

УДК: 004.932.2

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО ЭФФЕКТИВНАЯ АДАПТИВНАЯ ЦВЕТОВАЯ КОРРЕКЦИЯ

© 2024 г. М. В. Харкевич^{1, 2, *}, О. А. Басова¹, И. А. Коноваленко³

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН,
127051, Москва, пер. Большой Каретный, 19 стр. 1, Россия

² Московский физико-технический институт,
141707, Долгопрудный, Институтский пер, д. 9, Россия

³ Федеральный исследовательский центр “Информатика и управление” РАН,
119333, Москва, ул. Вавилова, д. 44, к. 2, Россия

*kharkevich@iitp.ru

Поступила в редакцию 25.06.2024 г.

После доработки 25.08.2024 г.

Принята к публикации 30.08.2024 г.

Для получения цифровой фотографии, максимально точно воспроизводящей оригинальную сцену, необходимо решить задачу цветовой коррекции, т.е. найти отображение, переводящее координаты цветового пространства камеры (RGB) в координаты цветового пространства человека (CIE XYZ). В данной статье мы рассматриваем цветовую коррекцию с помощью таблиц поиска (англ. lookup table), заранее построенных для различных условий освещения. Такой подход позволяет достичь высоких скорости и точности при применении цветовой коррекции на устройстве, однако требует больших объемов оперативной памяти, которыми располагают не все устройства, например, мобильные телефоны. Нами предлагается метод автоматического прореживания множества таблиц поиска с минимальными потерями в точности цветовой коррекции. Метод основан на кластеризации отображений, задающих цветовую коррекцию. Для сравнения отображений нами предлагается критерий их схожести, основанный на максимальном различии порождаемых цветов в целевом пространстве стандартного наблюдателя CIE XYZ. Для предложенного критерия в статье приводится эффективный метод вычисления вместе с теоремой, обосновывающей корректность метода.

Ключевые слова: адаптивная цветовая коррекция, критерий схожести отображений, таблица поиска, математическое программирование, кластеризация

DOI: 10.31857/S0235009224040077 EDN: ACVQWZ

ВВЕДЕНИЕ

Цветовая коррекция

Основной задачей цветовой коррекции является получение репродукции, максимально точно воспроизводящей оригинал (Шашлов, 2016, с. 47). Проблема заключается в том, что цвета, регистрируемые сетчаткой глаза человека и сенсором камеры, отличаются (рис. 1). Если функции спектральной чувствительности сенсора камеры линейно выразимы в базисе цветового пространства человека, причем матрица отображения невырождена, то говорят, что выполнен критерий Максвелла – Лютера – Айвза (Ives, 1915; Luther, 1927). В таком случае отображение, переводящее координаты цветового пространства камеры (RGB) в цветное пространство стандартного наблюдателя (CIE XYZ), существует, оно линейно, и цветовую

коррекцию можно сделать идеально точно. Однако функции спектральной чувствительности большинства камер сильно отличаются от функций чувствительности глаза человека (рис. 2), и вышеупомянутый критерий не выполняется даже приблизительно. Таким образом, не существует отображения, которое бы переводило координаты цветового пространства камеры (RGB) в координаты цветового пространства человека (CIE XYZ).

Поиск отображения, максимально точно воспроизводящего исходный цветовой образ, осложняется несколькими проблемами. Учитывая коммерческие обстоятельства, для сенсоров не введено единого стандарта на спектральную чувствительность (Solomatov, Akkaynak, 2023), а технологии цветоделиния в камерах разнообразны и непрерывно совершенствуются. Поэтому сенсоры каждой отдельной камеры имеют уникальные функции спектральной чувствительности (рис. 3).



Рис. 1. Пример разного восприятия цвета глазом человека (а) и камерой (б). Излучение пульта находится в инфракрасном диапазоне, невидимом для человеческого глаза. Однако с помощью камеры этот сигнал можно зафиксировать.

