

Баланс белого для детектирования голограмм на цветных изображениях черно-белых фотографий*

Д. В. Полевой^{I, III, V}, Е. И. Панфилова^{II, IV}, Д. П. Николаев^{I, II, VI}

^I ООО Смарт Энджинс Сервис, Москва, Россия

^{II} Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва, Россия

^{III} Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия

^{IV} Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

^V Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

^{VI} Московский физико-технический институт (НИУ), Долгопрудный, Россия

Аннотация. В работе на примере изображений монохромных фотографий владельца защищенного документа рассматривается возможность использования априорной информации об однородной окраске области документа для компенсации искажений баланса белого. Искажения такого рода вносятся подсистемой автоматического баланса белого и представляют собой неконтролируемые изменения цветовых характеристик изображения от кадра к кадру при съемке мобильным устройством. Поскольку ключевым признаком наличия визуально изменяющихся элементов защищенных документов является появление и исчезновение цветов высокой насыщенности при съемке под разными углами, цветовые искажения снижают точность алгоритмов, опирающихся на измерения насыщенности цветов. Предложенный метод цветокоррекции компенсирует цветовые искажения и повышает контраст цветовой насыщенности между незащищенными областями фотографии и областями, покрытыми визуально изменяющимся изображением на защитной пленке. Результаты работы метода проверяются на эталонных данных, полученных с использованием мобильного устройства.

Ключевые слова: баланс белого, цветокоррекция цифровых изображений, визуально-изменяющиеся защитные элементы.

DOI 10.14357/20718632210308

Введение

Для проведения транзакций в системах дистанционного обслуживания с помощью мобильных устройств могут использоваться как фотографические автопортреты («селфи») пользователя, так и изображения документов, удостоверяющих его личность [1-3]. Недобросовестные пользователи могут использовать подложные документы, поэтому актуальной

задачей является противодействие атакам на предъявление снимаемых документов (контроль их подлинности) [4]. Полный цикл распознавания изображения документа в видеопотоке на мобильном устройстве [5] обеспечивает максимальную защиту персональных данных и позволяет детектировать различные визуально наблюдаемые элементы защиты [6-8]. Точная локализация зон характерных для защитных

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках проектов 19-29-09092 и 19-29-09075.

элементов цветовых искажений может использоваться для выбора лучшего изображения фотографии владельца документа [9], оценки качества изображения документа [10] или яркостной нормализации изображения лица [11].

В работах [12; 13] для детектирования в видеопотоке визуально изменяющихся защитных элементов (OVD), а именно голограмм и кинеграм, анализируются последовательности геометрически нормализованных на каждом кадре изображений документа. В работе [12] предполагается, что яркость пикселей изображения в области видимой голограммы изменяется между кадрами последовательности сильнее, чем в области бланка документа. По наблюдению авторов работы блики от источников освещения тоже повышают изменчивость яркости, что приводит к ложным срабатываниям детектора голограмм. Отметим, что изменения цвета в области защитного элемента (Рис. 1, б) не всегда сопровождается заметным изменением яркости (Рис. 1, в) или цветовой насыщенности (Рис. 1, г)¹.

Для уменьшения влияния нейтральных («белых») бликов на точность детектора голограмм в патенте [13] предлагается оценивать изменение взвешенной гистограммы цветового тона каждого пикселя во времени (между кадрами). Вес пикселя определяется цветовой насыщенностью, поэтому нейтральные блики такой вес уменьшают.

Далее будут рассматриваться документы с черно-белой фотографией владельца. Анализируемые визуально изменяющиеся защитные элементы документов при изменении углов освещения и наблюдения выглядят на них как области с радужными переливами и цветными бликами. При правильном балансе белого на изображении фотографии владельца области защитных элементов должны иметь цветовую насыщенность (saturation) выше, чем у фотографии владельца. Если методы детектирования защитных элементов на изображении документа в видеопотоке могут опираться на межкадровые изменения наблюдаемого цвета области, то на отдельном изображении области защитных элементов в рамках цветового анализа могут быть выделены только по более высокой цветовой насыщенности.

¹ Рис. 1-4, 7 и 9 см. на цветной вкладке в конце статьи (страницы 91-92).

Изменения условий освещения и автоматическая подстройка камерой баланса белого во время съемки могут приводить к цветовым искажениям разной степени выраженности. На примере (Рис. 1, г) видно, что в результате неадекватной работы подсистемы автоматического баланса белого в нижней половине изображения область защитного элемента имеет цветовую насыщенность даже ниже, чем черно-белая фотография.

На Рис. 2 представлены исследуемые изображения ч/б фотографий владельца документа.

Голографические защитные элементы имеют незначительную площадь на изображениях 1-4, значительную площадь на изображениях 5-8 и отсутствуют на изображениях 9-12. Для каждого примера вручную нарисованная маска «цветных» пикселей, по маске визуализированы зоны «серого» и «цветного», пример показан на Рис. 3.

Естественные физико-химические процессы старения могут приводить к изменениям окраски фотографии владельца: со временем бумага желтеет, а пигмент выцветает и приобретает отличный от серого оттенок. В такой ситуации цветовая насыщенность изображения фотографии владельца повышается, независимо от наличия защитных элементов (Рис. 2 пример 9).

Даже при существенном искажении баланса белого и/или изменении окраски самой фотографии человек, глядя на цветное изображение черно-белой фотографии, отчетливо видит области «цветных» бликов. Это свидетельствует о возможности уменьшения цветовых искажений. В то же время цветовые искажения негативно влияют на качество работы методов детектирования защитных элементов на изображениях документов, поэтому задача правильной коррекции баланса белого является актуальной.

1. Коррекция баланса белого

Многие прикладные задачи компьютерного зрения, связанные с распознаванием объектов по их внешнему виду, требуют инвариантных по отношению к условиям освещенности и геометрии сцены методов оценки окраски объектов на основе зарегистрированного изображения. Обеспечение инвариантности такого рода («цветовой константности»), обычно

рассматривается как решение двух следующих связанных задач: оценка параметров освещения и цветовая коррекция к некоторым фиксированным условиям освещения. В данной работе коррекция баланса белого будет рассматриваться как коррекция изображения к условиям освещения «белым» светом. На практике для коррекции баланса белого наиболее широко используются линейные модели [14]. Далее будет показано, что цветовые распределения рассматриваемых изображений не соответствуют линейной модели коррекции баланса белого, а для точной коррекции требуется преобразование более сложное, чем линейное.

