

ЦВЕТОВАЯ КОРРЕКЦИЯ НА ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ ПО ТЕСТОВЫМ ФРАГМЕНТАМ ИЗОБРАЖЕНИЙ

С.А. Бибиков¹, В.А. Фурсов¹

¹Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия

Аннотация

В работе рассмотрена технология коррекции цифровых изображений, обладающих не-удовлетворительной цветовой гаммой, на основе идентификации модели коррекции цвета по небольшому количеству специально формируемых тестовых фрагментов.

Ключевые слова: цветовая коррекция, идентификация, корректирующие кривые.

Введение

С ростом числа приборов, в которых цифровое фотографирование является встроенной функцией, растет также потребность в создании (встроенного) программного обеспечения, осуществляющего цветовую коррекцию изображений [1,2]. Связано это как с недостаточно хорошими характеристиками оптических устройств (например, в некоторых аппаратах мобильной связи), так и с плохими условиями регистрации изображений.

Последнее обстоятельство является наиболее важным фактором. Иногда удается зафиксировать уникальный сюжет, который нельзя повторить. Если при этом допущены некоторые отклонения от оптимального режима регистрации, связанные со спешкой, либо условия регистрации (надвигающиеся сумерки) не позволяли осуществить такую настройку, цветовая палитра кадра может оказаться невыразительной, с ненасыщенными цветами.

В настоящей работе рассматривается технология коррекции неудовлетворительных цветных изображений на основе идентификации модели коррекции цвета по искусственно формируемым тестовым фрагментам.

1. Формулировка задачи идентификации модели цветовой коррекции

Известно, что цвет – субъективная характеристика излучения, зависящая от множества факторов, в том числе от психофизических особенностей человеческого зрения [3]. Поэтому при решении задачи цветовой коррекции часто приходится ориентироваться на восприятие конкретного человека, его желание видеть определенные объекты в привычных для него цветах.

Исходя из этой концепции, разумной представляется технология цветовой коррекции, одним из этапов которой является задание желаемых цветов на обрабатываемом изображении. Конечно, всегда желательно, чтобы число и размеры таких участков были невелики. Во-первых, потому, что «ручная» цветовая коррекция всего изображения потребует больших усилий, во-вторых, на изображении может быть много участков, относительно цвета которых ничего определенного сказать нельзя.

В данном случае предлагается технология цветовой коррекции, в которой пользователь выбирает некоторую небольшую совокупность малых фрагментов, цвет которых ему известен (например, участки лица, листья цветов, участки знакомой одежды и др.). Эти фрагменты «заливаются» желаемым цветом. Далее, используя эти тестовые фрагменты и соответствующие им фрагменты на исходном изображении, решается задача идентификации модели цветовой коррекции.

Сформулируем задачу идентификации модели цветовой коррекции для наиболее широко используемого в современных цифровых устройствах RGB-представления цветных изображений. Будем строить модель цветовой коррекции изображений в цветовом пространстве RGB в виде соотношений, реализующих покомпонентные преобразования вида:

$$\begin{cases} R^* = f_r(R) = a_r R^3 + b_r R^2 + c_r R + d_r, \\ G^* = f_g(G) = a_g G^3 + b_g G^2 + c_g G + d_g, \\ B^* = f_b(B) = a_b B^3 + b_b B^2 + c_b B + d_b, \end{cases} \quad (1)$$

где R, G, B – координаты цвета фрагментов на исходном изображении, R^*, G^*, B^* – «желаемые» координаты цвета на тех же фрагментах, а $a_r, a_g, \dots, d_g, d_b$ – пока неизвестные коэффициенты, которые должны быть определены в результате решения задачи идентификации.

Поскольку все три соотношения в (1) независимы и имеют одинаковый вид, для дальнейшего рассмотрения удобно ввести общие обозначения: x – для цветовой координаты исходного изображения и y – для цветовой координаты желаемого изображения (фрагмента изображения). При этом модель цветовой коррекции для произвольной цветовой координаты можно представить в виде

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d. \quad (2)$$

Пусть теперь каким-либо образом выбраны и «залиты» желаемым цветом N тестовых фрагментов. В силу модели (2) можно записать совокупность N соотношений вида:

$$y_i = a_i x_i^3 + b_i x_i^2 + c_i x_i + d_i + \xi_i \quad (i = \overline{1, N}), \quad (3)$$

где y_i – цветовая координата (R, G или B) на i -м фрагменте, «залитом» желаемым цветом; x_i – та же цветовая координата на соответствующем фрагменте исходного изображения, а ξ_i – ошибки, связанные, в первую очередь, с неточным заданием желаемых цветов, субъективностью восприятия цветов, а также ошибки аппроксимации, ошибки, связанные с неточностью самой модели и т.д.

