

УДК 57.087

Сравнительное исследование методов цветовой коррекции изображений для задач цветовой калибровки автоматизированных комплексов микроскопии биомедицинских препаратов

Кравцова Т. А.¹, Добролюбова Д. А.¹,
Самородов А. В.^{1,*}

* avs@bmstu.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрена задача формирования требований и создания калибровочной меры для автоматизированных комплексов микроскопии (АКМ) биомедицинских препаратов с целью обеспечения инвариантности программно-алгоритмического обеспечения АКМ к аппаратной комплектации. Проведены сравнительные исследования 10 методов цветовой коррекции изображений, исследования влияния числа и набора цветовых полей калибровочной меры на качество цветовой коррекции. Определен наилучший из рассмотренных методов цветовой коррекции и сформирован набор из 60-ти цветовых полей, которые должна содержать калибровочная мера. Установлено, что использование в калибровочной мере цветовых полей широко применяемой сейчас меры Kodak Q60-E3 не позволяет достичь значений погрешности восстановления цветовых координат микроскопических изображений ниже предела заметности цветовых различий для глаза человека. Сделан вывод о необходимости разработки специализированной калибровочной меры для АКМ биомедицинских препаратов.

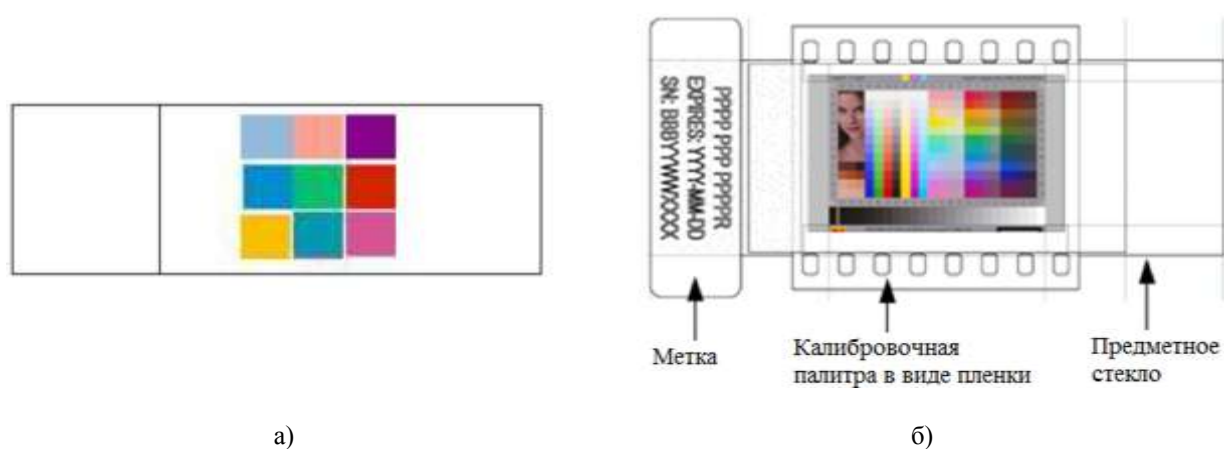
Ключевые слова: цветовая калибровка, цветовая коррекция изображения, оптическая микроскопия, калибровочная мера

Введение

По сравнению с визуальным анализом, обычно применяющимся в клинической практике при микроскопическом исследовании биомедицинских препаратов, автоматизированная регистрация и обработка изображений обеспечивает получение объективных и воспроизводимых результатов. При автоматизации процесса микроскопического исследования существенную роль играют цветояркие характеристики изображений препаратов, значительное влияние на которые оказывают параметры цветопередачи регистрирующей системы автоматизированных комплексов микроскопии (АКМ). В ряде специализированных АКМ проблема цветовых искажений решается путем предъявления специаль-

ных требований к параметрам цифровой камеры или привязкой алгоритмов обработки регистрируемых изображений к определенным моделям цифровой камеры. Вместе с тем, широкое внедрение методов автоматизированной микроскопии предполагает инвариантность алгоритмов обработки микроскопических изображений биомедицинских препаратов к аппаратной комплектации АКМ, которая может быть обеспечена применением цветовой калибровки АКМ с последующей цветовой коррекцией регистрируемых изображений.

В настоящее время для цветовой калибровки цифровых камер широко используется калибровочная мера Macbeth ColorChecker, состоящая из 24 цветowych полей с известными координатами в цветовом пространстве RGB [1]. Данная мера предназначена для регистрации изображения в отраженном свете и не может быть использована для АКМ. В ряде исследований [2, 3] предложены решения для калибровочных мер, работающих на пропускание светового излучения, расположенных на предметном стекле (рисунок 1).



а) макет калибровочной меры из 9 цветowych полей [2]; б) макет калибровочной меры из 264 цветowych полей [3]

Рис. 1. Варианты калибровочных мер для АКМ

На рисунке 1а показан макет калибровочной меры, состоящей из 9 цветowych полей, предложенной в работе [2]. Недостатком такого решения является малое количество цветowych полей, приводящее к невозможности использования методов цветовой коррекции с большим количеством коэффициентов в уравнениях для коррекции каналов в выбранном цветовом пространстве.