1.1. Линейность цветовых распределений

При съемке документа камерой мобильного устройства геометрию освещения и наблюдения в области фотографии владельца можно считать фиксированной, поскольку фотография владельца занимает небольшую часть изображения. Это позволяет анализировать цифровые изображения черно-белых фотографий владельца с использованием описанной в работе [15] математической модели для описания формы цветовых распределений [16] отсканированных изображений цветных документов. Согласно этой модели, области однородной окраски порождают взвешенную сумму собственного цвета и «белого» цвета бумаги, то есть регистрируемые сенсором цвета в цветовом пространстве камеры будут лежать на прямой, соединяющей белую точку (цвет бумаги) и черную точку (цвет краски). Цвет бумаги может отличаться от белого, цвет краски от черного, поэтому в общем случае главная ось цветового распределения лежит на прямой, не проходящей через точку начала системы цветовых координат.

1.2. Мультипликативные модели коррекции баланса белого

Простейшим и широко используемым на практике решением задачи коррекции баланса белого является использование предложенной Йоханесом фон Крисом (Johannes von Kries) модели цветовой адаптации [14], в которой постулируется независимость работы сенсоров (колбочек) в каждом из каналов регистрации, а изменение параметров осветителя учитывается изменением коэффициента усиления в канале.

В этом случае коррекция баланса белого задается обратимой матрицей 3×3 S , описывающей линейное преобразование из \vec{f} в \vec{f}' цветовых координат в некотором линейном цветовом пространстве.

$$\vec{f}' = S\vec{f} \quad (1)$$

В качестве референтного метода мультипликативной цветокоррекции используем оценку параметров баланса белого в модели «серого мира» (Gray World Assumption) [17; 14]. Коэффициенты масштабирования $S = \text{diag}(\sigma_i)$ вычисляются по формуле $\sigma_i = \frac{\sum_{j=1}^3 OM_j}{3OM_i}$, где компоненты центра цветового распределения $\vec{OM} = \mathbb{E}(\vec{f})$ находятся, как математическое ожидание цвета на изображении. Пример коррекции цвета с использованием мультипликативной модели баланса белого («серый мир») показан на Рис. 4.

Рассмотрим качественно цветовые распределения изображения до и после мультипликативной коррекции баланса белого. В RGB -кубе оттенкам серого соответствуют точки на главной диагонали, поэтому после коррекции баланса белого основная часть цветового распределения должна располагаться вдоль главной диагонали -куба. Общим свойством линейных преобразований вида (1) является неподвижность точки $O = (0, 0, 0)$. Поэтому если цветовое распределение исходного изображения лежит на прямой, не проходящей через точку начала координат O (Рис. 5, а), то после любой мультипликативной коррекции баланса белого главная ось распределения будет отклоняться от главной диагонали -куба (Рис. 5, б).

Без ограничения общности можно считать, что подстройка баланса белого при съемке мобильным устройством осуществляется при помощи неизвестного линейного преобразования цветовых координат вида (1), поэтому компенсацию ошибки баланса белого можно осуществить линейным преобразованием. Однако известен ряд случаев, например, съемка в тумане [18] или подводная съемка [19; 20], при которых главная ось цветового распределения не проходит через точку O . Как было показано в разделе 1.1 для изображения фотографии владельца документа главная ось цветового

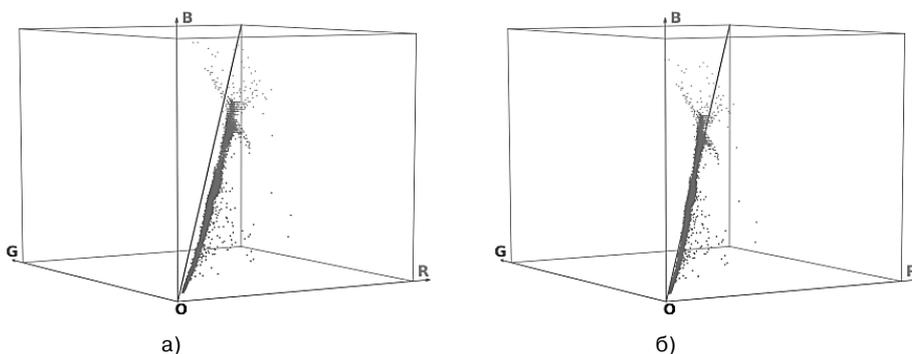


Рис. 5. Визуализация цветового распределения примера 1

а) для исходного изображения, б) для изображения после мультипликативной коррекции баланса белого

распределения тоже может не проходить через точку O . Это означает, что цвет части пикселей изображения ч/б фотографии будет отличаться от серого при любом варианте мультипликативной цветокоррекции. Если в общем случае главная ось цветового распределения s не проходит через точку O , для коррекции баланса белого необходимо использовать более сложную, чем линейную модель.

1.3. Аддитивно-мультипликативные модели коррекции баланса белого

Пусть коррекция баланса белого представляется в виде аффинного преобразования цветовых координат вида

$$\vec{f}' = S\vec{f} + \vec{b} \quad (2)$$

Пример такого метода цветокоррекции с поворотом цветового распределения («color cluster rotation») предложен в работе [21] для сцен с преимущественно серо окрашенными объектами. В этой работе для цветового распределения в RGB -кубе строится такое преобразование, чтобы после коррекции главная ось распределения стала выровнена вдоль главной диагонали цветового куба. Преобразование представляется комбинацией переноса центра распределения в начало координат, поворота относительно начала координат и переноса центра распределения вдоль главной диагонали цветового куба. В векторной форме для исходного цвета \vec{f} результат коррекции баланса белого \vec{f}' представим в виде

$$\vec{f}' = A^{-1}\tilde{R}A(\vec{f} - \vec{OM}) + A^{-1}\tilde{R}A\vec{OM},$$

где A - матрица перехода из системы цветовых координат (ЦК) $linRGB$ в ЦК RG, BY, WB (red-green, blue-yellow, white-black), \tilde{R} - матрица поворота.

Каких-либо теоретических обоснований именно такого метода авторы не приводят.

2. Предлагаемый метод аддитивно-мультипликативной коррекции баланса белого

Построим сохраняющее яркостные характеристики изображения преобразование вида (2). Обозначим центр цветового куба как точку C , $\vec{OC} = (\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$. Пусть направляющий вектор главной оси цветового RGB -куба $\vec{d} = \frac{\vec{OC}}{\|\vec{OC}\|} = \frac{1}{\sqrt{3}}(1, 1, 1)$. Пусть плоскость δ проходит через точку C и имеет нормаль \vec{d} (Рис. 6).