В предположении неизменности a, b, c, d модели (3) во всем цветовом пространстве совокупность $N > 4$ соотношений (3) можно записать в виде переопределенной линейной системы в матричном виде:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}^T \mathbf{c} + \boldsymbol{\xi}, \quad (4)$$

где

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix}, \mathbf{X}^T = \begin{bmatrix} x_1^3 & x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^3 & x_2^2 & x_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N^3 & x_N^2 & x_N & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix}, \boldsymbol{\xi} = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \vdots \\ \xi_N \end{bmatrix}.$$

Задача идентификации модели цветовой коррекции (2) заключается в определении вектора параметров \mathbf{c} по сформированным на выбранных фрагментах изображений $N \times 4$ -матрице \mathbf{X} и $N \times 1$ -вектору \mathbf{Y} . Напомним, что вектор \mathbf{Y} формируется по желаемым значениям корректируемого цветового компонента на N тестовых фрагментах, а матрица \mathbf{X} – по фактическим значениям цветового компонента на тех же фрагментах исходного изображения.

Заметим, что предположение о том, что компоненты вектора \mathbf{c} (параметры a, b, c, d) остаются одинаковыми во всех точках цветового пространства в рамках рассматриваемой упрощенной модели может рассматриваться как приближенное. Поэтому компоненты ξ_i вектора ошибок $\boldsymbol{\xi}$ содержат дополнительные ошибки наряду с теми, о которых говорилось в (3). Для уменьшения этих ошибок идентификацию модели цветовой коррекции каждой компоненты целесообразно проводить по точкам, в которых цветовая компонента, соответствующая этой координате, является преобладающей.

Другая проблема связана с тем, что число используемых точек (фрагментов) невелико. Если при этом желаемые цвета отдельных тестовых фрагментов (вследствие субъективности оценок) заданы с большой ошибкой, то широко используемый для решения задачи идентификации метод наименьших квадратов также приведет к большим ошибкам в оценках параметров. Далее рассматривается процедура решения задачи, устойчивая к аномальным ошибкам в исходных данных.

2. Процедура определения параметров модели

Известно, что более устойчивыми к грубым ошибкам типа сбоев являются так называемые L_v -оценки. Для $v=1$ L_v -оценка является оценкой максимального правдоподобия для распределения Лапласа [4]:

$$p(\xi) = A \cdot \exp(-\sigma|\xi|). \quad (5)$$

Если ошибки ξ_i независимы и одинаково распределены с плотностью (5), ищется

$$\hat{\mathbf{c}}: Q(\hat{\mathbf{c}}) = \min_{\forall \mathbf{c}} Q(\mathbf{c}) = \min_{\forall \mathbf{c}} \sum_{i=1}^N |\xi_i|. \quad (6)$$

В (6) существует единственный минимум, для нахождения которого можно использовать так называемый «итеративный» МНК [4,5]. Для его построения сумму (6) перепишем в виде

$$Q(\mathbf{c}) = \sum_{i=1}^N |\xi_i| = \sum_{i=1}^N |\xi_i|^{-1} \cdot \xi_i^2 = \sum_{i=1}^N g(\xi_i) \cdot \xi_i^2. \quad (7)$$

Нетрудно заметить, что критерий (6) принял вид взвешенного МНК [6]. Поскольку весовые коэффициенты зависят от ошибок ξ_i , вычисление искомых оценок может быть реализовано путем попеременного вычисления самих оценок

$$\hat{\mathbf{c}}_K = \left[\mathbf{X}^T \mathbf{G}_K^2 \mathbf{X} \right]^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{G}_K^2 \mathbf{Y} \quad (8)$$

и весовой матрицы коэффициентов:

$$\mathbf{G}_K = \text{diag} \left(g(\xi_1), \dots, g(\xi_i), \dots, g(\xi_N) \right), \quad (9)$$