Для калибровки сканирующих систем часто используются калибровочные меры на фотопленках, выпускаемые несколькими производителями и имеющие большое количество цветowych полей (от 252 до 288). Данные меры имеют разные размеры, и не все из них могут быть использованы для калибровки АКМ. На рисунке 1б показан макет калибровочной меры, предложенной в работе [3], в котором используется прозрачная мера Kodak Q60-E3. Для калибровки АКМ такая мера закрепляется на предметном стекле. Недостатком данного решения является слишком большое число цветowych полей, что значительно увеличивает время калибровки, а также «кустарный» способ прикрепления меры к предметному стеклу.

Разработка калибровочной меры для АКМ, в первую очередь, предполагает определение числа цветовых полей, которые она должна содержать, и их цветовых координат. Это, в свою очередь, во многом определяется методом цветовой коррекции, который будет применяться к регистрируемым изображениям, и коэффициенты уравнений которого будут определяться в процессе калибровки. В настоящее время, несмотря на значительное число публикаций в области цветовой коррекции изображений, сравнительные исследования применимости различных методов цветовой коррекции к микроскопическим изображениям, позволяющие выбрать наилучший метод, отсутствуют.

Таким образом, формирование требований и создание калибровочной меры для АКМ и выбор соответствующего метода цветовой коррекции микроскопических изображений является актуальной задачей, решение которой позволит обеспечить инвариантность алгоритмической части АКМ к аппаратной комплектации.

1. Методы цветовой коррекции и оценка их качества

В научно-технической литературе предложено достаточно много алгоритмов коррекции изображений, основанных на использовании значений цветовых координат существующих калибровочных мер [2-12]. В рамках решения поставленной задачи наибольший интерес представляют методы коррекции, основанные на преобразовании координат изображений в цветовом пространстве RGB, так как именно в этом пространстве обычно представляются изображения, зарегистрированные с помощью цифровых камер.

Классические методы цветовой коррекции основаны на приведении зарегистрированных цветовых координат к действительным координатам для заданного источника освещения в соответствии с выбранным методом и алгоритмом коррекции. Входными параметрами алгоритма являются цветовые координаты, которые необходимо корректировать, выходными – оценки действительных цветовых координат (скорректированные координаты). В ходе построения алгоритма определяются коэффициенты уравнений для коррекции каждого канала цветового пространства RGB. Общий вид алгоритма цветовой коррекции можно представить в виде:

$$C_{out} = A \cdot C_{in}, \quad (1)$$

где C_{out} – вектор-столбец с оценками действительных цветовых координат размера 3×1 ;

A – матрица коэффициентов размера $3 \times n$ (n – число коэффициентов в уравнении для коррекции каждого из каналов цветового пространства RGB);

C_{in} – вектор-столбец зарегистрированных цветовых координат и их комбинаций размера $n \times 1$.

Для оценки качества цветовой коррекции в различных работах используются характеристики, показывающие степень отличия скорректированных цветовых координат от действительных.

Наиболее часто используемой характеристикой качества является средняя погрешность по каналу (координате цветности), рассчитываемая по соотношению [6]:

$$S_C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |C_i^{id} - C_i^{corr}|, \quad (2)$$

где S_C – средняя погрешность по каналу (C – каналы R, G, B, x или y);

N – количество цветовых полей в калибровочной мере.

C_i^{id} – действительная координата i -ого цветового поля в канале (координата цветности);

C_i^{corr} – скорректированная координата i -ого цветового поля в канале (координата цветности);

Для координат R, G, B также рассчитывается суммарная средняя погрешность S_Σ :

$$S_\Sigma = \frac{1}{3} \sum_C S_C, \quad (3)$$

где C – множество координат {R, G, B}.

В качестве характеристики качества цветовой коррекции часто используются характеристики цветового различия, рассчитываемые в пространстве Lab [7]:

$$\Delta E_{ab}^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(L_i^{id} - L_i^{corr})^2 + (a_i^{id} - a_i^{corr})^2 + (b_i^{id} - b_i^{corr})^2}, \quad (4)$$

где ΔE_{ab}^* – цветовое различие;

N – количество цветовых полей в калибровочной мере;

L_i^{id} , a_i^{id} , b_i^{id} – действительные координаты в пространстве Lab;

L_i^{corr} , a_i^{corr} , b_i^{corr} – скорректированные координаты в пространстве Lab.

Так как наибольший интерес для исследования представляет коррекция именно цветовых составляющих, то в пространстве Lab оценивают также цветовое различие ΔC без учета яркости:

$$\Delta C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(a_i^{id} - a_i^{corr})^2 + (b_i^{id} - b_i^{corr})^2}. \quad (5)$$

2. Исследование методов и алгоритмов цветовой коррекции

В данной работе было исследовано 10 методов цветовой коррекции (гамма-коррекция, методы коррекции полиномами и методы коррекции комбинациями цветовых координат). Преобразование цвета в выбранных методах осуществляется в цветовом пространстве RGB. Математическое описание соответствующих алгоритмов цветовой коррекции изображений приведены в приложении А. Матрица коэффициентов A в (1) рассчитывалась с помощью калибровочной меры Kodak Q60-E3.

