

Малопараметрический алгоритм цветовой коррекции изображений в дифракционно-оптических системах

М.В. Петров
Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С.П. Королева
Самара, Россия
max.vit.petrov@gmail.com

П.Г. Серафимович
Институт систем обработки изображений РАН – филиал
ФНИИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН
Самара, Россия
paulserch05@gmail.com

Аннотация—Компактные и легкие ДОЭ (дифракционные оптические элементы) являются перспективной заменой длиннофокусной рефракционной оптики в системах компьютерного зрения, например, в беспилотных летательных аппаратах и наноспутниках. Существенные оптические искажения сужают область применения ДОЭ. Однако, компьютерная постобработка изображений позволяет их компенсировать. Настоящая работа посвящена развитию методов коррекции цветových искажений в таких оптических системах. Предложен малопараметрический алгоритм цветовой коррекции на основе цветокорректирующей матрицы и тонокорректирующего сплайна.

Ключевые слова—Дифракционный оптический элемент, ДОЭ, хроматическая аберрация, цветовая коррекция, сплайн

1. ВВЕДЕНИЕ

Методы вычислительной фотографии позволяют значительно улучшить качество изображений, получаемых с использованием плоской дифракционной оптики или металинз [1-4]. Наряду с прогрессом в задачах повышения качества изображений [5], одной из важнейших задач при обработке цвета изображений является задача обеспечения похожести цветов на изображениях, полученных с различных камер [6]. Проблема обеспечения схожести цветов при различных способах регистрации или синтеза изображения важна как при обработке фото и видеоданных с различных источников [3], так и при анализе данных дистанционного зондирования Земли [7, 8].

Задача обеспечения цветовой схожести заключается в построении преобразования, которое цвета исходного изображения сделает похожими на цвета целевого изображения. В нашем случае исходным изображением является изображение, полученное с использованием ДОЭ, а целевым – цифровое изображение. Стенд для получения снимков и оценки качества коррекции состоит из устройства вывода (монитор с диагональю экрана 27 дюймов и разрешением 3840 на 2160 пикселей) и камеры с установленным дифракционным объективом.

2. АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ НА ОСНОВЕ ЦВЕТКОРРЕКТИРУЮЩЕГО СПЛАЙНА И МАТРИЦЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В работе [9] авторы предложили обобщенную модель конвейера для цифровых устройств регистрации изображений:

$$I = (\mathbf{A} \cdot I_{lin})^{1/\gamma} \quad (1)$$

где I_{lin} – координаты цветового пространства, соответствующие цвету точки линейного изображения, считываемого датчиком камеры после демозаики; I – координаты цветового пространства, соответствующие цвету точки выходного изображения; \mathbf{A} – 3×3 -матрица, несущая информацию о цвете и балансе белого для наиболее распространенного случая трехмерных цветовых пространств; значение γ определяет степенную функцию (гамма-коррекцию).

Запишем уравнение (1) для наших изображений:

$$\begin{aligned} I_R &= (\mathbf{A}_R \cdot I_{Rlin})^{1/\gamma} \\ I_D &= (\mathbf{A}_D \cdot I_{Dlin})^{1/\gamma} \end{aligned} \quad (2)$$

где I_R – цифровые изображения, I_D – исходные снимки с использованием ДОЭ (дифракционного оптического элемента). Показатель γ будем считать одинаковым. Тогда:

$$\begin{aligned} I_{Rdg} &= \mathbf{A}_R \cdot I_{Rlin} \\ I_{Ddg} &= \mathbf{A}_D \cdot I_{Dlin} \end{aligned} \quad (3)$$

Изображения I_{Rdg} и I_{Ddg} содержат одну и ту же сцену, однако, вследствие сильной хроматической аберрации и расфокусировки сцены в значительной степени отличаются в деталях. Обозначим I_{Rdg}^+ часть изображения I_{Rlin} , которая совпадает с I_{Ddg} . Предположим, что существует функция $S()$ и матрица \mathbf{A}_S , которые позволяют получить из I_{Dlin} изображение I_{Rdg}^+ . Тогда:

$$I_{Rdg}^+ = S(\mathbf{A}_S I_{Dlin}) \quad (4)$$

Тогда с использованием (3) и (4) можно записать следующее равенство:

$$I_{Ddg} = \mathbf{H} S^{-1}(I_{Rdg}^+), \mathbf{H} = \mathbf{A}_D \mathbf{A}_S^{-1} \quad (5)$$

Предлагаемая в работе процедура цветовой стабилизации состоит из трех последовательных этапов:

получение пар координат в цветовом пространстве для соответствующих цветов исходного и целевого изображений; построение и применение тонокорректирующей кривой $S^{-1}()$, построение и применение матрицы цветового преобразования \mathbf{H} .

Построение цветовой сегментации для обоих изображений выполняется на основе алгоритма FastSLIC [10]. Изображения, полученные с использованием ДОО, сначала обрабатываются методом обратной свертки [11] с целью компенсации расфокусировки изображения. Далее осуществляется цветовая сегментация изображений. С использованием найденных координат формируются цветовые триплеты целевых изображений и триплеты исходных обработанных изображений, полученных с использованием ДОО.

