранящихся в музеях полотен. Обычно они создаются одним из двух способов: либо непосредственным регистрированием на цифровую камеру, либо сканированием созданных ранее фотографических негативов и слайдов. Основная проблема при фотографировании картины – создание равномерного интенсивного освещения всей поверхности полотна. Для этого картину освещают с двух сторон мощными лампами – софитами. При этом вследствие разной удаленности осветительных приборов у кромок боковых рамок возникают теневые полосы.

В работе [1] рассматривалась задача устранения теневых искажений с использованием двух идентичных изображений одного сюжета, одно из которых получено в естественных условиях, а второе – с применением дополнительного освещения (фото вспышки). Задачи цветовоспроизведения и коррекции цветовых искажений на цифровых изображениях решались также в работах [2–7]; в них исследовались случаи равномерных теневых искажений по полю изображения.

В настоящей работе рассматривается информационная технология устранения теневых искажений в ситуации, когда доступным является единственный уникальный экземпляр фотокопии произведения живописи, а теневые искажения локализованы в некоторой области. В работе рассматривается метод коррекции, основанный на использовании алгоритма идентификации формальной модели преобразования функции яркости. Приводятся примеры обработки реальных изображений.

1. Постановка задачи

Предполагается, что регистрация изображения произведения живописи осуществляется таким образом, что оси координат, связанные со сторонами прямоугольной рамки картины и цифрового изо-

бражения, параллельны. Для определенности будем полагать, что начало системы координат находится в левом нижнем углу прямоугольной рамки картины, ось OY направлена вверх, а ось OX – вправо. Соответственно направлены оси oy и ox прямоугольного окна регистрирующего устройства, а отклонениями от параллельности осей OY , oy и OX , ox можно пренебречь.

В настоящей работе рассмотрение ограничивается устранением теневой полосы вдоль левой боковой стороны изображения так, что левая граница полосы совпадает с осью OY . Это не является каким-либо ограничением в рассматриваемой задаче, поскольку алгоритмы устранения полосы тени, расположенной вдоль любой границы изображения, не изменятся, если осуществить соответствующий поворот системы координат.

Обычно осветительные приборы не вносят заметного дополнительного цветового искажения. Поэтому для определения и устранения теневых искажений в настоящей работе используется информация только о светлости точек на изображении. Известно [8], что эта информация содержится в яркостных компонентах некоторых цветовых пространств. В настоящей работе используется обладающее таким свойством цветовое пространство $CIE Lab$.

В случае, когда осветительные приборы вносят дополнительные цветовые искажения, корректировка должна проводиться также и в каналах, несущих цветовую информацию. Поскольку эти искажения распределены равномерно по полю изображения, эта задача может решаться после устранения теневых искажений методами, рассмотренными в работах [2–7].

Дадим определение тени. Пусть k – номер строки параллельной оси ox , отсчитываемый в направлении оси oy . Рассмотрим в этой строке интервал $[0, N]$. Пусть $s^* < N$ некоторая точка на этом интервале. Будем полагать, что для k -й строки равномерно освещенного изображения имеет место ра-

венство средних на интервалах слева и справа от этой точки:

$$\frac{1}{s^*} \sum_{i=1}^{s^*} L_k(x_i) = \frac{1}{N - s^*} \sum_{i=s^*+1}^N L_k(x_i), \quad (1)$$

где $L_k(x_i)$ – отсчеты яркости в точках x_i k -й строки изображения. В действительности указанное предположение обычно выполняется неточно. Однако различиями средних значений в (1) можно пренебречь по сравнению с интенсивностью различий, вносимых затенением.

Тенью на интервале $[0, s^*]$ будем называть искажение, при котором для любого интервала $[s^b, s^e] \in [0, s^*]$ имеет место неравенство

$$\frac{1}{s^e - s^b} \left(\sum_{i=s^b+1}^{s^e} \hat{L}_k(x_i) - \sum_{i=s^b+1}^{s^e} \check{L}_k(x_i) \right) > d, \quad (2)$$

где d – параметр, характеризующий интенсивность затенения. Здесь и далее (там, где это потребуется особо подчеркнуть) отсчеты яркости в случае освещенных точек изображения обозначены $\hat{L}_k(x_i)$, а в случае затененных – $\check{L}_k(x_i)$.

Вследствие того, что источник освещения не является точечным, граница тени, как правило, оказывается размытой. Тем не менее, определение тени (1), (2) остается справедливым и в этом случае, если функция размытия гладкая и не имеет хребтовых точек (изменения знака производной). В качестве граничной точки s^* области тени в этом случае будем считать точку, в которой функция размытия равна полусумме своих предельных значений. Эту точку далее будем называть средней точкой переходной области.