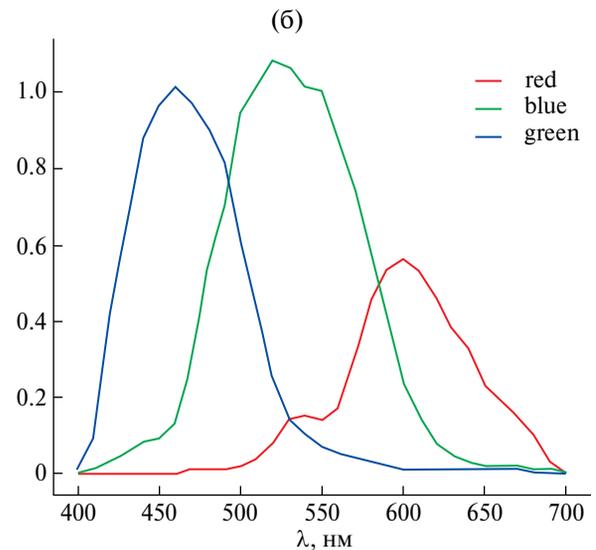
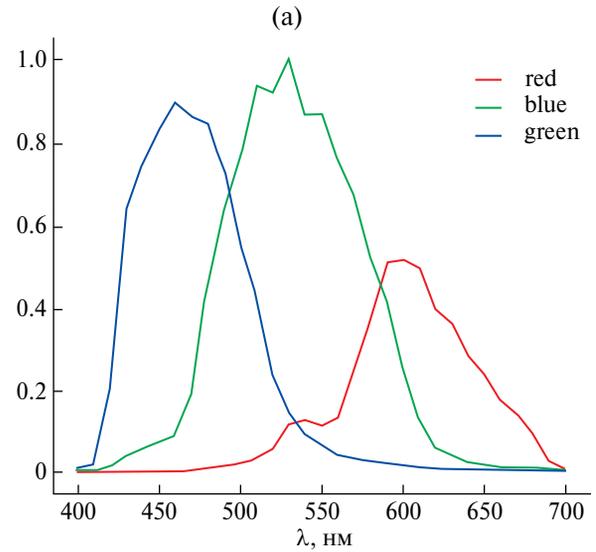


Рис. 3. Функции спектральной чувствительности двух экземпляров камеры модели Canon 40D.

Цветовой сенсор линейно отображает спектральные освещенности фоточувствительной поверхности сенсора в конечномерное пространство цветовых координат (Николаев и др., 2021, с. 15). Такое отображение можно представить следующим образом:

$$c = \int_0^\infty F(\lambda) X(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где c – вектор координат регистрируемого цвета; λ – длина волны; $F(\lambda)$ – спектральная освещенность сенсора, $X(\lambda)$ – вектор функций спектральной чувствительности сенсора к разным длинам волн.

Построение цветовой коррекции также осложняется метамерия. Метамерией двух излучений

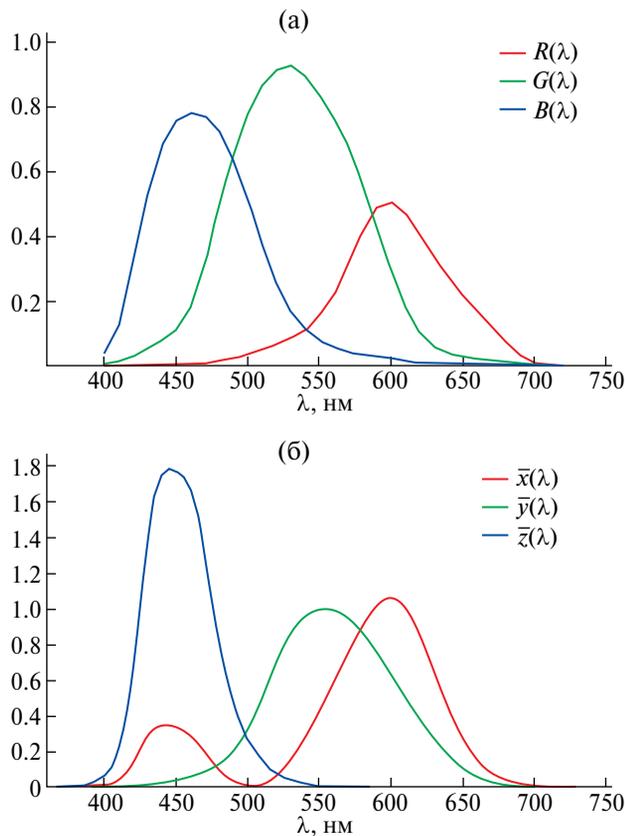


Рис. 2. Функции спектральной чувствительности фотоаппарата Canon EOS600D (а) и человека (б).