Для построения кривой тоновой коррекции полученные триплеты преобразуются в градации серого согласно [12]. Для построения аппроксимирующей кривой используется одномерный В-сплайн третьего порядка с добавлением явных внутренних узлов [13] (внутренний узел, соответствующий середине диапазона изменения яркости 0,5). Это позволяет получать так называемую s -кривую, которая позволяет вносить разную коррекцию в разные области яркости изображений. Полученный сплайн применяется для коррекции яркостных значений всех пикселей исходного изображения I_{Ddg} вместе с соответствующими исходному изображению значениями отобранных пар цветов. Пример полученного сплайна приведен на рис. 1.

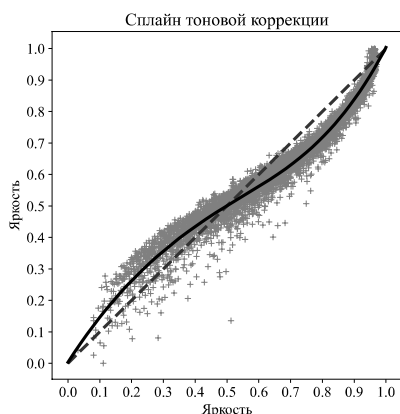


Рис. 1. Кривая тоновой коррекции

Далее осуществляется вычисление матрицы цветового преобразования \mathbf{H} методом наименьших квадратов.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

В качестве экспериментальных данных использовался набор из 1857 изображений, разделенных на обучающую (1485 изображений) и тестовую (372 изображения) выборки. Обучающая выборка использовалась для формирования набора цветовых триплетов. Разница между исходным и целевым изображением на тестовой выборке составила 8,65 dE в среднем, в результате обработки разница уменьшилась до 6,55 dE. Съемка наборов данных велась также с

использованием мобильных камер Huawei P30 Pro, P40 Pro и Xiaomi Mi 12S Ultra.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложен новый метод цветовой коррекции и обеспечения цветового постоянства для изображений с неизвестной моделью формирования. Метод основан на последовательном применении сплайна тоновой коррекции и цветокорректирующей матрицы. Предложенный подход позволил уменьшить цветовую разницу на тестовой выборке с 8,65 dE до 6,55 dE.

БЛАГОДАРНОСТИ

Разработка методов цветовой коррекции выполнена при поддержке гранта РФФ 22-19-00364, экспериментальная часть поддержана грантом РФФИ МК 19-29-09054.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Engelberg, J. The advantages of metalenses over diffractive lenses / J. Engelberg, U. Levy // Nature communications – 2020. – Vol. 11(1).
- [2] Ivliev, N. First Earth-Imaging CubeSat with Harmonic Diffractive Lens / N. Ivliev, V. Evdokimova, V. Podlipnov, M. Petrov, S. Ganchevska, I. Tkachenko, D. Abrameshin, Yu. Yuzifovich, A. Nikonorov, R. Skidanov, N. Kazanskiy, V. Soifer // Remote Sensing – 2022. – Vol. 14(9).
- [3] Petrov, M. Color correction with 3D lookup tables in diffractive optical imaging systems / M. Petrov, S. Bibikov, Y. Yuzifovich, R. Skidanov, A. Nikonorov // Procedia engineering. – 2017. – Vol. 201. – P. 73-82.
- [4] Nikonorov, A. Deep Learning-Based Imaging using Single-Lens and Multi-Aperture Diffractive Optical Systems / A. Nikonorov, V. Evdokimova, M. Petrov, P. Yakimov, S. Bibikov, Y. Yuzifovich, R. Skidanov, N. Kazanskiy. // 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshop (ICCVW). – 2019. – P. 3969-3977.
- [5] Dudhane, A. Burst Image Restoration and Enhancement / A. Dudhane, S.W. Zamir, S. Khan, F.S. Khan, M.-H. Yang // 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2022. – P. 5759-5768.
- [6] Rodríguez, R.G. Color Matching Images With Unknown Non-Linear Encodings / R.G. Rodríguez, J. Vazquez-Corral, M. Bertalmío // IEEE Transactions on Image Processing. – 2020. – Vol. 29. – P. 4435-4444.
- [7] Dziembowski, A. Color Correction for Immersive Video Applications / A. Dziembowski, D. Mieloch, S. Rózek, M. Domański // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 75626-75640.
- [8] Xia, M. Color Consistency Correction Based on Remapping Optimization for Image Stitching / M. Xia, J. Yao, R. Xie, M. Zhang, J. Xiao // 2017 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW). – 2017. – P. 2977-2984.
- [9] Bianco, S. Color space transformations for digital photography exploiting information about the illuminant estimation process / S. Bianco, A. Bruna, F. Naccari, R. Schettini // J. Opt. Soc. Amer. A – 2012. – Vol. 29(3). – P. 374-384.
- [10] Achanta, R. SLIC Superpixels Compared to State-of-the-Art Superpixel Methods / R. Achanta, A. Shaji, K. Smith, A. Lucchi, P. Fua, S. Süsstrunk // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence – 2012. – Vol.34(11). – P. 2274-2282.
- [11] Nikonorov, A. Comparative Evaluation of Deblurring Techniques for Fresnel Lens Computational Imaging / A. Nikonorov, M. Petrov, S. Bibikov, Y. Yuzifovich, P. Yakimov, N. Kazanskiy, R. Skidanov, V. Fursov. // International Conference on Pattern Recognition (ICPR). – 2016. – P. 775-780.
- [12] IEC 61966-2-1: Multimedia systems and equipment – Colour measurement and management – Part 2-1: Colour management – Default RGB colour space – sRGB, 1999. – 51 p.
- [13] Dierckx, P. Curve and Surface Fitting with Splines – Oxford University Press, 1993. – 285 p.