Область тени для различных строк k , кроме прочего, может быть различной также вследствие того, что рамка картины, отбрасывающая тень, имеет рельеф. Таким образом, область тени имеет две зоны, характер искажений в которых, а следовательно, и способы их коррекции должны быть различны, а границы этих зон в общем случае непрямолинейны.

Непосредственно к оси ou примыкает (основная) область с равномерной затененностью, определяемой параметром d . Между этой областью и освещенной областью имеется переходная область, затененность которой убывает в направлении оси ox . Границы переходной области, отделяющие ее от затененной и освещенной областей, являются криволинейными. Обычно координата x этих кривых имеет незначительный разброс относительно прямой, параллельной оси ou .

Таким образом, задача заключается в определении границ основной и переходной областей тени и построении алгоритмов цветовой коррекции в каждой из этих областей с учетом особенностей изменения интенсивности теневых искажений в них.

2. Определение границы области тени

Задача определения границ переходной области тени, по существу, является задачей выделения контуров. Наиболее близкой к рассматриваемой является задача выделения контуров в цветовом пространстве *CIE Lab*, рассмотренная в работе [9]. В указанной работе использовался так называемый метод активных контуров [10], основанный на теории эволюции кривых. Однако в данном случае этот метод не может быть применен в исходном виде, т.к. границы областей размыты. Ниже рассматривается алгоритм определения границ переходной области тени, учитывающий указанные особенности контуров.

Задача решается в два этапа: вначале определяется множество G точек $(x_k, y_k) \in G$, принадлежащих так называемой средней линии переходной области, ориентированной вдоль оси ou . Затем в ее окрестности формируется вся переходная область (полоса).

Будем рассматривать одну яркостную компоненту трехкомпонентного цветного изображения – L . Для определения границы области тени введем критерий. Для точки s^* , являющейся границей области тени, определяемой соотношениями (1), (2), вводится в рассмотрение так называемый *показатель контраста*:

$$f(s) = C_R - C_L, \quad (3)$$

где

$$C_R = \frac{1}{N - s^*} \sum_{i=s^*+1}^N \check{L}_k(x_i),$$

$$C_L = \frac{1}{s^*} \sum_{i=1}^{s^*} \hat{L}_k(x_i)$$

– оценки среднего значения функции яркости на интервалах $[s^*+1, N]$ и $[1, s^*]$ соответственно, а N – количество отсчетов на исследуемом участке изображения в направлении оси ox .

Для того чтобы показать правомерность критерия (3) для определения границы тени наряду с предположением (1), будем полагать, что вариации границ интервалов в окрестности границы s^* для случая равномерного освещения или равномерного затенения не вносят изменений в значения средних:

$$\frac{1}{s^1} \sum_{i=1}^{s^1} \hat{L}_k(x_i) = \frac{1}{N - s^2} \sum_{i=s^2+1}^N \hat{L}_k(x_i), \quad (4)$$

$$\frac{1}{s^1} \sum_{i=1}^{s^2} \check{L}_k(x_i) = \frac{1}{N - s^2} \sum_{i=s^2+1}^N \check{L}_k(x_i). \quad (5)$$

Здесь $s^1, s^2 : s^1 \leq s^2$ – любые точки в некоторой окрестности s^* , в т.ч. $s^1 = s^*$, $s^2 = s^*$ или $s^1 = s^2 = s^*$.

Возможность использования показателя контраста (4) для определения точки s^* , являющейся гра-

ницей области тени, опирается на следующее утверждение:

Пусть выполняются предположения (4), (5), а s^* – граничная точка тени.

Тогда показатель контраста (3) в этой точке

$$f(s^*) = \max_{\forall s} f(s). \quad (6)$$

Вначале заметим, что для каждого отсчета $\tilde{L}_k(x_i)$ функции яркости компонента L в затененной области имеет место неравенство

$$\tilde{L}_k(x_i) < \hat{L}_k(x_i). \quad (7)$$

Действительно, согласно [8] компонент L на освещенном изображении

$$L_0 \sim kf \left(\int_{\Lambda} S_0(\lambda) y(\lambda) R(\lambda) d\lambda \right).$$

Здесь $R(\lambda)$ – спектр образца, $S_0(\lambda)$ – спектральный состав излучения от источника освещения, $y(\lambda)$ – известная функция чувствительности человеческого зрения, Λ – интервал длин волн оптического диапазона, k – некоторая положительная постоянная, f – возрастающая функция.