Для лучшего понимания проблемы поиска отображения введем понятие модели формирования цвета, не учитывающей последующие преобразования зарегистрированного сигнала.

различных спектральных составов $F_1(\lambda) \sim F_2(\lambda)$ называют ситуацией, когда они оказываются визуально неразличимы, т.е. выполнено следующее условие:

$$\int_0^{\infty} (F_1(\lambda) - F_2(\lambda)) X(\lambda) d\lambda = 0. \quad (2)$$

Каждому из сенсоров присуща метамерия, причем множества неразличимых спектров уникальны для каждого сенсора (в том числе глаза человека). Поэтому принципиально невозможно построить биективное отображение между пространством сенсора и пространством стандартного наблюдателя.

Кроме того, даже для одного и того же сенсора множества неразличимых окрасок будут различаться в зависимости от источника освещения, под которым они наблюдаются. Это приводит к тому, что цветовая коррекция должна зависеть от доминирующего источника освещения в сцене.

Таким образом, задача цветовой коррекции оказывается нетривиальной, несмотря на простоту ее формулировки.

Адаптивная цветовая коррекция

Классическая цветовая коррекция предполагает применение только одного отображения независимо от условий съемки. Такой подход может быть неточным при изменении условий освещения.

Адаптивная цветовая коррекция основана на построении уникальных отображений для разных условий освещения. Такой подход учитывает то, что для каждого источника освещения множества неразличимых окрасок уникальны, поэтому за счет применения разных отображений получается повысить точность цветовой коррекции. Такую цветовую коррекцию можно осуществлять различным образом: линейно (Gasparini, Schettini, 2003; Mantiuk et al., 2009; Sari et al., 2015) и нелинейно (Moroney, 2000; Finlayson et al., 2015; Soshin et al., 2023). Например, Юита Сари предлагает использовать линейную регрессию для решения задачи цветовой коррекции (Sari et al., 2015), а Грэм Финлейсон – производить отображения из цветового пространства камеры в цветовое пространство человека нелинейно, используя расширение размерности исходного пространства с помощью корней из полиномов различных степеней (англ. Root Polynomial Color Correction) (Finlayson et al., 2015). По сравнению с классической адаптивная цветовая коррекция является более точным подходом, но она сложнее вычислительно, что затрудняет ее использование, например, в мобильных телефонах.

Цветовая коррекция с помощью таблиц поиска

Проблему сложных вычислений при использовании адаптивной цветовой коррекции можно решить с помощью таблиц поиска (англ. lookup table) (Fernando, 2005). Таблица поиска – это структура данных, в которой хранятся результаты предподсчета некоторой функции, в нашем случае – отображения координат из цветового пространства камеры в цветовое пространство человека. Она представляет собой массив, используемый для замены вычислений некоторой сложной функции на операцию простого поиска с дальнейшей интерполяцией. Таблицы поиска имеют широкое применение в цветовой коррекции (Kim et al., 2003; Han, 2004; Morovic, Luo, 2001). Такие таблицы с контролируемой точностью могут описать любое гладкое преобразование, при этом они очень быстры в применении, даже к большим изображениям и видеопотоку. Однако они требуют большого количества памяти, так как для каждого отдельного отображения строится уникальная таблица поиска (например, для одной таблицы среднего размера $40 \times 40 \times 40$ потребуется приблизительно 250 КБ) (Fernando, 2005). В условиях съемки происходит оценка спектра излучения (она может производиться автоматически или настраиваться вручную), а также поиск ближайшего к нему источника, для которого хранится таблица. Далее полученным RGB цветам ставятся в соответствие координаты CIE XYZ с помощью выбранной таблицы поиска. Такой подход является быстрым, не уступает по точности адаптивной цветовой коррекции, но в большинстве случаев мы не располагаем большими объемами свободной оперативной памяти на устройстве, поэтому он также имеет существенные ограничения в применении.