Калибровочная мера Kodak Q60-E3 содержит 264 поля [13], цвета и оттенки которых соответствуют требованиям стандарта IT8.7/1. Мера закреплялась на чистом предметном стекле, далее стекло помещалось на предметный стол микроскопа, и каждое цветовое поле регистрировалось с помощью камеры PixeLINK PLB873 в двух режимах работы (настройки по умолчанию и включенный автоматический баланс белого цвета). Таким образом, было зарегистрировано 2 серии изображений цветовых полей меры. Оценка зарегистрированных цветовых координат R, G и B проводилась усреднением соответствующих значений каждого пикселя цветового поля.

По приведенным в документации на калибровочную меру координатам XYZ были рассчитаны значения действительных цветовых координат RGB (6) и координат цветности в пространстве xyY (7):

$$\mathbf{C}^{\text{id}} = \mathbf{M} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где $\mathbf{C}^{\text{id}} = (R^{\text{id}} \quad G^{\text{id}} \quad B^{\text{id}})^T$ – вектор-столбец действительных цветовых координат в пространстве RGB;

$\mathbf{M}$ – матрица перехода из пространства XYZ в пространство RGB для стандартного наблюдателя;

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z}, \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z}. \end{aligned} \quad (7)$$

Цветовые поля, действительные и зарегистрированные координаты RGB которых были меньше 1/255, были исключены из исследования для повышения устойчивости решения при поиске матрицы коэффициентов $\mathbf{A}$.

Таким образом, для исследования методов цветовой коррекции изображений был сформирован набор из 217 цветовых полей с известными действительными и зарегистрированными цветовыми координатами.

На первом этапе исследования для расчета коэффициентов в уравнениях цветовой коррекции использовался полный набор из 217 действительных и зарегистрированных цветовых координат для двух серий изображений калибровочной меры. Матрица коэффициентов уравнений цветовой коррекции оценивалась с использованием метода обусловленных наименьших квадратов [14]:

$$\mathbf{A} = \left[(\tilde{\mathbf{C}}_{\text{in}}^T \cdot \tilde{\mathbf{C}}_{\text{in}} + \alpha \cdot \mathbf{\Omega})^{-1} \cdot \tilde{\mathbf{C}}_{\text{in}}^T \cdot \tilde{\mathbf{C}}_{\text{out}}^{\text{id}} \right]^T, \quad (8)$$

где $\mathbf{A}$ – матрица коэффициентов размера $3 \times n$ (n – число коэффициентов в уравнении для коррекции одного канала цветового пространства RGB);

$\tilde{C}_{in}$ – матрица, состоящая из векторов C_{in} зарегистрированных цветовых координат и их комбинаций размером $q \times n$ (где q – количество цветовых полей в калибровочной мере, $q = 217$);

$\tilde{C}_{out}^{id}$ – матрица, состоящая из векторов C^{id} действительных цветовых координат цветовых полей калибровочной меры размером $q \times 3$;

α – параметр регуляризации;

Ω – квадратная матрица, соответствующая критерию гладкости решения в виде нормы второй производной:

$$\Omega = D_2^T \cdot D_2, \quad (9)$$

где D_2 – матрица вторых конечных разностей.

С использованием рассчитанных коэффициентов все зарегистрированные координаты были скорректированы всеми исследуемыми методами с расчетом показателей качества коррекции по формулам (2-5). Так как расчет показателей выполнялся по тем же цветовым полям калибровочной меры, что и расчет матрицы коэффициентов, целью первого этапа исследования являлась оценка предельных возможностей различных методов по восстановлению действительных значений цветовых координат.

Значения рассчитываемых показателей качества меняются при изменении в (8) параметра регуляризации α . Для выбора значения α было проведено исследование, в ходе которого оно варьировалось в диапазоне от 10^{-2} до 10^{-10} с расчетом суммарной средней погрешности в пространстве RGB (3). В результате значение α было принято равным 10^{-7} , что соответствует минимальным значениям погрешностей.

В таблице 1 приведены результаты расчета показателей качества цветовой коррекции в пространствах RGB, xyY и Lab. Для методов коррекции полиномами были получены практически идентичные значения, поэтому в таблице 1 представлены обобщенные результаты для указанных методов. Наименьшим значениям показателей соответствует наилучший метод коррекции.

Наименьшие значения показателей при условии их близости для обоих режимов работы цифровой камеры были получены для метода коррекции комбинацией 3-ей степени (вариант 2). Стоит отметить, что для метода коррекции комбинацией 4-ой степени ряд показателей имеют лучшие значения в режиме работы цифровой камеры с включенным автоматическим балансом белого цвета, однако для второго режима их значения уступают выбранному методу.

Таким образом, метод коррекции комбинацией 3-ей степени (вариант 2) дает наименьшую погрешность при коррекции цветов того же набора, который использовался для обучения.

Следует отметить, что значения показателя ΔE_{ab}^* для всех методов коррекции превышают величину 2,9, соответствующую минимально различимой для человеческого гла-

за разницы цветовых оттенков [15]. Это может быть связано с тем, что цветовая температура используемого для калибровочной меры Kodak Q60-E3 стандартного источника освещения D50 не соответствует цветовой температуре источника освещения микроскопа, что приводит к дополнительной погрешности при расчете цветовых координат по соотношению (1) с учетом (8).