Затенение любой природы уменьшает интенсивность освещения по всему спектру, т.е.:

$$S(\lambda) < \alpha S_0(\lambda), \lambda \in \Lambda,$$

где $S(\lambda)$ – спектр освещения в затененной области, $0 < \alpha < 1$. Тогда для L компоненты в затененной области:

$$\begin{aligned} \tilde{L} &< kf \left(\int_{\Lambda} \alpha S_0(\lambda) y(\lambda) R(\lambda) d\lambda \right) = \\ &= \alpha kf \left(\int_{\Lambda} S_0(\lambda) y(\lambda) R(\lambda) d\lambda \right) = \alpha \hat{L}, \end{aligned}$$

откуда следует (7). С использованием неравенства (7) легко показать, что

$$f(s^*) > f(s^1), \quad (8)$$

$$f(s^*) > f(s^2). \quad (9)$$

Неравенство (8) следует из того, что в соответствии с (4), (5)

$$\frac{1}{s^*} \sum_{i=1}^{s^*} \tilde{L}_k(x_i) = \frac{1}{s^1} \sum_{i=1}^{s^1} \tilde{L}_k(x_i),$$

но

$$\begin{aligned} \frac{1}{N-s^*} \sum_{i=s^*+1}^N \hat{L}_k(x_i) &> \frac{1}{N-s^1} \sum_{i=s^1+1}^N L_k(x_i) = \\ &= \frac{1}{N-s^1} \left\{ \sum_{i=s^1+1}^{s^*} \tilde{L}_k(x_i) + \sum_{i=s^*+1}^N \hat{L}_k(x_i) \right\}. \end{aligned}$$

Аналогично неравенство (9) вытекает из соответствующих предположениям (4), (5) свойств:

$$\begin{aligned} \frac{1}{s^*} \sum_{i=1}^{s^*} \tilde{L}_k(x_i) &= \frac{1}{s^1} \sum_{i=1}^{s^1} \tilde{L}_k(x_i), \\ \frac{1}{N-s^*} \sum_{i=s^*+1}^N \hat{L}_k(x_i) &> \frac{1}{N-s^2} \sum_{i=s^2+1}^N L_k(x_i) = \\ &= \frac{1}{N-s^2} \left\{ \sum_{i=s^2+1}^{s^*} \tilde{L}_k(x_i) + \sum_{i=s^*+1}^N \hat{L}_k(x_i) \right\}. \end{aligned}$$

Из (8), (9) в силу неравенства $s^1 \leq s^2$ следует утверждение (6). Поскольку s^1, s^2 – произвольные точки в окрестности s^* , это доказывает также единственность экстремума в точке s^* .

Достаточность существования границы тени в точке s^* , где имеет место максимум функции контраста:

$$f(s^*) = \frac{1}{N-s^*} \sum_{i=s^*+1}^N L_k(x_i) - \frac{1}{s^*} \sum_{i=1}^{s^*} L_k(x_i) = d,$$

легко доказывается от противного. Действительно, предположим: несмотря на то, что максимум функции контраста имеет место в точке s^* , граница тени находится в другой точке, например, s^1 . Но тогда, в силу доказанного выше утверждения, в точке s^1 должен достигаться максимум функции контраста:

$$f(s^1) = \max_{\forall s} f(s),$$

что противоречит единственности экстремума в точке s^* , а следовательно, доказывает невозможность других точек в качестве границы тени.

Таким образом, для того чтобы точка s^* была границей области тени в k -й строке, достаточно, чтобы в этой точке функция контраста (3) была отличной от нуля и принимала в этой строке максимальное значение. Следовательно, для поиска границы области тени необходимо вычислить значения функции контраста (3) во всех точках строки, выбрать точку, в которой она оказалась максимальной и убедиться в том, что контраст в этой точке достаточно заметный. Дополнительным признаком наличия тени может служить близость значений параметра контраста в соседних строках.

Подчеркнем еще раз, что в действительности предположения (1), (4) и (5) выполняются неточно. Однако различия в значениях средних на интервалах обычно существенно меньше контраста, вносимого затенением. Поэтому описанная процедура оказывается работоспособной в широком диапазоне интенсивностей затенения.

Если значения $L_k(x)$ искажены (в особенности импульсным) шумом, могут иметь место ошибки определения границ тени в разных строках. Для обеспечения гладкости границ области тени при переходе от $y = y_{k-1}$ к $y = y_k$ на точки переходной области можно наложить дополнительное условие:

$$|x_k - x_{k-1}| < \Delta_{dist}. \quad (10)$$

Здесь x_{k-1} – точка, принадлежащая средней линии переходной области при значении $y = y_{k-1}$, Δ_{dist} – величина, определяющая максимальный допустимый скачок. Если задана начальная точка средней линии переходной области $(x_0, y_0) \in G$, то последовательное применение соотношения (10) позволяет определить достаточно гладкую среднюю линию переходной области тени (множество G).