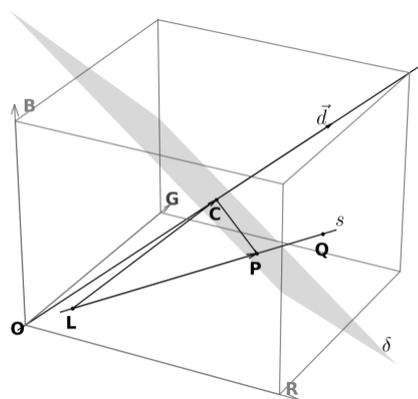


Рис. 6. Геометрическая схема оценки параметров

Пусть главная ось распределения s проходит через точки L и Q , тогда направляющий вектор этой прямой $\vec{s} = (s_1, s_2, s_3) = \frac{\vec{LQ}}{\|\vec{LQ}\|}$. Пусть точка $P = s \cap \delta$ определяется пересечением прямой s и плоскости δ и является образом серой точки. Тогда для некоторого числа λ выполняется

$$\vec{OP} = \vec{OL} + \lambda \vec{s} \quad (3)$$

Искомое преобразование переводит образ серой точки P в центр цветового RGB-куба, точку C . Для вычисления положения точки P рассмотрим плоскость LCP (Рис. 6), в которой $\vec{LC} + \vec{CP} = \lambda \vec{s}$. Умножив скалярно на \vec{d} получим $(\vec{d}, \vec{LC}) + (\vec{d}, \vec{CP}) = \lambda(\vec{d}, \vec{s})$. По определению $\vec{CP} \in \delta$ и $\vec{d} \perp \delta$ следовательно $(\vec{d}, \vec{CP}) = 0$ и $(\vec{d}, \vec{LC}) = \lambda(\vec{d}, \vec{s})$, откуда

$$\lambda = \frac{(\vec{d}, \vec{LC})}{(\vec{d}, \vec{s})} \quad (4)$$

Подставляя 4 в формулу 3, получаем

$$\vec{OP} = \vec{OL} + \frac{(\vec{d}, \vec{LC})}{(\vec{d}, \vec{s})} \vec{s} \quad (5)$$

Аддитивно-мультипликативная коррекция баланса белого описывается выражением

$$\vec{f}' = \mathbf{S}(\vec{f} - \vec{OP}) + \vec{OC} = \mathbf{S}\left(\vec{f} - \vec{OL} - \frac{(\vec{d}, \vec{LC})}{(\vec{d}, \vec{s})} \vec{s}\right) + \vec{OC},$$

где $\mathbf{S} = \text{diag}(\sigma_i)$ - диагональная матрица, коэффициенты которой рассчитываются по формуле

$$\sigma_i = \frac{\sum_{j=1}^3 s_j}{3s_i}, i = \{1, 2, 3\} \quad (6)$$

Общая схема аддитивно-мультипликативной коррекции баланса белого состоит из следующих шагов:

1. сбор статистики цветового распределения;
2. определение положения главной оси s цветового распределения в цветовом пространстве;
3. вычисление положения образа серой точки P ;
4. сдвиг цветового распределения на вектор \vec{PO} см. формулу (3) для совмещения точки P с началом координат O ;
5. масштабирование по осям с коэффициентами σ_i , см. формулу (6);
6. сдвиг распределения на вектор \vec{OC} .

Технические детали реализации аддитивно-мультипликативной коррекции баланса белого и эксперименты рассматриваются в следующем разделе. На Рис. 7 приведены примеры коррекции баланса белого с использованием аддитивно-мультипликативной модели.

3. Эксперименты

3.1. Цветовая система координат linRGB

Без ограничения общности можно считать, что рассматриваемые входные изображения закодированы с использованием ЦСК sRGB [14]. Тогда для анализа и коррекции баланса белого целесообразно использовать близкую ЦЦК linRGB. Для перехода из sRGB в linRGB будем использовать следующее соотношение

$$f = \gamma(f')^{-1} = \begin{cases} \frac{f'}{12.92} & f' \leq 0.04045 \\ \left(\frac{f' + 0.055}{1.055}\right)^{2.4} & f' > 0.04045, \end{cases}$$

где f' - значение в канале входного изображения (ЦСК sRGB),

f - значение в канале выходного изображения (ЦСК linRGB).

Для обратного преобразования из linRGB в sRGB будем использовать соотношение

$$f' = \gamma(f) = \begin{cases} 12.92f & f \leq 0.0031308 \\ 1.055f^{\frac{1}{2.4}} & f > 0.0031308. \end{cases}$$

3.2. PCA-анализ распределений

Используем метод главных компонент (PCA-анализ) для численной оценки геометрических параметров цветовых распределений. Направляющий вектор \vec{s} главной оси распределения найдем, как соответствующий максимальному собственному значению $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ собственный вектор матрицы 3×3 $\mathbb{E}\left((\vec{f} - \vec{OM})(\vec{f} - \vec{OM})^T\right)$. Дополнительно оценим параметры M_{grey} и \vec{s}_{grey} распределения пикселей изображения по маске серого. Результаты оценки, приведенные в Табл. 1, показывают заметно отличные от нуля углы $\angle(\vec{OM}, \vec{s})$ и $\angle(\vec{OM}, \vec{s}_{grey})$.

Табл. 1. Результаты PCA -анализа цветовых распределений исходных изображений
 R_{grey} - доля "пикселей серого" в маске, углы $\angle(\vec{s}, \vec{s}_{grey})$, $\angle(\vec{OM}, \vec{s})$ и $\angle(\vec{OM}, \vec{s}_{grey})$ измеряются в градусах

пример	R_{grey}	$\ \vec{MM}_{grey}\ $	$\angle(\vec{s}, \vec{s}_{grey})$	$\angle(\vec{OM}, \vec{s})$	$\angle(\vec{OM}, \vec{s}_{grey})$
1	0.9606	0.0009	0.0147	0.0949	0.0803
2	0.9383	0.0019	0.0307	0.0510	0.0205
3	0.9796	0.0011	0.0289	0.1096	0.0807
4	0.9843	0.0021	0.0091	0.1529	0.1439

Это служит примером того, что главная ось цветового распределения может заметно отклоняться от точки O . Области защитных элементов вносят систематический шум в цветовое распределение изображения ч/б фотографии, что приводит к смещению центра распределения на расстояние $\|\vec{MM}_{grey}\|$ и отклонение главной оси распределения на угол $\angle(\vec{s}, \vec{s}_{grey})$. Заметные значения этих величины показывают, что для оценки параметров цветовых распределений необходимо использовать более робастный, чем PCA, метод.