Таблица 1. Значения показателей качества методов цветовой коррекции

Метод коррекции	Ре- жим ра- боты каме- ры*	Средняя погреш- ность коррекции в пространстве RGB, $\square\square 10^{-3}$ (отн. ед.)			Суммар- ная сред- няя по- грешность, $\square\square 10^{-3}$ (отн. ед.)	Средняя по- грешность коррекции в пространстве xyY, $\square\square 10^{-3}$ (отн. ед.)		Цветовые различия в пространстве L*a*b (отн. ед.)	
		S_R	S_G	S_B		S_x	S_y	ΔE_{ab}^*	ΔC
Степенными функциями (гамма-коррекция)	Def	32,0	6,3	35,0	24,4	18,4	21,5	10,3	8,6
	AWB	31,6	6,2	35,5	24,4	18,4	21,7	10,3	8,6
Полиномами 1-4-ой степеней	Def	31,5	6,1	35,6	24,4	19,9	22,3	10,3	8,6
	AWB	31,0	5,9	35,5	24,1	24,7	24,7	10,3	8,6
Комбинацией 1-ой степени	Def	6,9	3,5	16,1	8,8	7,4	19,7	8,4	6,0
	AWB	7,5	3,1	17,9	9,5	8,3	20,9	8,7	6,3
Комбинацией 2-ой степени	Def	4,5	3,0	7,9	5,1	4,5	10,1	6,5	3,6
	AWB	4,2	3,0	7,4	4,9	4,8	10,4	6,6	3,6
Комбинацией 3-ей сте- пени (вариант 1)	Def	5,4	3,4	10,3	6,4	25,9	89,7	6,9	4,1
	AWB	5,5	3,3	10,4	6,4	9,3	24,8	6,8	3,9
Комбинацией 3-ей сте- пени (вариант 2)	Def	4,1	3,0	6,1	4,4	2,6	5,3	5,9	2,8
	AWB	4,1	2,9	6,0	4,3	2,4	5,6	5,9	2,8
Комбинацией 4-ой степени	Def	5,4	7,1	4,7	5,7	3,5	12,0	6,2	3,2
	AWB	4,0	3,2	5,7	4,3	2,7	3,5	5,6	2,4
Комбинацией 5-ой степени	Def	7,1	3,3	16,6	9,0	11,0	24,5	9,7	7,1
	AWB	4,6	4,6	6,3	5,2	3,8	5,7	6,0	2,9

* «Def» – настройки цифровой камеры по умолчанию, «AWB» – включенный автоматический баланс белого цвета

3. Исследование зависимости качества цветовой коррекции от числа цветовых полей калибровочной меры

Выбранный по результатам исследований метод предполагает определение 11-ти коэффициентов в уравнении для цветовой коррекции значения элементов изображения в каждом из каналов пространства RGB (всего 33 коэффициента), то есть калибровочная мера для АКМ должна содержать не менее 11 цветовых полей.

Следующий этап исследования заключался в оценке влияния количества и набора цветовых полей калибровочной меры на качество коррекции. Для этого было сформиро-

вано 6 обучающих наборов, содержащих 30, 35, 40, 50, 60 и 80 цветовых полей и контрольный набор из 47 цветовых полей, не вошедших ни в один из обучающих.

Для координат, лежащих в окрестности белой точки на диаграмме цветности, характерен наименьший сдвиг при цветовой коррекции. При удалении от белой точки расстояние, на которое должны быть перемещены координаты цветности в результате цветовой коррекции, возрастает. Поэтому цветовые поля обучающих и контрольного набора были выбраны из цветовых полей меры Kodak Q60-E3 таким образом, чтобы они, по возможности, равномерно покрывали область цветового охвата цифровой камеры (см. рис. 2).