Отметим также, что влияние импульсного шума и многочисленных контрастных изобразительных элементов на качество определения границы тени можно уменьшить, применив медианный фильтр с достаточно широким окном. Ширина окна должна удовлетворять неравенству:

$$\min(S_S, S_L) > \frac{S_W}{2} > \max(S_E), \quad (11)$$

где S_W – ширина окна медианного фильтра, S_S и S_L – ширина соответственно освещенной и затененной частей изображения, S_E – ширина изобразительного элемента.

3. Определение границ переходной области

При проведении коррекции в переходной области (размытия) тени необходимо учитывать тот факт, что ширина этой области изменяется на разных участках изображения. Связано это с изменением расстояния между различными участками рамки и источником света. В частности, на краях рамки, более удаленных от источника света, граница тени удаляется от оси ou , а переходная область становится более широкой. В настоящем разделе рассматривается процедура определения границ переходной области, учитывающая указанные особенности. Исходной для нее является средняя линия границы тени, метод определения которой описан в предыдущем разделе.

Идея метода состоит в аппроксимации функции яркости в переходной области заданной монотонно возрастающей функцией. Фактические функции яркости могут существенным образом различаться вследствие наложения тени на различные изобразительные элементы в строках. Поэтому аппроксимация осуществляется по некоторой усредненной функции яркости, полученной путем сложения функций яркости нескольких, подряд идущих строк.

Для этого отсчеты функций яркости в строках берутся таким образом, чтобы отсчеты каждой строки, принадлежащие средней линии границы тени, совпадали. Среднее значение отсчетов яркости, принадлежащих средней линии границы тени, в локальном подмножестве строк обозначим $w(0)$. Среднее значение отсчетов яркости на расстоянии одного пикселя в сторону отрицательных значений оси ox обозначим $w(-1)$, а в сторону положительных значений оси ox – $w(1)$ и т.д.

Далее значения функции яркости всех строк, присвоенные номера которых одинаковы, усредняются. В результате формируется множество отсчетов усредненной на локальном множестве строк функции яркости переходной области (рис. 1):

$$w(-n), \dots, w(-1), w(0), w(1), \dots, w(n), \quad (12)$$

где n выбирается таким образом, что $S_{\max} < 2n + 1 \leq \min D$, где S_{\max} – максимально возможная длина переходной области на множестве всех строк выделенного подмножества, D – расстояние от точки тени до ближайшей границы изображения.

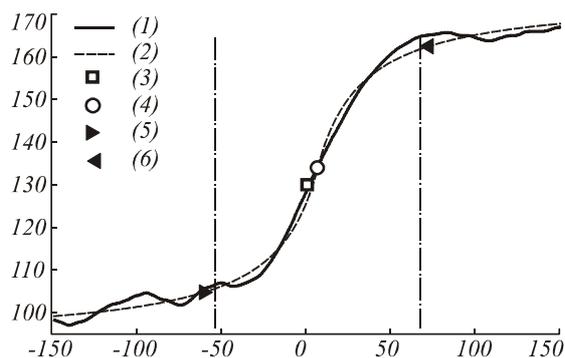


Рис.1. Определение границ переходной области: (1) – исходная функция, (2) – аппроксимирующая функция, (3) – точка линии тени, (4) – уточненная точка линии тени, (4-5) – границы переходной области

Для определения границ переходной области в выделенной локальной области строк решается задача аппроксимации указанного множества отсчетов (12) функцией вида

$$w(x) = \frac{b(x-c)}{1+a|x-c|} + d. \quad (13)$$

Параметры c и d вводятся для оценки смещения средней линии границы тени в локальном подмножестве строк. Это смещение обычно имеет место вследствие различной яркости изобразительных элементов в освещенной и затененной областях.

Оценки параметров a, b, c, d для каждой средней строки локального подмножества строк строятся с использованием метода наименьших модулей. В качестве начального приближения используются значения:

$$a = 1, b = 1, c = 0,$$

$$d = \frac{1}{2}(\max(w(i)) - \min(w(i))).$$

Для построения оценок в следующей строке из локального подмножества исключается последняя и добавляется новая строка. В качестве начального приближения для последующих строк используются оценки параметров, полученные на предыдущем шаге.

В результате для каждой строки (за исключением нескольких первых и последних) имеем набор

оценок параметров функции (13). С использованием этих оценок в каждой строке формируется уточненная средняя функция яркости. В частности, уточняется положение точки, принадлежащей средней линии границы тени, и соответствующие сдвинутым точкам значения аппроксимированной функции яркости:

$$x^*(i) = x(i) - c, w^*(i) = w(i) - d, i = 0, \pm 1, \dots, \pm n.$$

По уточненной аппроксимированной функции яркости переходной области для каждой средней строки локального множества строк граничные значения переходной области определяются по соотношению:

$$x_{bor} = x_0^* \pm \frac{b(1 - \Delta_{bor})}{a\Delta_{bor}}, \quad (14)$$

где x_0^* – уточненная координата точки, принадлежащей средней линии границы тени, $\Delta_{bor} = \Delta w(x) / w_{\max}(x)$, а $\Delta w(x)$ – заданное допустимое отклонение функции яркости от максимального значения аппроксимирующей кривой в граничной точке переходной области.