Цель работы

Таким образом, все рассмотренные решения имеют существенные недостатки. В данной работе мы предлагаем модификацию цветовой коррекции с помощью таблиц поиска, которая нацелена на решение проблемы требуемых больших объемов памяти при той же скорости работы алгоритма, а также не имеющую значительных потерь в точности отображения.

Структура статьи

Далее статья устроена следующим образом. Второй раздел описывает рассматриваемый метод цветовой коррекции, также приводятся преимущества выбранного метода. В третьем разделе предлагается эффективный метод применения таблиц поиска, основанный на кластеризации

отображений. Данный метод решает проблему необходимых объемов памяти при той же скорости работы алгоритма. Далее, в четвертом разделе, вводится критерий схожести отображений, на основе которого предлагается осуществлять кластеризацию. В пятом приводится эффективный метод вычисления вместе с теоремой, обосновывающей корректность метода.

РАССМАТРИВАЕМЫЙ МЕТОД ЦВЕТОВОЙ КОРРЕКЦИИ

В данной работе мы будем рассматривать отображения, которые осуществляются с помощью расширения размерности исходного пространства. В литературе предлагаются разные алгоритмы расширения размерности, например, с использованием корней из полиномов различных степеней (англ. Root Polynomial Color Correction, далее – RPCC) (Finlayson et al., 2015) или с помощью дробно-рациональных признаков вида частного от многочленов (англ. Scalable Rational Color Correction, далее SRCC) (Soshin et al., 2023). Такие подходы являются более точными, чем линейная цветовая коррекция.

Координаты расширенного пространства для RPCC 2-й степени выглядят следующим образом:

$$p(c_c) = (R, G, B, \sqrt{RG}, \sqrt{GB}, \sqrt{RB})^T, \quad (3)$$

где $c_c = (R, G, B)$ – вектор цветовых координат в пространстве RGB; p – вектор-функция, задающая многомерные цветовые координаты камеры 2-й степени.

Для модели SRCC координаты пространства 2-й степени записываются следующим образом:

$$p(c_c) = \left(\frac{RG}{R+G+B}, \frac{RB}{R+G+B}, \frac{GB}{R+G+B} \right). \quad (4)$$

В качестве примера мы привели формулы для моделей второй степени, однако на практике для достижения лучшей точности могут применяться модели RPCC и SRCC более высоких степеней. Для них вычисляется еще больше координат, которые строятся аналогичным образом, но с использованием корней более высокого порядка и большего количества умножений, что повышает их вычислительную сложность. Это делает задачу построения быстрых в применении таблиц поиска еще более актуальной.

При использовании координат расширенного цветового пространства камеры (3, 4) оценка цветовых координат в пространстве CIE XYZ будет производиться следующим образом:

$$\hat{c}_h = Mp(c_c), \quad (5)$$

где M – матрица линейного отображения из расширенного пространства RGB в пространство CIE XYZ; \hat{c}_h – оценка координат пространства CIE XYZ.

Преимуществом ввода как RPCC, так и SRCC координат является большее количество признаков. Также для обеих моделей имеет место однородность 1-й степени, или шкалируемость:

$$p(kc) = kp(c). \quad (6)$$

Однородность 1-й степени (6) полезна для решения задачи цветовой коррекции, так как при ее выполнении линейное увеличение яркости при неизменной цветности в цветовом пространстве RGB влечет за собой линейное изменение яркости в цветовом пространстве CIE XYZ. При этом цветность также не изменяется. Цветностью называется цвет без учета яркости.

ЭФФЕКТИВНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ТАБЛИЦ ПОИСКА

В зависимости от известных условий съемки используются различные отображения из пространства RGB в CIE XYZ. Для разных условий съемки матрицы отображений могут порождать схожие цветовые пространства, в таком случае можно заменить мало отличающиеся друг от друга отображения одним, а далее произвести предподсчет таблиц поиска только для отобранных.