где

$$g(\xi_i) = |\xi_i(\hat{\mathbf{c}})|^{-1},$$

$$\sum_{i=1}^N g(\xi_i) = N.$$

Соотношения (8), (9) обеспечивают выполнение необходимых условий минимума (6), если $p(\xi)$ удовлетворяет условиям:

$$\left(-\ln p(\xi) \right)' \cdot \xi^{-1} > 0,$$

$$\lim_{|\xi| \rightarrow \infty} g(\xi) = 0, \quad (10)$$

$$\lim_{|\xi| \rightarrow 0} g(\xi) < \infty.$$

Поскольку плотность (5) не удовлетворяет указанным условиям (10), при вычислении элементов весовой матрицы (9) могут возникнуть проблемы, связанные с делением на малое число. Избежать этого можно путем добавления к ошибкам ξ_i малого числа ε_0 :

$$\varepsilon_0 = \mu \bar{\xi},$$

где $\bar{\xi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{\xi}_i|$, а $\mu \ll 1$ (обычно достаточно 0,01).

Другой способ связан с модификацией [7] критерия (7):

$$Q(\varepsilon) = \sum_{i=1}^N |\xi_i| = \sum_{i=1}^q \xi_i^2 + \sum_{i=q+1}^N g(\xi_i) \cdot \xi_i^2, \quad (11)$$

где q – число первых (малых) членов вариационно-го ряда

$$|\xi_1| < \dots < |\xi_{q-1}| < |\xi_q| < |\xi_{q+1}| < \dots < |\xi_N|. \quad (12)$$

Число q выбирается таким, чтобы выполнялось неравенство $|\xi_q| < \varepsilon_0$, где ε_0 может быть задано так же, как показано выше. Для вычисления оценок, удовлетворяющих критерию (11), используется та же вычислительная схема (8), (9). При этом весовые коэффициенты, соответствующие первым q (малым) членам вариационного ряда (12)

$$g(\xi_i) = 1, \quad i = \overline{1, q},$$

$$\sum_{i=1}^q g(\xi_i) = q,$$

и по-прежнему $\sum_{i=1}^N g(\xi_i) = N$.

Вычисляемые по описанной схеме оценки параметров являются МНК-оценками «в центре» и L_1 -оценками на «хвостах» плотности (5).

3. Построение функций преобразования с учетом ограничений

В результате реализации описанной выше процедуры идентификации могут быть получены кривые для преобразования всех трех координат цветового пространства. Однако вычисление с их использованием новых RGB-координат может привести к некорректному преобразованию цветов. Для обеспечения корректности преобразований необходимо выполнение следующих ограничений.

1) каждая кривая преобразования нормированного цветового RGB-пространства должна принадлежать квадрату со стороной равной единице, притом

$$y = 0, \quad \text{при } x = 0, \quad (13)$$

$$y = 1, \quad \text{при } x = 1; \quad (14)$$

2) кривые должны быть неубывающими.

Первое требование обеспечивает реализуемость цветов и корректные преобразования черного и белого цветов. Второе - позволяет избежать «инверсии» цвета, когда более яркая цветовая точка преобразуется в менее яркую.

Выполнение первого требования может быть обеспечено путем решения задачи идентификации модели (2) с «закрепленными» концами, т.е. при условии выполнения ограничений-равенств (13), (14). При этом могут быть исключены два параметра модели (2), например b и c , с использованием подстановки

$$b = 1 - a - c, \quad d = 0,$$

а модель (2) принимает вид

$$\tilde{y}_i = a\tilde{x}_{i2} + c\tilde{x}_{i1},$$

$$\text{где } \tilde{y}_i = y_i - x_i^2, \quad \tilde{x}_{i1} = x_i - x_i^2, \quad \tilde{x}_{i2} = x_i^3 - x_i^2.$$

Легко заметить, что при этом матрица \mathbf{X} в (4) будет иметь размерность $N \times 2$.

Если в результате идентификации указанной модели с ограничениями в точках «белого» и «черного» получается кривая, не удовлетворяющая второму условию, это условие проверяется в области меньшей, чем все цветовое пространство.

Для этого строится вписанный прямоугольник, заданных размеров. Если внутри этого прямоугольника требование 2 выполняется, точки пересечения кривой преобразования со сторонами вписанного прямоугольника, ближайшие к точкам с координатами (0,0) и (1,1), соединяются с этими точками прямыми линиями или квадратичными сплайнами.