Таким образом, реализация описанной процедуры определения границ переходной области одновременно обеспечивает также уточнение средней линии границы тени. Если в результате специфического рельефа рамки и характеристик осветителей средняя линия оказывается недостаточно гладкой, осуществляется ее сглаживание одномерным медианным фильтром.

Кроме того, в каждой строке в окрестности уточненной точки, принадлежащей средней линии границы тени, имеем набор значений аппроксимированной функции яркости

$$w^*(-n), \dots, w^*(-1), w^*(0), w^*(1), \dots, w^*(n), \quad (15)$$

которые, по существу, являются весовыми коэффициентами, характеризующими изменение интенсивности затенения в направлении оси ox .

4. Алгоритм цветовой коррекции

Алгоритмы цветовой коррекции теневых искажений для равномерно затененной и переходной областей строятся различным образом. При решении задачи в цветовом пространстве Lab только один (яркостный компонент – L) «отвечает» за тень. Поэтому кажется естественным для корректировки тени воспользоваться популярным методом приведения яркости черно-белых полутоновых изображений к некоторому заданному виду – преобразование гистограмм [11].

В данном случае гистограммы функции яркости должны строиться для равномерно затененной и освещенной области, примыкающей к границе тени. Далее строится поэлементное преобразование отсчетов в затененной области, приводящее гистограмму, построенную для этой области, к виду гистограммы в освещенной области. Для этого мини-

мируется заданный критерий близости огибающих указанных гистограмм. Преобразование применяется ко всем элементам изображения из области затенения.

В проведенных испытаниях метода преобразования гистограмм на тестовых и реальных изображениях проявился основной недостаток данного подхода: возникновение эффекта постеризации (различные, но близкие по значению значения яркости в результате преобразования «сливаются»). В настоящей работе развивается подход, впервые предложенный в работе [12], основанный на решении задачи идентификации формальной модели цветового преобразования. Рассмотрим особенности его применения в данном случае.

Обозначим координаты двух точек, выбранных из затененной и освещенной областей изображения соответственно (x_i^l, y_i^l) и (x_i^r, y_i^r) . При отсутствии затенения и одинаковом освещении полотна эти точки по предположению имеют близкие цвета:

$$L^*(x_i^l, y_i^l) \approx L(x_i^r, y_i^r). \quad (16)$$

Далее точки, удовлетворяющие условию (16), будем называть соответственными. Ясно, что на искаженном тенью изображении

$$L(x_i^l, y_i^l) < L(x_i^r, y_i^r).$$

Введем в рассмотрение функцию преобразования $\Psi[*]$, устанавливающую связь между значениями яркости соответственных точек:

$$L(x_i^l, y_i^l) = \Psi[L(x_i^r, y_i^r)]. \quad (17)$$

Проведя регистрацию значений яркости для N пар соответственных точек из затененной и освещенной областей, на основании (17) можно записать матричное соотношение:

$$\mathbf{L}_L = \mathbf{L}_R^* \Psi + \xi, \quad (18)$$

где

$$\mathbf{L}_R^* = \begin{bmatrix} L_R^3(y_1) & L_R^2(y_1) & L_R(y_1) & 1 \\ L_R^3(y_2) & L_R^2(y_2) & L_R(y_2) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_R^3(y_N) & L_R^2(y_N) & L_R(y_N) & 1 \end{bmatrix},$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} \Psi_3 \\ \Psi_2 \\ \Psi_1 \\ \Psi_0 \end{bmatrix}, \xi = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \vdots \\ \xi_N \end{bmatrix}, \mathbf{L}_L = \begin{bmatrix} L_L(y_1) \\ L_L(y_2) \\ \vdots \\ L_L(y_N) \end{bmatrix}.$$

Компоненты вектора \mathbf{L}_L формируются из отсчетов значений яркости в соответственных точках освещенной области. Матрица \mathbf{L}_R^* составлена в предположении, что функция преобразования (17) является полиномом третьей степени. Компонентами вектора ξ являются ошибки регистрации функции яркости, аппроксимации модели и др.

Искомые оценки параметров модели преобразования могут быть найдены с использованием метода наименьших квадратов:

$$\mathbf{C} = [\mathbf{L}_r^{*T} \mathbf{L}_r^*]^{-1} \mathbf{L}_r^{*T} \mathbf{L}_1$$

или другим способом (например, с использованием метода наименьших модулей).