Поставим задачу нахождения k наиболее непохожих матриц отображения из n данных, что автоматически означает исключение наиболее похожих. Эту задачу будем решать полным перебором. Для поиска нужно рассмотреть C_n^k наборов матриц по k элементов. Для определения наиболее непохожего набора в каждом из них найдем минимальное значение некоторого критерия схожести для пар отображений, входящих в него. Далее сравним эти минимальные значения и выберем из них максимальное:

$$i_1^*, i_2^*, \dots, i_k^* = \operatorname{argmax}_{i_1, i_2, \dots, i_k} \min_{i < j (i, j \in \{i_1, i_2, \dots, i_k\})} \Delta_{ij}, i_j \in \{1, \dots, n\}, \quad (7)$$

где количество всевозможных наборов i_1, i_2, \dots, i_k равно C_n^k , $i_1^*, i_2^*, \dots, i_k^*$ – отобранный набор.

Тот набор, которому соответствует это значение, содержит в себе наиболее различные отображения. Далее для k выбранных отображений производится предподсчет таблиц поиска. В условиях съемки происходит оценка спектра излучения, после чего происходит его классификация к ближайшей таблице из предподсчитанных. Наконец, полученным цветам из RGB ставятся

в соответствие цвета из CIE XYZ с помощью выбранной таблицы поиска.

Для кластеризации отображений необходим критерий их схожести. Следует отметить, что сравнивать матрицы поэлементно бессмысленно, так как, на первый взгляд, похожие матрицы могут порождать совершенно разные пространства, и наоборот. Сама же замена нескольких близких отображений одним дает возможность экономии памяти без существенных потерь точности цветовой коррекции.

В следующем разделе мы предлагаем пример критерия схожести отображений, с помощью которого удобно производить их кластеризацию.

КРИТЕРИЙ СХОЖЕСТИ ОТОБРАЖЕНИЙ

Введем критерий схожести двух отображений:

$$\Delta_{ij} = \max_{c_i \in C} \|M_i p(c_i) - M_j p(c_i)\|_2 = \max_{c_i \in C} \|(M_i - M_j)p(c_i)\|_2, \quad (8)$$

где M_i, M_j – матрицы, задающие отображения из цветового пространства RGB в пространство CIE XYZ; C – единичный RGB-куб (рис. 4).

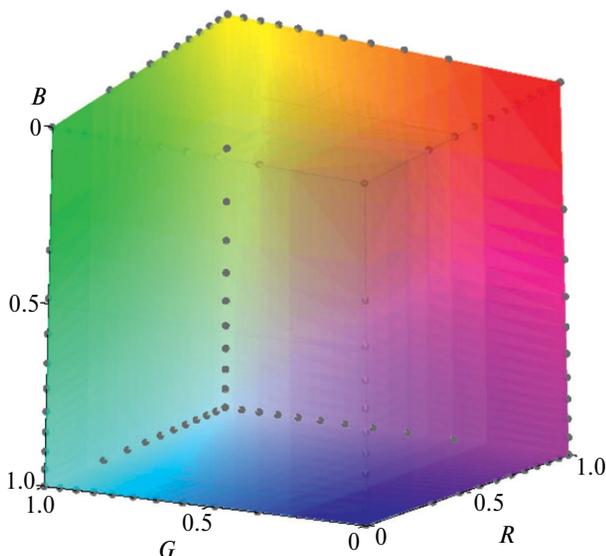


Рис. 4. Единичный RGB-куб.

Критерий (8) представляет собой максимальное евклидово расстояние между цветами, порожаемыми двумя отображениями, т.е. цветовую невязку между этими отображениями в худшем случае.

ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ КРИТЕРИЯ

Аналитическое вычисление критерия (8) затруднительно, а численное предполагает 3D-оптимизацию. Следующая теорема, вдохновленная схожим примером в (Коноваленко, 2021), позволяет свести эту задачу к 2D-оптимизации с помощью замены $M_i - M_j = A$, что значительно ускоряет работу алгоритма оптимизации.