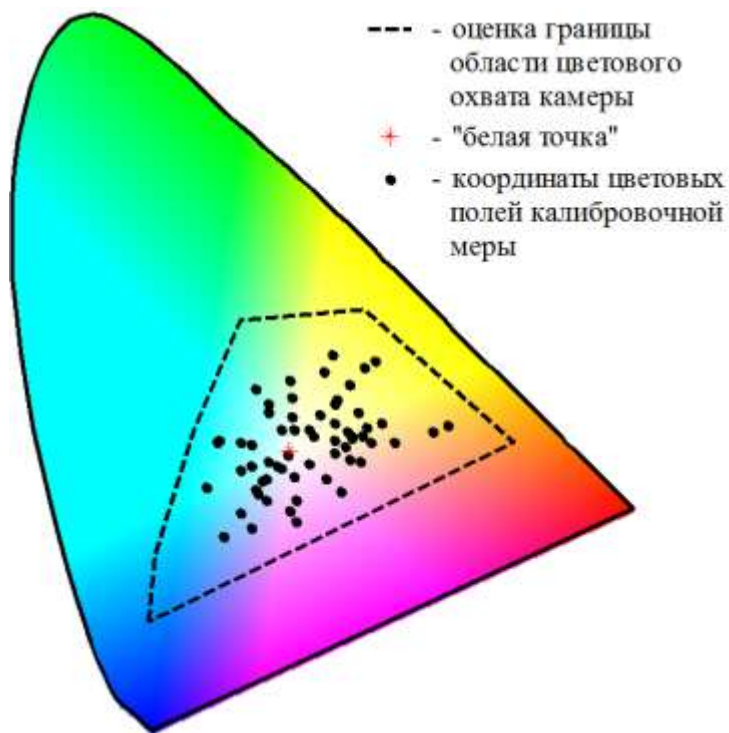
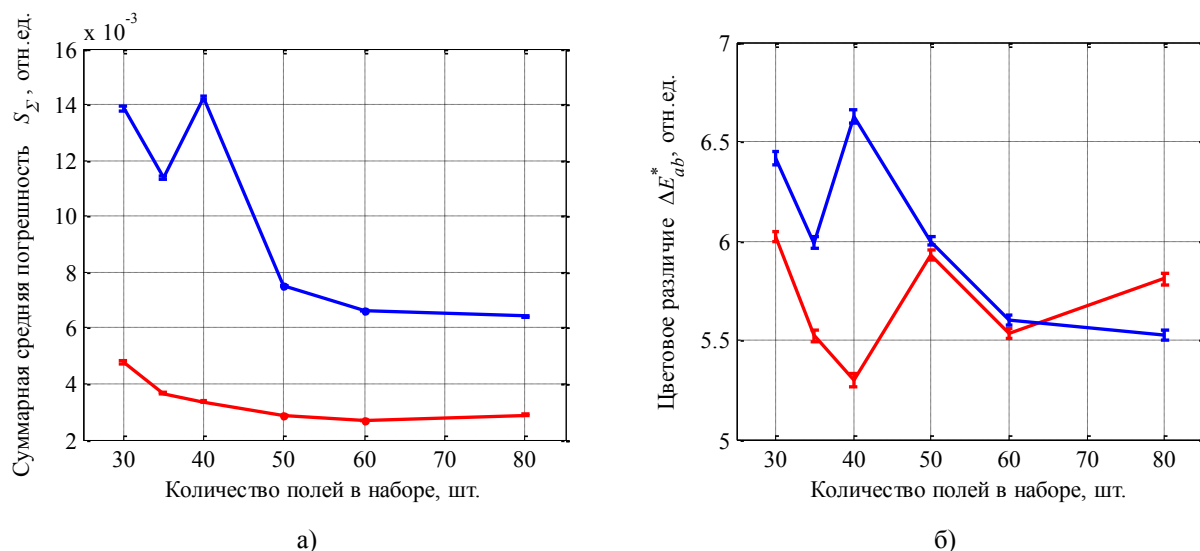


Рис. 2. Расположение координат 60-ти цветовых полей обучающего набора на диаграмме цветности (цветовое пространство xyY)

Обучающий набор из 80 цветовых полей был предварительно отобран исходя из минимизации погрешности восстановления (3) цветовых координат контрольного набора. Затем данный набор последовательно прореживался до получения указанных выше обучающих наборов с меньшим числом цветовых полей.

В результате исследования были получены зависимости показателей качества цветовой коррекции в пространствах RGB и Lab ($S_Z, \Delta E_{ab}^*$) от количества цветовых полей в калибровочной мере. Графики зависимостей представлены на рисунке 3. Наименьшие значения получены для набора, состоящего из 60 цветовых полей. Полученные значения характеристик качества близки к соответствующим значениям таблицы 1 для того же метода цветовой коррекции.



а) суммарная средняя погрешность коррекции в пространстве RGB (S_{Σ}); б) цветовое различие в пространстве Lab (ΔE_{ab}^*)

Рис. 3. Зависимости характеристик качества цветовой коррекции для контрольного набора от количества цветовых полей в калибровочной мере для двух режимов работы цифровой камеры: настройки по умолчанию (красный) и включенный автоматический баланс белого (синий)

Заключение

Результаты проведенных исследований методов цветовой коррекции изображений при помощи калибровочной меры Kodak Q60-E3 показали возможность выполнения цветовой калибровки системы регистрации изображений АКМ. Был определен наилучший из рассмотренных методов, и сформирован набор из 60-ти цветовых полей, которые должна содержать калибровочная мера.

Тем не менее, следует отметить, что полученное значение показателя качества ΔE_{ab}^* превышает значение 2,9, что свидетельствует о заметности для глаза человека различий между действительным цветом и его оценкой, полученной при цветовой коррекции. Погрешности S_C , рассчитываемые в пространствах RGB и xyY , имеют сильно отличающиеся значения (в два раза и более) в различных каналах, что также недопустимо для метода цветовой коррекции. Полученные результаты могут указывать на невозможность использования цветовых полей калибровочной меры Kodak Q60-E3 для калибровки АКМ, что, по-видимому, связано с несоответствием использованного в ней стандартного источника освещения D50 источнику освещения микроскопа.

В целом, результаты проведенных исследований указывают на невозможность полноценной адаптации существующих калибровочных мер для решения задачи стандартизации цветовых характеристик изображений в области оптической микроскопии и необходимость разработки специализированной калибровочной меры для АКМ.

Список литературы

1. McCamy C.S., Marcus H., Davidson J.G. A Color-Rendition Chart // Journal of Applied Photographic Engineering. 1976. Vol. 2, no. 3. P. 95-99.