3.3. Робастное оценивание параметров цветового распределения с использованием быстрого преобразования Хафа

Задача оценки геометрических параметров цветового распределения может быть рассмотрена как задача ортогональной робастной линейной регрессии на трехмерной гистограмме. В работе [22] предложен алгоритм вычисления М-оценки Уэлша для параметров гиперплоскости на гистограмме с использованием БПХ, который для трехмерного случая в среднем устойчивее к выбросовому шуму, чем другие методы, при доле шума до 50%. Покажем, что М-оценка Уэлша для параметров прямой в \mathbb{R}^3 может быть определена с помощью БПХ.

Пусть $X_H = \{(\vec{x}_i, p_i)\}_{i=1}^m$ множество наблюдений, где $\vec{x}_i \in \mathbb{R}^3$ - наблюдение, p_i - вес наблюдения, m - общее число наблюдений. Гистограмма H агрегирует веса наблюдений с совпадающими координатами $H(\vec{x}) = \sum_{i=1}^m p_i [\vec{x}_i = \vec{x}]$, что может быть записано при помощи дельта-функции Дирака $\delta(\vec{x})$ в виде

$$H(\vec{x}) = \sum_{i=1}^m p_i \delta(\vec{x} - \vec{x}_i) \quad (7)$$

Свертка H с гауссовским ядром G дает

$$GH = \sum_{i=1}^m p_i \exp\left(-\frac{\|\vec{x} - \vec{x}_i\|^2}{c^2}\right) \quad (8)$$

Найдем интеграл для GH вдоль некоторой прямой Λ . Пусть прямая Λ является первой осью OX некоторой ортонормированной системы координат $OXYZ$. В этой системе координат точка x_i задается вектором $\vec{x}_i(\Lambda)$. Обозначим через вектор $\vec{d}_i(\Lambda)$ перпендикуляр, опущенный из точки x_i , на прямую Λ , $d_i(\Lambda) = \|\vec{d}_i(\Lambda)\|$. Пусть ось OY проходит через точку x_i . При интегрировании вдоль прямой Λ вклад $s_i(\Lambda)$ точки x_i может быть вычислен как

$$\begin{aligned} s_i(\Lambda) &= \int_{-\infty}^{\infty} p_i \exp\left(-\frac{x^2 + d_i^2(\Lambda)}{c^2}\right) dx = \\ &= c p_i \sqrt{\pi} \exp\left(-\frac{d_i^2(\Lambda)}{c^2}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

Для всех наблюдений интеграл $S(\Lambda)$ вдоль прямой Λ вычисляется как

$$S(\Lambda) = \sum_{i=1}^m s_i(\Lambda) = c \sqrt{\pi} \sum_{i=1}^m \exp\left(-\frac{d_i^2(\Lambda)}{c^2}\right) \quad (10)$$

Поскольку для рассматриваемой прямой Λ вклад точки x_i в штрафную функцию Уэлша составляет $p_i \frac{c^2}{2} (1 - \exp(-\frac{d_i^2(\Lambda)}{c^2}))$, то для всех наблюдений М-оценка Уэлша принимает вид

$$\Lambda_{opt} = \arg \min_{\Lambda} \sum_{i=1}^m \left(p_i \frac{c^2}{2} (1 - \exp(-\frac{d_i^2(\Lambda)}{c^2})) \right) \quad (11)$$

Сравнивая (10) и (11) легко видеть, что

$$\Lambda_{opt} = \arg \max_{\Lambda} \sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^m p_i \exp\left(-\frac{d_i^2(\Lambda)}{c^2}\right) = \arg \max_{\Lambda} S(\Lambda) \quad (12)$$

В дискретном случае вместо интегрирования вдоль прямой будем оценивать суммы при помощи БПХ. Таким образом, М-оценка приближенно вычисляется при помощи следующих шагов:

1. сбор гистограммы цветового распределения и формирование I_H ;
2. свёртка изображения I_H с Гауссовым ядром – вычисление G_I ;
3. построение трехмерного Хаф-образа G_I для прямых при помощи БПХ – вычисление H_G ;
4. поиск максимума H_G - определение значений Λ_{opt} .

Общая вычислительная сложность получения М-оценки определяется наиболее сложным шагом, которым является БПХ. Оценка сложности алгоритма трехмерного БПХ для прямых в 3D составляет $\Theta(N^4)$, где N - параметр дискретизации, и является асимптотически не улучшаемой [23]. Вычислительную сложность

можно уменьшить до $\Theta(N^3\sqrt{N})$ за счет приближения трехмерной прямой диадическим паттерном, выравнивания трудоемкостей предподсчета [24] и ограничения области суммирования окрестностью диагонали. Другой способ уменьшения алгоритмической сложности состоит в восстановлении положения прямой по двум проекциям. Это приближение будет рассмотрено ниже.

3.3.1. Робастная оценка положения главной оси распределения по проекциям

Для уменьшения вычислительной сложности получения М-оценки воспользуемся следующим приближением. Пусть через главную диагональ l цветового куба проходят две ортогональные плоскости π и ρ , $l = \pi \cap \rho$, как показано на Рис. 8, а.

Ортогонально спроецируем исходное цветовое распределение на плоскости π , ρ и получим 2D гистограммы, которые могут быть представлены изображениями в градациях серого D_π и D_ρ (Рис. 8, б). Обозначим s_π и s_ρ ортогональные проекции главной оси цветового распределения s на плоскости π и ρ соответственно. Цветовое распределение неискаженного цветного изображения ч/б фотографии владельца

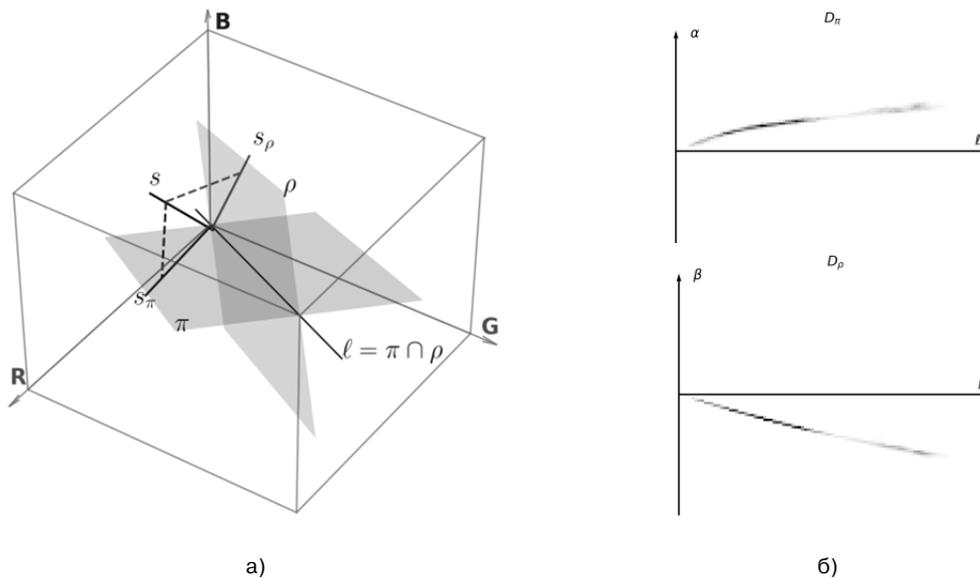


Рис. 8. Анализ цветового распределения по двум ортогональным проекциям
 а) схема проецирования, б) пример визуализации проекций цветового распределения