Теорема. Максимум функции $\max_{c \in C} \|Ap(c)\|_2$ на единичном кубе C , где A – некоторая матрица, а $p(c)$ обладает свойством шкалируемости (6), достигается на трех гранях этого куба F , содержащих точку $(1, 1, 1)$:

$$\max_{c \in C} \|Ap(c)\|_2 = \max_{c \in F} \|Ap(c)\|_2. \quad (9)$$

Доказательство. Проведем доказательство от противного. Пусть максимум функции $\|Ap(c)\|_2$ на C не достигается на F :

$$\max_{c \in C} \|Ap(c)\|_2 \neq \max_{c \in F} \|Ap(c)\|_2. \quad (10)$$

Так как $C \supset F$, то:

$$\max_{c \in C} \|Ap(c)\|_2 \geq \max_{c \in F} \|Ap(c)\|_2. \quad (11)$$

Из (10) и (11) следует, что:

$$\max_{c \in C} \|Ap(c)\|_2 > \max_{c \in F} \|Ap(c)\|_2. \quad (12)$$

Тогда максимум достигается в некоторой точке $c^* \in C \setminus F$, т.е.

$$\|Ap(c^*)\|_2 = \max_{c \in C} \|Ap(c)\|_2 > \max_{c \in F} \|Ap(c)\|_2. \quad (13)$$

Пусть сначала $c^* = 0$. Тогда, в силу (13), свойства однородности 1-й степени $p(c)$ (6) и неотрицательности модуля, можно записать следующее:

$$0 = \|Ap(c^*)\|_2 > \max_{c \in F} \|Ap(c)\|_2 \geq 0. \quad (14)$$

Получено противоречие, а именно $0 > 0$, следовательно, в этом случае верно доказываемое равенство $\max_{c \in C} \|Ap(c)\|_2 = \max_{c \in F} \|Ap(c)\|_2$.

Пусть далее $c^* \neq 0$. Так как множество F представляет собой 3 грани единичного куба C , содержащие точку $(1, 1, 1)$, то принадлежащий этому кубу за вычетом F ненулевой вектор c^* можно удлинить так, чтобы он достиг F . То есть существует такое $k > 1$, что $\tilde{c} = kc^* \in F$.

Так как $\tilde{c} \in F$, то:

$$\|Ap(\tilde{c})\|_2 \leq \max_{c \in F} \|Ap(c)\|_2. \quad (15)$$

Учитывая вышесказанное, а также зная, что $p(c)$ обладает свойством однородности 1-й степени (6), запишем:

$$\begin{aligned} \max_{c \in C} \|Ap(c)\|_2 &\leq k \max_{c \in C} \|Ap(c)\|_2 = k \|Ap(c^*)\|_2 = \\ &= \|Akp(c^*)\|_2 = \|Ap(\tilde{c})\|_2 \leq \max_{c \in F} \|Ap(c)\|_2. \end{aligned} \quad (16)$$

Т.е.:

$$\max_{c \in C \setminus F} \|Ap(c)\|_2 \leq \max_{c \in F} \|Ap(c)\|_2. \quad (17)$$

Получено противоречие с (12). Таким образом, верно доказываемое равенство:

$$\max_{c \in C} \|Ap(c)\|_2 = \max_{c \in F} \|Ap(c)\|_2. \quad (18)$$

Теорема доказана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предлагается подход к эффективному использованию таблиц поиска на основе кластеризации отображений. Отбирая лишь наиболее непохожие отображения, мы сокращаем количество требуемой памяти с не критичными потерями в точности. Кластеризацию мы предлагаем осуществлять на основе введенного нами критерия схожести отображений. Для оптимизации вычисления критерия мы предлагаем перейти от 3D-оптимизации к 2D-оптимизации и доказываем, что это не приведет к потере точности. Таким образом, нами предложен метод вычислительно эффективной адаптивной цветовой коррекции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Коноваленко И. А. *Критерии и алгоритмы вычисления точности проективной нормализации изображений*. Дисс. канд. физ.-мат. наук. М., 2021. 136 с.