Заметим, что если стороны вписанного прямоугольника слишком далеко отстоят от границ нормированного цветового пространства, это может приводить к значительной «потере» цветов и их искажению. Поэтому если применением близкого к квадрату с единичной стороной прямоугольника не удастся обеспечить выполнение требования 2, следует перейти к решению задачи оценивания модели (2) со «свободными» концами, т.е. без учета ограничений (13) и (14). Концы кривой преобразования как и ранее «закрепляются» путем соединения точек (0,0) и (1,1) с точками пересечения со сторонами вписанного прямоугольника.

Если решение задачи идентификации модели (2) со «свободными» концами не удовлетворяет условию 2, то решение ищется в параметрическом семействе моделей меньшего (второго, а затем, возможно, и первого) порядка. Порядок понижается до тех пор, пока не удастся выполнить требование 2 внутри заданного вписанного прямоугольника, достаточно близкого к единичному квадрату.

4. Примеры

Работоспособность предложенного метода цветовой коррекции была проверена на следующих трех примерах:

1. Изображения с известными искажениями цвета, полученные путем формирования тестовых фрагментов с использованием известных цветов неискаженного изображения (Рис. 1).

2. Цветовые искажения изображения не известны, но имеются похожие изображения, с использованием которых могут быть заданы цвета на тестовых фрагментах (Рис. 2).

3. Цветовые искажения не известны, отсутствуют похожие неискаженные изображения, тестовые фрагменты формируются на основании субъективного восприятия цветов пользователем (Рис. 3).

Эксперимент первого типа проводился с целью «верификации» метода. Цветовые искажения моделировались путем линейных поэлементных преобразований изображений:

$$R_{new} = a_1 R + b_1,$$

$$G_{new} = a_2 G + b_2,$$

$$B_{new} = a_3 B + b_3,$$

где R, G, B – координаты элементов исходного изображения, $R_{new}, G_{new}, B_{new}$ – координаты элементов искаженного изображения, a_i, b_j – заданные константы.

На рисунке 1а приведено исходное изображение, а на рисунках 1б, в – изображения, искаженные в соответствии со следующими конкретными соотношениями (для нормированного RGB-пространства):

$R_{new} = R + 30/256$, $G_{new} = G$, $B_{new} = B$ («голубое») и $R_{new} = 0,8 \cdot R + 40/256$, $G_{new} = 1,3 \cdot G$, $B_{new} = B - 30/256$ («красное») соответственно.

На рисунках 1г, д – приведены восстановленные изображения, полученные в результате коррекции с помощью построенных по описанной технологии функций преобразования вида

$$R^* = \begin{cases} -2,73 \cdot R^3 + 2,15 \cdot R^2 + 1,58 \cdot R, & R < 0,47 \\ 0,1 \cdot R + 0,9, & R \geq 0,47 \end{cases}$$

для «голубого» и

$$R^* = \begin{cases} 0,24 \cdot R, & R < 0,2, \\ -1,67 \cdot R^3 + 2,96 \cdot R^2 - 0,29 \cdot R, & R \geq 0,2, \end{cases}$$

$$G^* = 0,73 \cdot G^3 - 0,62 \cdot G^2 + 0,89 \cdot G,$$

$$B^* = -0,27 \cdot B^3 - 0,12 \cdot B^2 + 1,38 \cdot B$$

для «красного». Кривые преобразования для «красного» изображения показаны также на рис. 1е.

На рисунках 2а, б приведены исходное и скорректированное изображения «кот». Для корректировки использовались соотношения:

$$R^* = 0,53 \cdot R^3 - 0,46 \cdot R^2 + 0,93 \cdot R,$$

$$G^* = 1,24 \cdot G^3 - 1,87 \cdot G^2 + 1,63 \cdot G,$$

$$B^* = 1,89 \cdot B^3 - 3,67 \cdot B^2 + 2,78 \cdot B.$$

Для определения этих кривых преобразования использовались тестовые фрагменты, с цветами, «взятыми» с похожего (но другого) изображения, показанного на рисунке 2в.

На рисунках 3а, б приведены искаженное и скорректированное изображения в случае, когда желаемые цвета на тестовых фрагментах задавались при отсутствии похожих изображений, опираясь лишь на субъективное цветовое восприятие.