лежит вдоль главной оси цветового куба, поэтому далее без ограничения общности будем считать, что проекции s_π и s_ρ являются прямыми и не отклоняются от прямой l более, чем на 45° . Тогда оценки параметров s_π и s_ρ получим как М-оценки Уэлша при помощи БПХ в (s, t) -параметризации [25] для распределений D_π и D_ρ с учетом их преимущественно горизонтальной ориентации, после чего получим оценку параметров s .

При вычислении М-оценок положения s_π и s_ρ свертку исходного цветового распределения с трехмерным ядром Гаусса можно заменить на свертку D_π и D_ρ с соответствующим 2D ядром Гаусса. Согласно [26] для преобразования Радона и свертки с ядром Гаусса выполняется свойство перестановочности, поэтому свертку D_π D_ρ с 2D ядром Гаусса можно заменить на построчную свертку результатов БПХ для D_π D_ρ с 1D ядром Гаусса.

Оценим алгоритмическую сложность такого приближения. Если исходное изображение имеет размеры $W_i \times H_i$ пикселей, то проекции D_π и D_ρ цветового распределения могут быть построены за $O(W_i H_i)$ операций. Пусть линейный размер проекции распределения составляет N , тогда сложность БПХ для двумерного случая составляет $O(N^2 \log N)$. Сложность быстрой построчной свертки БПХ-образа с одномерным Гауссовым ядром при помощи метода Дерисе [27] составляет $O(N^2)$. Вычислительная сложность рассматриваемого приближения составляет $O(W_i H_i + N^2 \log N)$, что меньше сложности алгоритма трехмерного БПХ для прямых в 3D.

3.3.2. Система цветовых координат $la\beta$

Для реализации описанной схемы робастного оценивания параметров цветового распределения используем вспомогательную ортонормированную СЦК $la\beta$, которая задается таким образом, что вектор $\vec{l} = \vec{d}$ является направляющим для оси яркости l , расположенной вдоль главной диагонали RGB-куба (Рис. 9), а векторы \vec{a} и $\vec{\beta}$ задают ортонормированный базис в перпендикулярной вектору \vec{l} плоскости цветовой разности (Рис. 9, б).

Компонентам (r, g, b) в СЦК linRGB соответствуют в СЦК $la\beta$ следующие значения компонент: $\alpha = \frac{r-g}{\sqrt{2}}$, $\beta = \frac{2b-r-g}{\sqrt{6}}$, $l = \frac{r+g+b}{\sqrt{3}}$.

Обратное преобразование имеет вид $r = \frac{\sqrt{2}l + \sqrt{3}\alpha - \beta}{\sqrt{6}}$, $g = \frac{\sqrt{2}l - \sqrt{3}\alpha - \beta}{\sqrt{6}}$, $b = \frac{\sqrt{2}l + 2\beta}{\sqrt{6}}$.

Значения компонент в СЦК $la\beta$ лежат в интервалах

$$l \in [0, \sqrt{3}], \alpha \in \left[-\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}\right], \beta \in \left[-\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}, \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right].$$

В СЦК $la\beta$ рассматриваемые цветовые распределения расположены преимущественно вдоль оси l и ограничены по углу отклонения от l , поэтому в качестве направлений проекций будем использовать оси α и β , а плоскостями проекций будут плоскости $l\beta$ и la соответственно.

Пусть в СЦК $la\beta$ прямая s проходит через точки $L = (0, \alpha_L, \beta_L)$ и $Q = (\sqrt{3}, \alpha_Q, \beta_Q)$. Пусть прямая s_α является проекцией прямой s на плоскость la , тогда s_α пересекает прямые $l = 0$ и $l = \sqrt{3}$ в точках $L_\alpha = (0, \alpha_L)$ и $Q_\alpha = (\sqrt{3}, \alpha_Q)$ соответственно (Рис. 10, а).

Аналогично проекция s_β прямой s на плоскость $l\beta$ пересекает прямые $l = 0$ и $l = \sqrt{3}$ в точках $L_\beta = (0, \beta_L)$ и $Q_\beta = (\sqrt{3}, \beta_Q)$ соответственно (Рис. 10, б). Отметим, что вспомогательная СЦК $la\beta$ сконструирована так, чтобы s_α и s_β были преимущественно горизонтальными, а координаты $\alpha_L, \beta_L, \alpha_Q, \beta_Q$ точек $L_\alpha, Q_\alpha, L_\beta, Q_\beta$ могли быть эффективно найдены с помощью БПХ.

3.4. Численная оценка результатов коррекции баланса белого

Цветовую насыщенность цвета f в СЦК linRGB будем оценивать, как расстояние до диагонали цветового куба по формуле

$$sat = \sqrt{(\vec{f}, \vec{f})^2 - (\vec{f}, \vec{d})^2}.$$

При правильной цветопередаче пиксели цветного изображения в области ч/б фотографии должны иметь близкую к нулю цветовую насыщенность, поэтому используем среднеквадратичное отклонение MSE пикселей карты цветовой насыщенности от нуля $MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N sat_i^2$.