2. Yagi Y. Color standardization and optimization in whole slide imaging // Diagnostic Pathology. 2011. No. 6. DOI: [10.1186/1746-1596-6-S1-S15](https://doi.org/10.1186/1746-1596-6-S1-S15)
3. Shrestha P., Hulsken B. Color accuracy and reproducibility in whole slide imaging scanners // Journal of Medical Imaging. 2014. Vol. 1, no. 2. DOI: [10.1117/1.JMI.1.2.027501](https://doi.org/10.1117/1.JMI.1.2.027501)
4. Pham B., Pringle G. Color correction for an image sequence // IEEE Computer Graphics and Applications. 1995. Vol. 15, no. 3. P. 38-42. DOI: [10.1109/38.376611](https://doi.org/10.1109/38.376611)
5. Münzenmayer Ch., Naujokat F., Mühldorfer S., Mayinger B., Wittenberg T. Lineare Farbkorrektur zur automatischen Gewebeerkennung in der Endoskopie des Ösophagus // Proc. of the Bildverarbeitung für die Medizin, 2003, 29-30 März, Berlin, Deutschland. Berlin, 2003. P. 15-19.
6. Choi Y.-J., Lee Y.-B., Cho W.-D. Color Correction for Object Identification from Images with Different Color Illumination // Proc. of the 5th International Joint Conference on INC, IMS and IDC (NCM 2009), 2009, 25-27 August, Seoul, South Korea. Seoul, 2009. P. 1598-1603.
7. Wang X., Zhang D. An Optimized Tongue Image Color Correction Scheme // IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine. 2010. Vol. 14, iss. 6. P. 1355-1364. DOI: [10.1109/TITB.2010.2076378](https://doi.org/10.1109/TITB.2010.2076378)
8. Mornet C., Vaillant J., Decroux T., [Hérault D.](#), Schanen I. Evaluation of color error and noise on simulated images // Proc. of the Digital Photography VI, 2010, 18-19 January, San Jose, USA. San Jose, 2010. P. 135-141.
9. Constantinou I., Neofytou M., Tanos V., Pattichis M., Christodoulou C., Pattichis C. A comparison of color correction algorithms for endoscopic cameras // Bioinformatics and Bioengineering (BIBE). Proc. of IEEE 13th International Conference, 2013, 10-13 November, Chania, Greece. Chania, 2013. P. 1-4.
10. Charrière R., Hébert M., Trémeau A., Destouches N. Color calibration of an RGB camera mounted in front of a microscope with strong color distortion // Applied Optics. 2013. Vol. 52, iss. 21. P. 5262-5271. DOI: [10.1364/AO.52.005262](https://doi.org/10.1364/AO.52.005262)
11. Bastani P., Funt B. Simplifying irradiance independent color calibration // Proc. of SPIE 9015. Color Imaging XIX: Displaying, Processing, Hardcopy, and Applications. 2014. Vol. 9015. DOI: [10.1117/12.2042507](https://doi.org/10.1117/12.2042507)
12. Бибиков С.А., Фурсов В.А. Цветовая коррекция на основе идентификации моделей по тестовым фрагментам изображений // Компьютерная оптика. 2008. Т. 32, № 3. С. 302-306.
13. Kodak Q-60 Color Input Targets // Technical Data / Color Paper. 2003. No. TI-2045. Режим доступа: <http://scarse.sourceforge.net/docs/kodak/Q60-tech.pdf> (дата обращения 01.01.2016).
14. Василенко Г.И. Теория восстановления сигналов: о редукции к идеальному прибору в физике и технике. М.: Советское радио, 1979. 272 с.
15. Sharma G. Digital Color Imaging Handbook. New York: CRC Press, 2003. 764 p.

Приложение А

Общий вид алгоритма цветовой коррекции можно представить в виде:

$$\mathbf{C}_{\text{out}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{C}_{\text{in}},$$

где $\mathbf{C}_{\text{out}}$ – вектор-столбец с оценками действительных цветовых координат размера 3×1 ;

$\mathbf{A}$ – матрица коэффициентов размера $3 \times n$ (n – число коэффициентов в уравнении для коррекции одного канала цветового пространства RGB);

$\mathbf{C}_{\text{in}}$ – вектор-столбец зарегистрированных цветовых координат и их комбинаций размера $n \times 1$ (вектор может различаться для коррекции разных цветовых координат).

Таблица А. Описание алгоритмов цветовой коррекции изображений

№	Метод коррекции	n	Вектор-столбец зарегистрированных цветовых координат и их комбинаций $\mathbf{C}_{\text{in}}$
1	Гамма-коррекция	2	$\begin{Bmatrix} (R_{in}^{\gamma_R} \ 1)^T \\ (G_{in}^{\gamma_G} \ 1)^T \\ (B_{in}^{\gamma_B} \ 1)^T \end{Bmatrix}$
2	Коррекция полиномами 2-ой степени	3	$\begin{Bmatrix} (R_{in}^2 \ R_{in} \ 1)^T \\ (G_{in}^2 \ G_{in} \ 1)^T \\ (B_{in}^2 \ B_{in} \ 1)^T \end{Bmatrix}$
3	Коррекция полиномами 3-ей степени	4	$\begin{Bmatrix} (R_{in}^3 \ R_{in}^2 \ R_{in} \ 1)^T \\ (G_{in}^3 \ G_{in}^2 \ G_{in} \ 1)^T \\ (B_{in}^3 \ B_{in}^2 \ B_{in} \ 1)^T \end{Bmatrix}$
4	Коррекция полиномами 4-ой степени	5	$\begin{Bmatrix} (R_{in}^4 \ R_{in}^3 \ R_{in}^2 \ R_{in} \ 1)^T \\ (G_{in}^4 \ G_{in}^3 \ G_{in}^2 \ G_{in} \ 1)^T \\ (B_{in}^4 \ B_{in}^3 \ B_{in}^2 \ B_{in} \ 1)^T \end{Bmatrix}$
5	Коррекция комбинацией 1-ой степени [7]	3	$(R_{in} \ G_{in} \ B_{in})^T$
6	Коррекция комбинацией 2-ой степени [7]	9	$(R_{in}^2 \ G_{in}^2 \ B_{in}^2 \ R_{in} \cdot G_{in} \ B_{in} \cdot G_{in} \ R_{in} \cdot B_{in} \ R_{in} \ G_{in} \ B_{in})^T$
7	Коррекция комбинацией 3-ей степени (вариант 1) [7]	5	$(R_{in} \cdot G_{in} \cdot B_{in} \ R_{in} \ G_{in} \ B_{in} \ 1)^T$