Далее с использованием полученной оценки вектора параметров \mathbf{C} в силу функции преобразования (19) осуществляется поэлементное преобразование отсчетов из затененной области по соотношению

$$L(x_i, y_i) = \mathbf{C}_3 L_R^3(x_i, y_i) + \mathbf{C}_2 L_R^2(x_i, y_i) + \mathbf{C}_1 L_R(x_i, y_i) + \mathbf{C}_0 \quad (19)$$

Порядок модели (19) может понижаться, если оценки коэффициентов при старших степенях полинома оказываются относительно малыми.

В переходной области тени модель поэлементного преобразования должна изменяться при переходе к каждой следующей точке в направлении оси ox . Для учета уменьшения значений функции яркости при переходе от затененной области к освещенной используется набор весовых коэффициентов (15), полученных в результате аппроксимации функции яркости на локальном подмножестве строк.

Поэлементное преобразование отсчетов в каждой строке переходной области осуществляется по правилу:

$$L_i^*(x_i) = L_k(x_i) + w(i) \cdot \tilde{\Delta}_L, \quad (20)$$

$$\tilde{\Delta}_L = \Psi[L_k(x_i)] - L_k(x_i),$$

где $\Psi[L_k(x_i)]$ – преобразование для k -й строки, построенное в соответствии с (16) – (19), а x_i – координаты ближайшей затененной точки из равномерно затененной области, находящейся в одной строке с корректируемой точкой.

6. Результаты экспериментов

В качестве тестовых изображений были использованы цифровые фотографии высокого разрешения реальных живописных полотен с сюжетами «закат» и «роща». Размеры обрабатываемых изображений 554×3558 и 145×3933 пикселей. Формат изображений – *TIFF*, цветовое пространство – *Lab* (8 бит на канал). На рисунках 2а и 3а приведены увеличенные фрагменты двух исходных изображений с областью тени.

Изображение «закат» является более сложным, с точки зрения определения границ затененной области. Основная трудность состоит в больших размерах переходной области (до 120 пикселей). Кроме того, ширина этой области изменяется в широких пределах в зависимости от значения координаты y .

Изображение «роща» имеет довольно четкую границу области тени, обусловленную малыми размерами переходной области, притом граница прак-

тически прямолинейна. Оба изображения имеют большое количество контрастных элементов, обладают широким диапазоном изменения яркости в канале L . Кроме того, оба изображения зашумлены. Эти особенности существенно затрудняют идентификацию весовой функции (15) в переходных областях.

Значения параметров алгоритмов определения границ тени и цветовой коррекции, использованные при проведении экспериментов, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры и ссылка в тексте	«закат»	«роща»
Заданная зона поиска Δ_{dist} , (10)	30	5
Ширина окна фильтра S_w , (11)	15	5
Длина весовой функции n , (12)	150	30
Граница переходной области Δ_{bor} , (14)	0,1	0,1

Средние значения в переходной области тени для изображений «закат» и «роща» на рисунках 2а, 3а показаны светлой линией. Конечный результат устранения теневого искажения представлен на рисунках 2б, 3б.

Заключение

Разработанная информационная технология цветовой коррекции теневого искажения допускает высокую степень автоматизации. Ее программная реализация позволит существенно сократить временные затраты на подготовку цветных изображений к печати. Информационная технология наряду с подготовкой репродукций произведений живописи может использоваться также для обработки предназначенных для печати участков изображений, полученных в системах аэрокосмического мониторинга Земли, а также для предоставления широкому кругу пользователей услуг по улучшению качества цифровых изображений.

Этапы разработанной технологии обладают различной степенью внутреннего параллелизма и вычислительной сложностью. Учет этих факторов при построении программного комплекса, в частности, реализация алгоритмов обработки изображений на GPU, по-видимому, позволит повысить его эффективность.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование», РФФИ (проект № 09-07-00269-а) и Федерального агентства по образованию (ГК П2234).

Литература

1. **Cheng, L.** Removing shadows from color images / L. Cheng // PhD Thesis – Simon Fraser University, 2006. – 155 p.
2. **Weiss, Y.** Deriving intrinsic images from image sequences / Y. Weiss // ICCV01 – IEEE, 2001. – V. II – P. 68-75.
3. **McCamy, C.S.** A color-rendition chart / C.S. McCamy, H. Marcus, J.G. Davidson // J. App. Photog. in Eng. – 1976. – V.2 – P. 95-99.