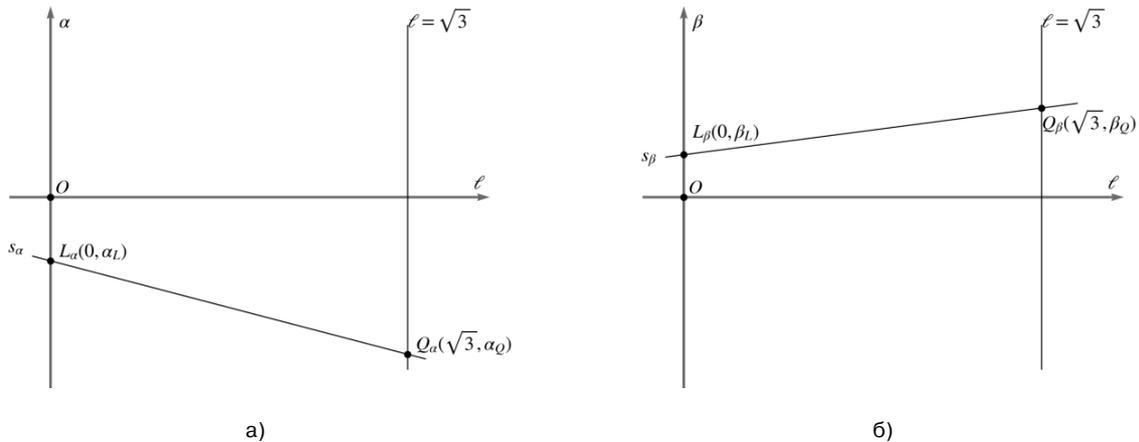


Рис. 10. Схема вспомогательной координатной системы и интерпретации результатов анализа БПХ

а) в плоскости $l\alpha$, б) в плоскости $l\beta$

В качестве численной оценки результата цветокоррекции будем использовать отношение $R_{g/c}$ показателя MSE по области фотографии MSE_g к значению показателя MSE_c по области защитных элементов $R_{g/c} = \frac{MSE_g}{MSE_c}$. Численные оценки результатов коррекции баланса белого представлены в Табл. 2.

Из таблицы видно, что робастная оценка параметров цветового распределения практически

не влияет на значение $R_{g/c}$ для незашумленных изображений (примеры 1-3) и повышает амплитуду отклика в области интереса (примеры 5-8) при наличии цветных помех. Уменьшение амплитуды отклика (возрастание значения $R_{g/c}$) для примеров 4 и 12 объясняется сильным нарушением баланса белого, когда информация в одном из цветовых каналов практически отсутствует, а форма цветового распределения сильно отклоняется от линейной.

Табл. 2. Сравнение результатов аддитивно-мультипликативной коррекции баланса белого для PCA и робастного (FHT) методов оценивания параметров цветового распределения

N	доля серых	Исходно			PCA			Робастно (FHT)		
		MSE_g	MSE_c	$R_{g/c}$	MSE_g	MSE_c	$R_{g/c}$	MSE_g	MSE_c	$R_{g/c}$
1	0.961	1.24	6.48	0.192	0.168	3.15	0.0533	0.1720	3.23	0.0533
2	0.938	1.14	4.34	0.262	0.0651	0.782	0.0833	0.0672	0.753	0.0893
3	0.98	0.61	3.91	0.156	0.0754	1.94	0.0390	0.0772	1.96	0.0394
4	0.984	1.97	12.9	0.153	0.224	17.8	0.0125	0.2940	11.1	0.0264
5	0.803	0.061	1.63	0.0372	0.13	1.33	0.0973	0.0526	1.58	0.0333
6	0.704	0.631	1.42	0.445	0.0948	1.2	0.0788	0.0643	1.22	0.0529
7	0.706	0.387	1.38	0.279	0.095	1.14	0.0834	0.0693	1.17	0.0594
8	0.802	0.767	2.73	0.281	0.157	1.4	0.1120	0.0937	1.47	0.0635
9	0.877	0.104	1.12	0.0928	0.044	1.02	0.0431	0.0315	1.07	0.0295
10	0.900	0.791	1.34	0.59	0.0613	1.05	0.0585	0.0583	1.09	0.0535
11	0.883	0.694	1.4	0.497	0.0579	1.1	0.0525	0.0512	1.14	0.0449
12	0.900	1.450	3.54	0.411	4.87	42.7	0.1140	0.3610	1.78	0.203

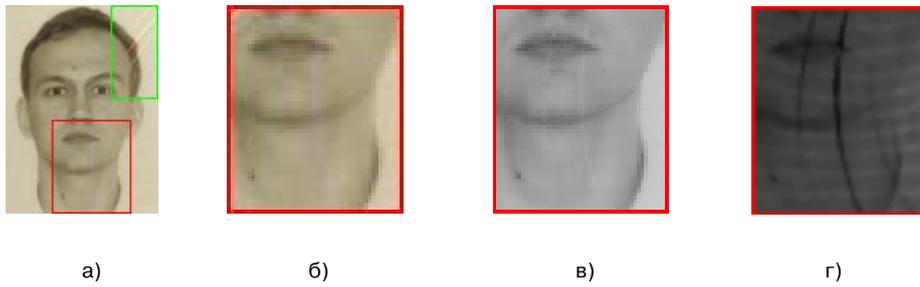


Рис. 1. Пример изображения защитного элемента в зоне фотографии
а) исходное изображение, б) фрагмент с низкой цветовой насыщенностью, в) фрагмент карты яркости, г) фрагмент карты цветовой насыщенности в зоне низкой цветовой насыщенности



Рис. 2. Исследуемые изображения

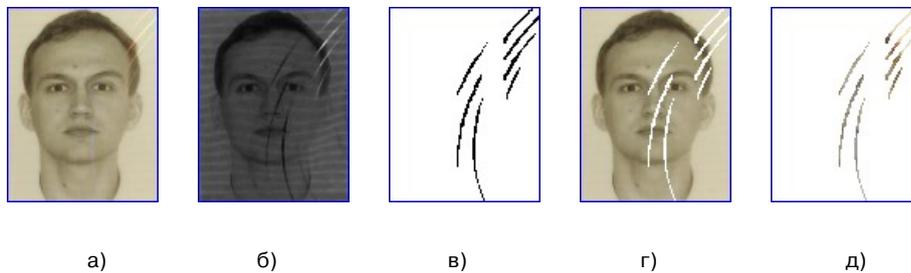


Рис. 3. Пример данных
а) исходное изображение, б) карта насыщенности, в) маска серого, г) зона серого, д) зона цветного