Николаев Д.П., Николаев П.П., Гладилин С.А., Божкова В.П. *Основы цветовой теории в техническом зрении. I. Введение в цветовую теорию*. М.: Мир науки, 2021. 40 с.

Николаев П.П., Николаев Д.П., Гладилин С.А., Басова О.А., Ярыкина М.С. *Сборник задач по обработке изображений и техническому зрению*. М.: 2023. 78 с.

Шашлов А.Б. *Основы светотехники*. М.: Логос, 2016. 256 с.

Fernando R., Matt P. *GPU Gems 2: Programming Techniques for High-Performance Graphics and General-Purpose Computation*. Addison-Wesley Professional, 2005. 814 p.

Finlayson G.D., Michal M., Anya H. Root-polynomial colour correction. *Color and Imaging Conference*. Society of Imaging Science and Technology, 2011. V. 19. P. 115–119.

Gasparini F., Schettini R. Color correction for digital photographs. *12th International Conference on Image Analysis and Processing, 2003. Proceedings*. IEEE, 2003. P. 646–651. DOI: 10.1109/ICIAP.2003.1234123

Han D. Real-time color gamut mapping method for digital TV display quality enhancement. *IEEE Transactions on consumer Electronics*. IEEE, 2004. V. 50. P. 691–698. DOI: 10.1109/TCE.2004.1309450

Ives H.E. The transformation of color-mixture equations from one system to another. *Journal of the Franklin Institute*. 1915. V. 180. P. 673–701.

Kim Y.T., Cho Y.H., Lee C.H., Ka Y.H. Color look-up table design for gamut mapping and color space conversion. *International Conference on Digital Production Printing and Industrial Applications*. 2003. P. 28–29.

Luther R. Aus dem gebiet der farbreizmetrik, *Zeitschrift fur Technishe Physik*. 1927. V. 12. P. 540–558.

Mantiuk R., Mantiuk R., Tomaszewska A., Heidrich W. Color correction for tone mapping. *Computer graphics forum*. Oxford. Blackwell Publishing Ltd, 2009. V. 50. P. 193–202.

Moroney N. Local color correction using non-linear masking. *Color and Imaging conference*. California. Society of Imaging Science and Technology, 2000. V. 8. P. 108–111.

Morovic J., Luo M.R. The fundamentals of gamut mapping: A survey. *Journal of Imaging Science and Technology*. Derby. The Society for Imaging Science and Technology, 2001. V. 45. P. 283–290.

Sari Y.A., Ginardi R.V. H., Suciati N. Color correction using improved linear regression algorithm. *2015 International Conference on Information & Communication Technology and Systems (ICTS)*. IEEE, 2015. P. 73–78. DOI: 10.1109/ICTS.2015.7379874.

Solomatov G., Akkaynak D. Spectral Sensitivity Estimation Without a Camera. *2023 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*. IEEE, 2023. P. 1–12. DOI: 10.1109/ICCP56744.2023.10233713

Soshin K.V., Nikolaev D.P., Ershov E.I., Tchobanou M.K. *A scalable rational color correction for an image*. Patent RF. № WO2023121500A1. 2023.

COMPUTATIONALLY EFFICIENT ADAPTIVE COLOR CORRECTION

M. V. Kharkevich^{1, 2,*}, O. A. Basova¹ and I. A. Konovalenko³¹ Institute for Information Transmission Problem RAS, 127051, Moscow, Bolshoy Karetny lane, 19, Russia² Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University) 141700, Dolgoprudny, Institutskiy lane, 9, Russia³ Federal Research Center "Informatics and Management" RAS, Vavilova st. 44, b. 2, 119333, Moscow, Russia

*E-mail: kharkevich@iitp.ru

To obtain a photo that reproduces the original scene as accurately as possible, it is necessary to solve the problem of color correction, that is, to find a mapping that translates the coordinates of the camera color space (RGB) into the coordinates of the human color space (CIE XYZ). In this article, we consider color correction using lookup tables, pre-built for various lighting conditions. This approach allows you to achieve high speed and accuracy when applying color correction on the device, but requires large amounts of RAM, which, for example, mobile phones do not have. We propose a method for automatic thinning of a set of search tables without loss of accuracy of color correction. The method is based on clustering of the mappings that specify the color correction. To compare the mappings, we propose a criterion for their similarity based on the maximum difference of the generated colors in the target space of a standard CIE XYZ observer. For the proposed criterion, the article provides an effective calculation method and, together with a theorem justifying the correctness of the method.