№	Метод коррекции	n	Вектор-столбец зарегистрированных цветовых координат и их комбинаций C_{in}
8	Коррекция комбинацией 3-ей степени (вариант 2) [7]	11	$(R_{in} \cdot G_{in} \cdot B_{in} \quad R_{in}^2 \quad G_{in}^2 \quad B_{in}^2 \quad R_{in} \cdot G_{in} \quad B_{in} \cdot G_{in} \quad R_{in} \cdot B_{in} \quad R_{in} \quad G_{in} \quad B_{in} \quad 1)^T$
9	Коррекция комбинацией 4-ой степени	23	$(R_{in}^2 \cdot G_{in} \cdot B_{in} \quad G_{in}^2 \cdot R_{in} \cdot B_{in} \quad B_{in}^2 \cdot G_{in} \cdot R_{in} \quad R_{in}^3 \quad G_{in}^3 \quad B_{in}^3 \quad R_{in}^2 \cdot G_{in} \quad R_{in}^2 \cdot B_{in} \quad \dots$ $\dots \quad G_{in}^2 \cdot R_{in} \quad G_{in}^2 \cdot B_{in} \quad B_{in}^2 \cdot R_{in} \quad B_{in}^2 \cdot G_{in} \quad R_{in} \cdot G_{in} \cdot B_{in} \quad R_{in}^2 \quad G_{in}^2 \quad B_{in}^2 \quad \dots$ $\dots \quad R_{in} \cdot B_{in} \quad B_{in} \cdot G_{in} \quad R_{in} \cdot G_{in} \quad R_{in} \quad G_{in} \quad B_{in} \quad 1)^T$
10	Коррекция комбинацией 5-ой степени	41	$(R_{in}^2 \cdot G_{in}^2 \cdot B_{in} \quad R_{in} \cdot G_{in}^2 \cdot B_{in}^2 \quad R_{in}^2 \cdot G_{in} \cdot B_{in}^2 \quad R_{in}^3 \cdot G_{in} \cdot B_{in} \quad R_{in} \cdot G_{in}^3 \cdot B_{in} \quad \dots$ $\dots \quad R_{in} \cdot G_{in} \cdot B_{in}^3 \quad R_{in}^4 \quad G_{in}^4 \quad B_{in}^4 \quad R_{in}^3 \cdot G_{in} \quad R_{in}^3 \cdot B_{in} \quad G_{in}^3 \cdot R_{in} \quad G_{in}^3 \cdot B_{in} \quad \dots$ $\dots \quad B_{in}^3 \cdot R_{in} \quad B_{in}^3 \cdot G_{in} \quad R_{in}^2 \cdot G_{in}^2 \quad R_{in}^2 \cdot G_{in}^2 \quad B_{in}^2 \cdot G_{in}^2 \quad R_{in}^2 \cdot G_{in} \cdot B_{in} \quad \dots$ $\dots \quad R_{in} \cdot G_{in}^2 \cdot B_{in} \quad R_{in} \cdot G_{in} \cdot B_{in}^2 \quad R_{in}^3 \quad G_{in}^3 \quad B_{in}^3 \quad R_{in}^2 \cdot G_{in} \quad R_{in}^2 \cdot B_{in} \quad \dots$ $\dots \quad G_{in}^2 \cdot R_{in} \quad G_{in}^2 \cdot B_{in} \quad B_{in}^2 \cdot R_{in} \quad B_{in}^2 \cdot G_{in} \quad R_{in} \cdot G_{in} \cdot B_{in} \quad R_{in}^2 \quad G_{in}^2 \quad \dots$ $\dots \quad B_{in}^2 \quad R_{in} \cdot G_{in} \quad R_{in} \cdot B_{in} \quad B_{in} \cdot G_{in} \quad R_{in} \quad G_{in} \quad B_{in} \quad 1)^T$

Comparatively Studied Color Correction Methods for Color Calibration of Automated Microscopy Complex of Biomedical Specimens

T.A. Kravtsova¹, D.A. Dobrolubova¹,

^{*}avs@bmstu.ru

A.V. Samorodov^{1,*}

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: color calibration, color correction, optical microscopy, automated microscopy, calibration target