Заключение

Приведенные примеры реализации описанной технологии иллюстрируют достаточно широкие возможности улучшения цветовой палитры изображения. При этом всегда следует помнить о том, что цвет – субъективная характеристика. Изображение, цветовая гамма которого представляется приятной одному пользователю, другому может показаться совершенно неприемлемой. Мы не утверждаем, что с помощью описанной технологии всегда можно

подобрать «правильные» цвета. Здесь предлагается регулярная автоматизированная технология, предоставляющая пользователю возможность преобразовать практически любое цветное изображение таким образом, чтобы оно доставляло ему большее эстетическое удовольствие.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российско-Американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» и РФФИ (грант № 06-08-01024) и при поддержке программы Президиума РАН П15.

Литература

1. **Моргулис, Д.** Photoshop для профессионалов: Классическое руководство по цветокоррекции / Д. Моргулис; пер. с англ. – М.: Интерсофтмарк. 2003. – 464с.: илл. (D. Morgulis. Professional Photoshop: The Classic Guide to Color Correction / Wiley Publishing, Inc. N.Y., 2002.)
2. **Моргулис, Д.** Photoshop LAB Color: загадка каньона и другие приключения в самом мощном цветовом пространстве / Д. Моргулис – М.: Интелбук, 2006. – 480 с.: илл.
3. **Джадд, Д.** Цвет в науке и технике / Д. Джадд, Г. Вышецки – М.: Мир, 1978. – 580 с.
4. **Демиденко, Е.З.** Линейная и нелинейная регрессия / Е.З. Демиденко – М.: Финансы и статистика, 1981. – 302 с.
5. **Хьюбер, П. Дж.** Робастность в статистике / П. Дж. Хьюбер – М.: Мир, 1984. – 304 с.
6. **Лоусон, Ч.** Численное решение задач метода наименьших квадратов / Ч. Лоусон, Р. Хенсон; пер. с англ. – М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 232 с. (Ch. L. Lawson, R. J. Hanson. Solving Least Squares Problems / Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey)
7. **Фурсов, В.А.** Идентификация моделей систем формирования изображений по малому числу наблюдений / В.А. Фурсов – Научное издание. Самара: ИПО СГАУ, 1998. – 218 с.

а)

б)

в)

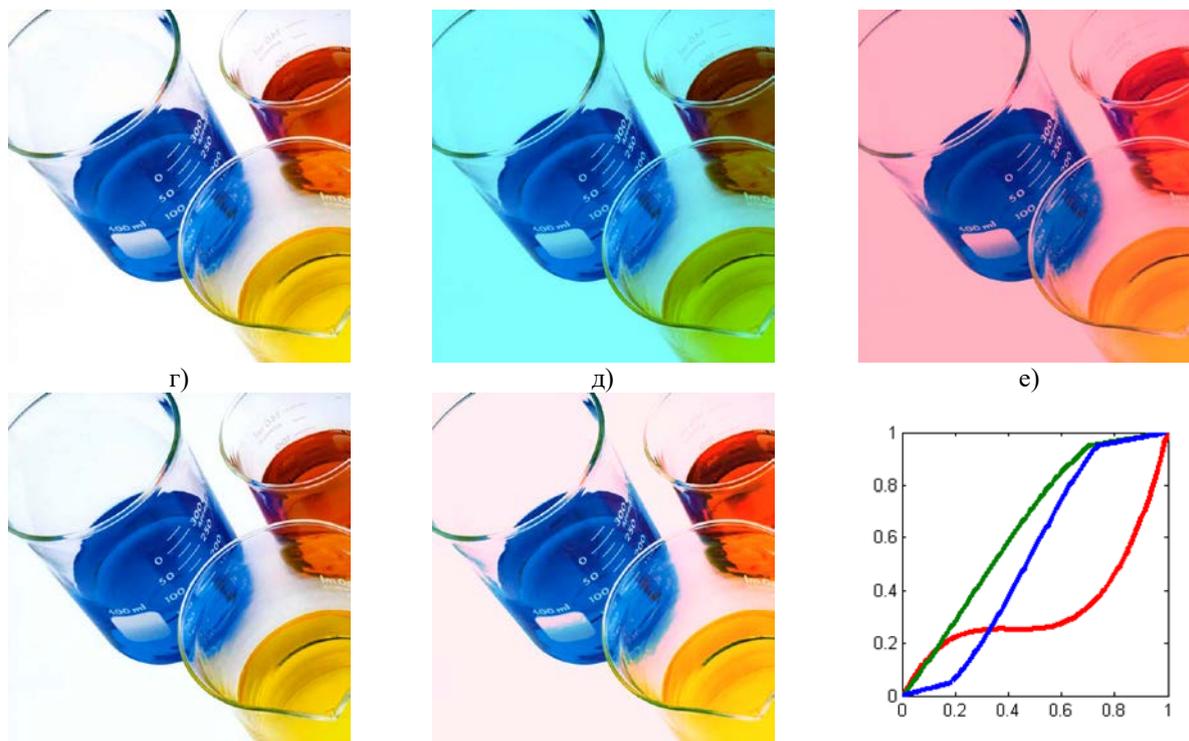


Рис. 1. Исходное изображение (а), искаженные изображения: «голубое» (б) и «красное» (в), результат восстановления «голубого» (д), «красного» (е) и кривые преобразования для «красного» (е) изображения.