Keywords: adaptive color correction, similarity criterion of mapping, lookup table, mathematical programming, clustering

REFERENCES

- Konovalenko I.A. *Kriterii i algoritmy vychisleniya tochnosti proektivnoy normalizacii izobrazhenij* [Criteria and algorithms for calculating the accuracy of projective normalization of images]. PhD thesis. Moscow, 2021. 136 p. (in Russian).
- Nikolaev D.P., Nikolaev P.P., Gladilin S.A., Bozhkova V.P. *Osnovy cvetovoy teorii v tekhnicheskome zrenii. I. Vvedenie v cvetovuyu teoriyu* [Fundamentals of color theory in technical vision. I. Introduction to Color Theory]. Moscow, Mir nauki, 2021. 40 p. (in Russian).
- Nikolaev P.P., Nikolaev D.P., Gladilin S.A., Basova O.A., Yarykina M.S. *Sbornik zadach po obrabotke izobrazhenij i tekhnicheskome zreniyu* [Collection of tasks on image processing and technical vision]. Moscow, 2023. 78 p. (in Russian).
- Shashlov A.B. *Osnovy svetotekhniki* [Fundamentals of lighting engineering]. Moscow: Logos, 2016. (in Russian).
- Fernando R., Matt P. *GPU Gems 2: Programming Techniques for High-Performance Graphics and General-Purpose Computation*. Addison-Wesley Professional, 2005. 814 p.
- Finlayson G.D., Michal M., Anya H. Root-polynomial colour correction. *Color and Imaging Conference*. Society of Imaging Science and Technology, 2011. V. 19. P. 115–119.
- Gasparini F., Schettini R. Color correction for digital photographs. *12th International Conference on Image Analysis and Processing, 2003. Proceedings*. IEEE, 2003. P. 646–651. DOI: 10.1109/ICIAP.2003.1234123
- Han D. Real-time color gamut mapping method for digital TV display quality enhancement. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. IEEE, 2004. V. 50. P. 691–698. DOI: 10.1109/TCE.2004.1309450
- Ives H.E. The transformation of color-mixture equations from one system to another. *Journal of the Franklin Institute*. 1915. V. 180. № 6. 673–701.
- Kim Y.T., Cho Y.H., Lee C.H., Ka Y.H. Color look-up table design for gamut mapping and color space conversion. *International Conference on Digital Production Printing and Industrial Applications*. 2003. P. 28–29.
- Luther R. Aus dem gebiet der farbreizmetrik, *Zeitschrift fur Technishe Physik*. 1927. V. 12. P. 540–558.
- Mantiuk R., Mantiuk R., Tomaszewska A., Heidrich W. Color correction for tone mapping. *Computer graphics forum*. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2009. V. 50. P. 193–202.
- Moroney N. Local color correction using non-linear masking. *Color and Imaging conference*. California. Society of Imaging Science and Technology, 2000. V. 8. P. 108–111.
- Morovic J., Luo M.R. The fundamentals of gamut mapping: A survey. *Journal of Imaging Science and Technology*. Derby. The Society for Imaging Science and Technology, 2001. V. 45. P. 283–290.
- Sari Y.A., Ginardi R.V. H., Suciati N. Color correction using improved linear regression algorithm. *2015 International Conference on Information & Communication Technology and Systems (ICTS)*. IEEE, 2015. P. 73–78. DOI: 10.1109/ICTS.2015.7379874
- Solomatov G., Akkaynak D. Spectral Sensitivity Estimation Without a Camera. *2023 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*. IEEE, 2023. P. 1–12. DOI: 10.1109/ICCP56744.2023.10233713.
- Soshin K.V., Nikolaev D.P., Ershov E.I., Tchobanou M.K. *A scalable rational color correction for an image*. Patent RF. № WO2023121500A1. 2023.