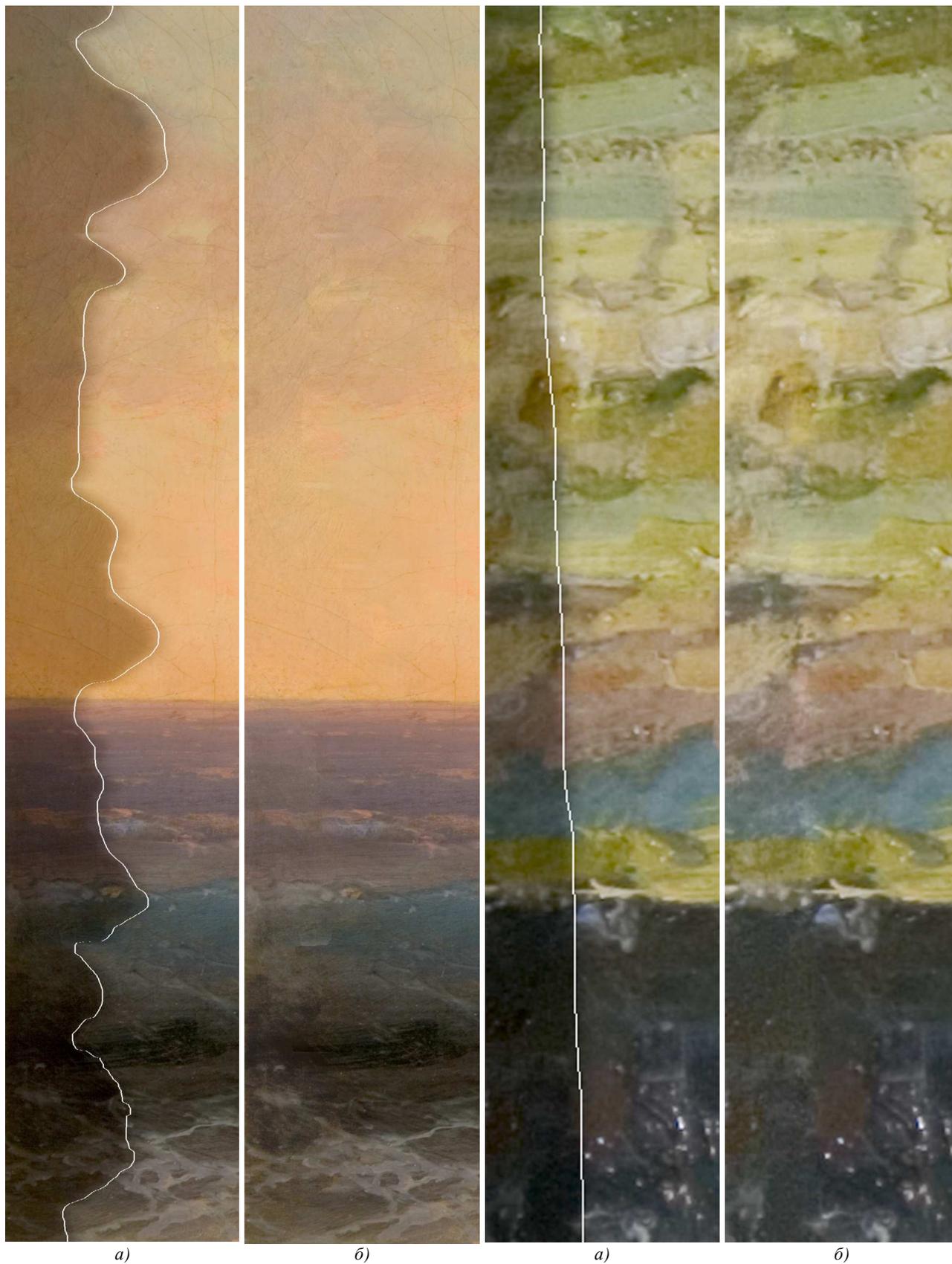


Рис. 2. Пример цветовой коррекции изображения с криволинейной границей полосы тени и участком медленно меняющегося цвета: а) исходное изображение с найденной линией тени; б) изображение после коррекции

Рис. 3. Пример цветовой коррекции тени на изображении с быстро меняющимися цветами: а) исходное изображение с найденной линией тени; б) изображение после коррекции