The paper considers a task of generating the requirements and creating a calibration target for automated microscopy systems (AMS) of biomedical specimens to provide the invariance of algorithms and software to the hardware configuration. The required number of color fields of the calibration target and their color coordinates are mostly determined by the color correction method, for which coefficients of the equations are estimated during the calibration process. The paper analyses existing color calibration techniques for digital imaging systems using an optical microscope and shows that there is a lack of published results of comparative studies to demonstrate a particular useful color correction method for microscopic images. A comparative study of ten image color correction methods in RGB space using polynomials and combinations of color coordinate of different orders was carried out. The method of conditioned least squares to estimate the coefficients in the color correction equations using captured images of 217 color fields of the calibration target Kodak Q60-E3 was applied. The regularization parameter in this method was chosen experimentally. It was demonstrated that the best color correction quality characteristics are provided by the method that uses a combination of color coordinates of the 3rd order. The study of the influence of the number and the set of color fields included in calibration target on color correction quality for microscopic images was performed. Six train sets containing 30, 35, 40, 50, 60 and 80 color fields, and test set of 47 color fields not included in any of the train sets were formed. It was found out that the train set of 60 color fields minimizes the color correction error values for both operating modes of digital camera: using "default" color settings and with automatic white balance. At the same time it was established that the use of color fields from the widely used now Kodak Q60-E3 target does not allow achieving values of microscopic images color correction errors below the color difference level of visibility for the human eye. The conclusion is that there is a need in development of specialized calibration target for AMS of biomedical specimens.

References

1. McCamy C.S., Marcus H., Davidson J.G. A Color-Rendition Chart. *Journal of Applied Photographic Engineering*, 1976, vol. 2, no. 3, pp. 95-99.
2. Yagi Y. Color standardization and optimization in whole slide imaging. *Diagnostic Pathology*, 2011, no. 6. DOI: [10.1186/1746-1596-6-S1-S15](https://doi.org/10.1186/1746-1596-6-S1-S15)
3. Shrestha P., Hulsken B. Color accuracy and reproducibility in whole slide imaging scanners. *Journal of Medical Imaging*, 2014, vol. 1, no. 2. DOI: [10.1117/1.JMI.1.2.027501](https://doi.org/10.1117/1.JMI.1.2.027501)
4. Pham B., Pringle G. Color correction for an image sequence. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1995, vol. 15, no. 3, pp. 38-42. DOI: [10.1109/38.376611](https://doi.org/10.1109/38.376611)
5. Münzenmayer Ch., Naujokat F., Mühldorfer S., Mayinger B., Wittenberg T. Lineare Farbkorrektur zur automatischen Gewebeerkenkung in der Endoskopie des Ösophagus. *Proc. of the Bildverarbeitung für die Medizin*. 2003, 29-30 März, Berlin, Deutschland. Berlin, 2003, pp. 15-19.
6. Choi Y.-J., Lee Y.-B., Cho W.-D. Color Correction for Object Identification from Images with Different Color Illumination. *Proc. of the 5th International Joint Conference on INC, IMS and IDC (NCM 2009)*. 2009, 25-27 August, Seoul, South Korea. Seoul, 2009, pp. 1598-1603.
7. Wang X., Zhang D. An Optimized Tongue Image Color Correction Scheme. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2010, vol. 14, iss. 6, pp. 1355-1364. DOI: [10.1109/TITB.2010.2076378](https://doi.org/10.1109/TITB.2010.2076378)
8. Mornet C., Vaillant J., Decroux T., [Hérault](#) D., Schanen I. Evaluation of color error and noise on simulated images. *Proc. of the Digital Photography VI*. 2010, 18-19 January, San Jose, USA. San Jose, 2010, pp. 135-141.
9. Constantinou I., Neofytou M., Tanos V., Pattichis M., Christodoulou C., Pattichis C. A comparison of color correction algorithms for endoscopic cameras. *Bioinformatics and Bioengineering (BIBE). Proc. of IEEE 13th International Conference*. 2013, 10-13 November, Chania, Greece. Chania, 2013, pp. 1-4.
10. Charrière R., Hébert M., Trémeau A., Destouches N. Color calibration of an RGB camera mounted in front of a microscope with strong color distortion. *Applied Optics*, 2013, vol. 52, iss. 21, pp. 5262-5271. DOI: [10.1364/AO.52.005262](https://doi.org/10.1364/AO.52.005262)
11. Bastani P., Funt B. Simplifying irradiance independent color calibration. *Proc. of SPIE 9015. Color Imaging XIX: Displaying, Processing, Hardcopy, and Applications*, 2014, vol. 9015. DOI: [10.1117/12.2042507](https://doi.org/10.1117/12.2042507)
12. Bibikov S.A., Fursov V.A. Color correction based on identification of models using test image fragments. *Komp'yuternaya optika = Computer optics*, 2008, vol. 32, no. 3, pp. 302-306. (in Russian).
13. Kodak Q-60 Color Input Targets. *Technical Data / Color Paper*, 2003, no. TI-2045. Available at: <http://scarse.sourceforge.net/docs/kodak/Q60-tech.pdf> , accessed 01.01.2016.
14. Vasilenko G.I. *Teoriya vosstanovleniya signalov: o reduktsii k ideal'nomu priboru v fizike i tekhnike* [The theory of signal recovery: about reduction to ideal instrument in physics and engineering]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1979. 272 p. (in Russian).
15. Sharma G. *Digital Color Imaging Handbook*. New York, CRC Press, 2003. 764 p.