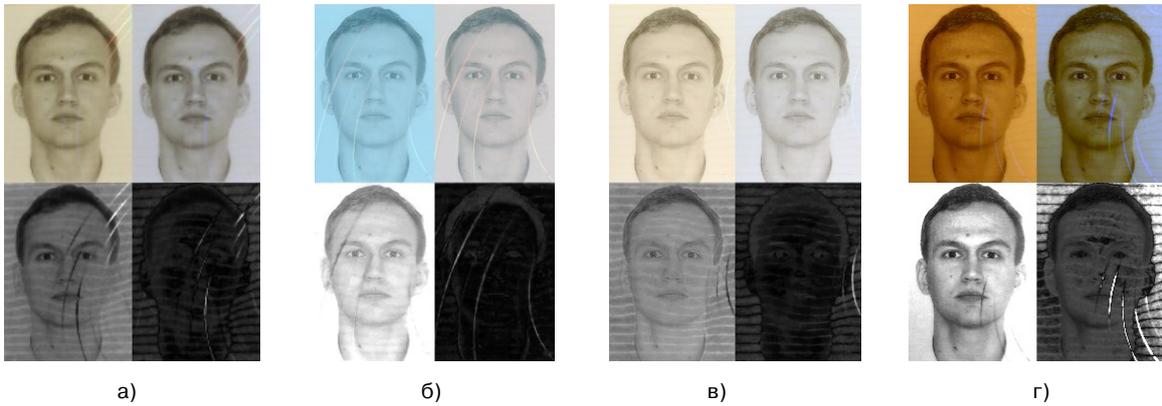


Рис. 4. Изображения примеров 1-4 до и после мультипликативной коррекции по модели «серый мир» (верхний ряд), визуализация карт цветовой насыщенности (нижний ряд)

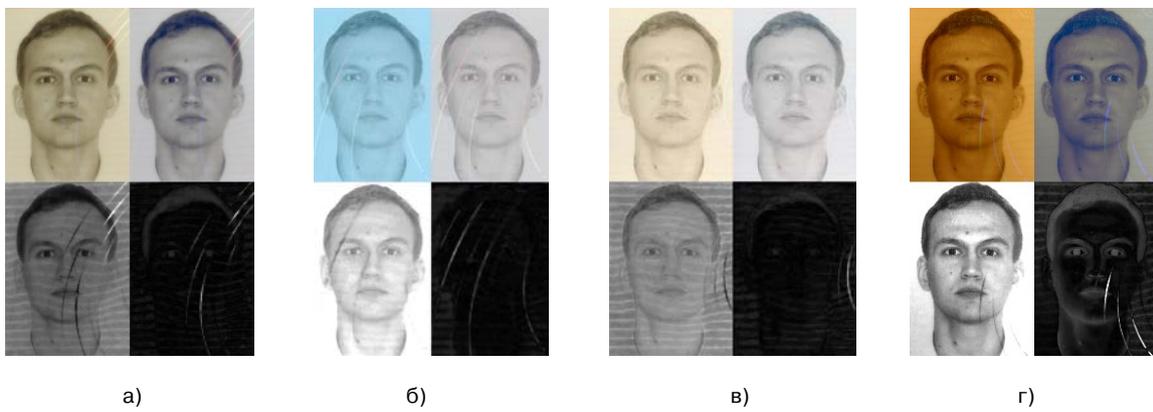


Рис. 7. Изображения примеров 1-4 до и после аддитивно-мультипликативной коррекции баланса белого (верхний ряд), визуализация карт цветовой насыщенности (нижний ряд)

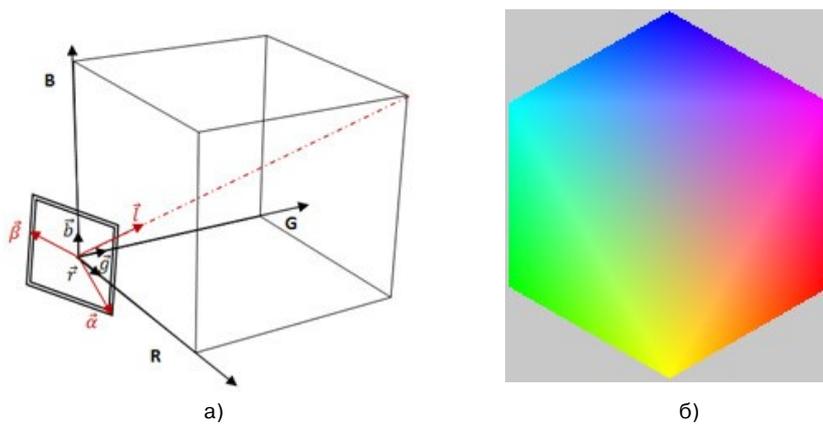


Рис. 9. Вспомогательная СЦК $\alpha\beta$

а) схема ортонормированного базиса, б) визуализация плоскости цветовой разности $\alpha\beta$

Заключение

В статье предложен алгоритм автоматического баланса белого для цветных изображений черно-белых фотографий владельца документа, защищенных пленкой с голографическим паттерном. Предложенный алгоритм позволяет более устойчиво определять наличие, локализацию и форму защитного паттерна по признаку повышенной насыщенности.

Устойчивость алгоритма к выбросам цветового распределения, характерных для искомым голографических паттернов, обеспечивается применением М-оценивания с ядром Уэлша, а использование быстрого преобразования Хафа позволяет приближенно вычислить эту М-оценку за $O(W_i H_i + N^2 \log N)$ операций, где $W_i \times H_i$ – размер изображения, а N – параметр дискретизации шкалы яркости.

Алгоритм основан на мультипликативно-сдвиговой (аффинной) модели цветокоррекции, а не классической мультипликативной (линейной). Показано, что в реальных условиях съемки мультипликативно-сдвиговая модель обеспечивает увеличение амплитуды отклика в области интереса.