Рис. 2. Искаженное изображение «cat» (а), скорректированное изображение «cat» (б), похожее изображение, по которому задавались цвета на тестовых фрагментах (в).

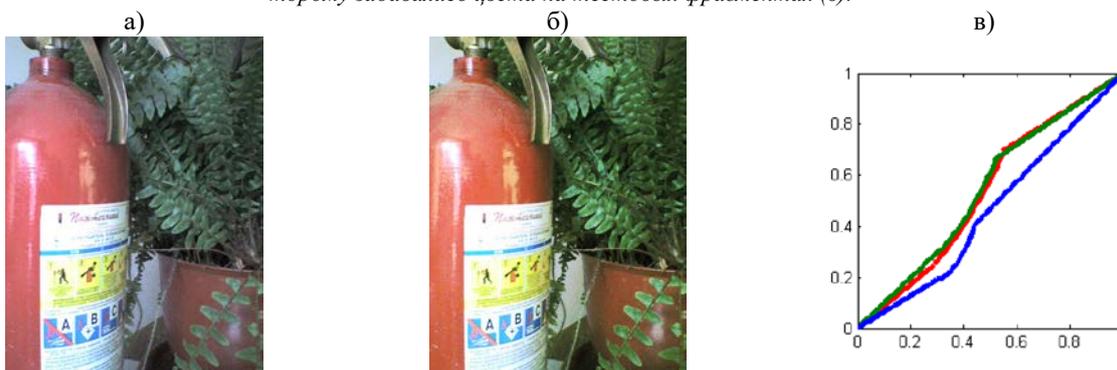


Рис. 3. Исходное (а) и скорректированное (б) изображения при отсутствии похожих изображений; кривые преобразования цветных координат (в).

COLOR CORRECTIONBASED ON MODELS IDENTIFICATION USING TEST IMAGE PATCHES

S.A. Bibikov¹, V.A. Fursov¹

¹Image Processing Systems Institute of the RAS, Samara, Russia

Abstract

This paper proposes a new correction technology for digital images having poor gamut. The technology is based on color correction model identification using small amount of specified test image patches.

Key words: color correction, identification, correction curves.

Citation: Bibikov SA, Fursov VA. Color correctionbased on models identification using test image patches. Computer Optics 2008; 32(3): 302-6.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian-American program "Fundamental researches and higher education" and the RFBR (grant № 06-08-01024) and with the support of Presidium of RAS P15-Bureaux.

References

- [1] Margulis D. Professional Photoshop: The Classic Guide to Color Correction [Russian translation]. Moscow: Intersoftmarkt 2003; 464 p. (D. Margulis. Professional Photoshop: The Classic Guide to Color Correction / Wiley Publishing, Inc. N.Y., 2002.)
- [2] Margulis D. Photoshop LAB Color: The Canyon Conundrum and Other Adventures in the Most Powerful Colorspace [In Russian]. Moscow: Intersoftmarkt 2006; 480 p.
- [3] Judd D, Vyshetsky G. Color in science and technology [In Russian]. Moscow: "Mir" Publisher 1978; 580 p.
- [4] Demidenko EZ. Linear and non-linear regression [In Russian]. Moscow: Finansy i statistika (Finances and Statistics) Publisher 1981; 302 p.
- [5] Huber PJ. Robust statistics [In Russian]. Moscow: "Mir" Publisher 1984; 304 p.
- [6] Lawsen ChL, Hanson RJ. Solving Least Squares Problems [Russian translation]. Moscow: "Nauka" (Science) 1986; 232 p. (Ch. L. Lawsen, R. J. Hanson. Solving Least Squares Problems / Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey).
- [7] Fursov VA. Identification of models of imaging systems for the small number of observations [In Russian]. Samara, SSAU 1998; 218 p.