4. **Gevers, T.** Color-based object recognition / T. Gevers, A.W.M. Smeulders // *Patt.Rec.* – 1999. – V.32 – P.453-464.
5. **Gavrilov, A.V.** Parallel algorithm of data selection using relative conforming estimate criterion / A. V. Gavrilov, V. A. Fursov // *Proc. of The 12th ISPE International Conference on Concurrent Engineering: Research and Applications, Ft. Worth/Dallas, USA, 25 - 29 July, 2005.* – 2005. – P. 375-380.
6. **Nikonorov, A.** Conformity estimation in color lookup tables preprocessing problem / A. Nikonorov, V. Fursov // *Proc. of The 7th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologi-*gis, St.Peterburg, 2004, 18-23 October, Russian Federation. – 2004. – V.I. – P. 213-216.
7. **Nikonorov, A.** Constructing the conforming estimates of non linear parameters / A. Nikonorov, V. Fursov // *Proc. of The 4th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, 24-28, July, 2004, Jyvaskyla, Finland.* – 2004. – P. 404-429.
8. **Джадд, Д.** Цвет в науке и технике / Д. Джадд, Г. Вышецки. – М.: Мир, 1978. – 580 с.
9. **Мурашев, Д.М.** Метод автоматизированной сегментации изображений цитологических препаратов на основе модели активного контура / Д.М. Мурашев // *Труды МФТИ.* – М.: 2009. – Т.1, №1. – С. 80-89.
10. **Kass, M.** Snakes: Active contour models / M. Kass, A. Witkin, D. Terzopoulos // *Int. J. Computer vision.* – 1987. – N.1. – P. 321-331.
11. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В.А. Сойфера – М.: Физматлит, 2003. – 784 с.
12. **Бибиков, С.А.** Цветовая коррекция на основе идентификации моделей по тестовым фрагментам изображений / С.А. Бибиков, В.А. Фурсов // *Компьютерная оптика.* – Самара-Москва, 2008. – Т.32, №3. – С. 302-307.
2. **Weiss, Y.** Deriving intrinsic images from image sequences / Y. Weiss // *ICCV01 – IEEE, 2001.* – V.II – P. 68-75.
3. **McCamy, C.S.** A color-rendition chart / C.S. McCamy, H. Marcus, J.G. Davidson // *J. App. Photog. in Eng.* – 1976. – V.2 – P. 95-99.
4. **Gevers, T.** Color-based object recognition / T. Gevers, A.W.M. Smeulders // *Patt.Rec.* – 1999. – V.32 – P. 453-464.
5. **Gavrilov, A.V.** Parallel algorithm of data selection using relative conforming estimate criterion / A. V. Gavrilov, V. A. Fursov // *Proc. of The 12th ISPE International Conference on Concurrent Engineering: Research and Applications, Ft. Worth/Dallas, USA, 25 - 29 July, 2005.* – 2005. – P. 375-380.
6. **Nikonorov, A.** Conformity estimation in color lookup tables preprocessing problem / A. Nikonorov, V. Fursov // *Proc. of 7th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologi-*gis, St.Peterburg, 2004, 18-23 October, Russian Federation. – 2004. – V.I. – P. 213-216.
7. **Nikonorov, A.** Constructing the conforming estimates of non linear parameters / A. Nikonorov, V. Fursov // *Proc. of The 4th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, 24-28, July, 2004, Jyvaskyla, Finland.* – 2004. – P. 404-429.
8. **Judd, D.** Color in business, science, and industry / Dean Judd, Gunter Wyszecki. – New York: Wiley, 1975. – 553 p.
9. **Murashev, D.M.** Automated cytological specimen image segmentation technique based on the active contour model / D.M. Murashev // *Proc. of Moscow Institute of Physics and Technology (State University).* – Moscow, 2009. – V.1, - N.1. -P. 80-89. – (in Russian).
10. **Kass, M.** Snakes: Active contour models / M. Kass, A. Witkin, D. Terzopoulos // *Int. J. Computer vision.* – N.1. – 1987. – P. 321-331.
11. *Computer Image Processing* / Ed. V.A. Soifer – Lightning Source Inc, 2009. – 296 p.
12. **Bibikov, S.A.** Color correction based on models identification using test image patches / S.A. Bibikov, V.A. Fursov // *Computer optics.* – Samara-Moscow, 2008. – Т.32, №3. – P. 302-307. – (in Russian).

References

CORRECTION OF SHADOW ARTIFACTS ON COLORFUL DIGITAL IMAGES

*Sergei Alekseevich Bibikov*¹ (post-graduate student, e-mail: bibikov.sergei@gmail.com),

*Artyom Vladimirovich Nikonorov*¹ (assistant, admin@mcck.com),

*Vladimir Alekseevich Fursov*² (leading researcher, e-mail: fursov@smr.ru)

¹ Samara State Aerospace University,

² Image Processing Systems Institute of the RAS

Abstract

This paper proposes information technology of shadow artifacts removing on colorful digital images of paintings. Shadow artifacts are caused by difference of picture lighting. Shadow edge detection and color correction problems are solved. Results of real images enhancement are presented.

Key words: image enhancement (processing), shadow distortion, color correction, identification.

Поступила в редакцию 13.01.2010 г.