Литература

- Арлазаров В. В. и др. Система доступа к дистанционному получению банковских услуг // Патент на полезную модель РФ. № 161478. 2016
- Cook S. Selfie banking: is it a reality? // *Biometric technology today*. 2017. №. 3. С. 9-11.
- Константин Булатович Булатов и Александр Анатольевич Иванов. Программа биометрической идентификации на мобильном устройстве по удостоверяющей фотографии. // Роспатент № 2019665172. 2019.
- Полевой Д. В. Использование мобильных устройств для выявления признаков фабрикаций документов, удостоверяющих личность // *Сенсорные системы*. 2019. Т. 33. №. 2. С. 142-156.
- Bulatov K. et al. Smart IDReader: Document recognition in video stream // 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR). IEEE, 2017. Т. 6. С. 39-44.
- Chernov T. S., Nikolaev D. P., Kliatskine V. M. A method of periodic pattern localization on document images // Eighth International Conference on Machine Vision (ICMV 2015). International Society for Optics and Photonics, 2015. Т. 9875. С. 987504.
- Chernov T. S., Kolmakov S. I., Nikolaev D. P. An algorithm for detection and phase estimation of protective elements periodic lattice on document image // *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2017. Т. 27. №. 1. С. 53-65.
- Chernyshova Y. S. et al. Optical font recognition in smartphone-captured images and its applicability for ID forgery detection // Eleventh International Conference on Machine Vision (ICMV 2018). – International Society for Optics and Photonics, 2019. Т. 11041. С. 110411J.
- Polevoy D. V., Aliev M. A., Nikolaev D. P. Choosing the best image of the document owner's photograph in the video stream on the mobile device // *ICMV 2020 / SPIE*. 2021. — Т. 11605. — 11605 0F. — С. 1-9. — DOI: 10.1117/12.2586939.
- Aliev M. A., Kunina I. A., Kazbekov A. V., Arlazarov V. L. Algorithm for choosing the best frame in a video stream in the task of identity document recognition // *Компьютерная оптика*. — 2021. — Т. 45. — № 1. — С. 101-109. — DOI: 10.18287/2412-6179-CO-811.
- Илюхин С. А., Чернов Т. С., Полевой Д. В. Повышение точности нейросетевых методов верификации лиц за счет пространственно-взвешенной нормализации яркости изображения // ИТиВС. - 2019. - № 4. - С. 12-20. - DOI: 10.14357/20718632190402.
- Hartl A., Arth C., Schmalstieg D. AR-based hologram detection on security documents using a mobile phone // *International Symposium on Visual Computing*. Springer, 2014. С. 335-346.
- Арлазаров В. В. и др. Способ детектирования голографических элементов в видеопотоке // Роспатент № 2644513. 2018.
- Ebner M. Color constancy. John Wiley & Sons, 2007.
- Виноградова Ю. В., Николаев Д. П., Слугин Д. Г. Расслоение изображений печатных документов с использованием цветовой кластеризации // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2015. №. 2. С. 40-49.
- Nikolaev D. P., Nikolayev P. P. Linear color segmentation and its implementation // *Computer Vision and Image Understanding*. 2004. Т. 94. №. 1-3. С. 115-139.
- Buchsbaum G. A spatial processor model for object colour perception // *Journal of the Franklin institute*. 1980. Т. 310. №. 1. С. 1-26.
- Kaiming He, Jian Sun и Xiaoou Tang. Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 33.12 (2011), с. 2341—2353. doi: 10.1109/TPAMI.2010.168.
- Akkaynak D., Treibitz T. Sea-thru: A method for removing water from underwater images // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2019. С. 1682-1691.
- Шепелев Д. А. О точности цветопередачи при канальном моделировании подводных изображений // *Информационные процессы* 20.3 (2020), с. 254—268.
- Paulus D., Csink L., Niemann H. Color cluster rotation // *Proceedings 1998 International Conference on Image Processing*. ICIP98 (Cat. No. 98CB36269). IEEE, 1998. Т. 1. С. 161-165.
- Ершов Е. И., Асватов Е. Н., Николаев Д. П. Робастная ортогональная линейная регрессия для маломерных гистограмм // *Сенсорные системы*. 2017. Т. 31. №. 4. С. 331-342.
- Ershov E. I., Terekhin A. P., Nikolaev D. P. Generalization of the fast hough transform for three-dimensional im-

- ages // Journal of Communications Technology and Electronics. 2018. Т. 63. №. 6. С. 626-636.
24. Bulatov K. B., Chukalina M. V., Nikolaev D. P. Fast x-ray sum calculation algorithm for computed tomography // Вестник ЮУрГУ ММП. — 2020. — Т. 13. — № 1. — С. 95-106. — DOI: 10.14529/mmp200107.
25. Nikolaev D. P. et al. Hough transform: underestimated tool in the computer vision field // Proceedings of the 22th European Conference on Modelling and Simulation. 2008. Т. 238. С. 246.
26. Гельфанд И. М., Гиндикин С. Г., Граев М. И. Избранные задачи интегральной геометрии. Добросвет, 2000.
27. Deriche R. Fast algorithms for low-level vision // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1990. Т. 12. №. 1. С. 78-87.

Полевой Дмитрий Валерьевич. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН (ФИЦ ИУ РАН), Россия, Москва. Старший научный сотрудник, к.т.н. Количество печатных работ: 40. Область научных интересов: компьютерное зрение, распознавание образов, алгоритмы обработки изображений. E-mail: dvpsun@gmail.com

Панфилова Екатерина Игоревна. Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН (ИППИ РАН), Москва, Россия. Младший научный сотрудник. Количество печатных работ: 14. Область научных интересов: компьютерное зрение, анализ и обработка изображений. E-mail: mipt.epanfilova@gmail.com

Николаев Дмитрий Петрович. Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН (ИППИ РАН), Москва, Россия. Заведующий лабораторией 11 “Зрительные системы”, к. ф.- м. н. Количество печатных работ: 388. Область научных интересов: компьютерное зрение, распознавание образов, алгоритмы быстрой обработки изображений. E-mail: d.p.nikolaev@gmail.com

White Balance Correction for Detection of Holograms in Color Images of Black and White Photographs

D. V. Polevoy^{I,III,V}, E. I. Panfilova^{II,IV}, D. P. Nikolaev^{I,II,VI}

^I Smart Engines Ltd, Moscow, Russia

^{II} Institute for Information Transmission Problems of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^{III} Federal Research Center “Computer Science and Control” RAS, Moscow, Russia

^{IV} V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Science, Moscow, Russia

^V National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russia

^{VI} Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

Abstract. Taking a photo or video of a user's identification document is one of the ways to comply with the law when you use mobile services. It is designed to reduce the number of illegal actions. An element of protection against malefactor attacks on providing the original document is the detection and recognition of optically variable document security elements. The key feature of optically variable elements is the appearance and disappearance of high saturation colors during shooting under different angles. The accuracy of color saturation measurement algorithms is limited by the automatic white balance correction subsystem, which uncontrollably changes the color characteristics of the image from frame to frame. In this paper, we considered the possibility of using prior information about color consistency of the document area to compensate distortion of the white balance on the examples of document owner monochrome photographs. The proposed method of color correction increases the contrast of color saturation between the unprotected areas of the photograph and the areas covered by protective film with optically variable devices. The method is tested on a real data obtained with a mobile device.

Keywords: white balance, digital image color correction, optically variable device detection.

DOI 10.14357/20718632210308

References

1. Arlazarov V. V. and others. Sistema dostupa k distancionnomu polucheniyu bankovskih uslug [System of access to remote receipt of banking services] // Patent RF. №161478. 2016
2. Cook S. Selfie banking: is it a reality? // Biometric technology today. 2017. №. 3. Pp. 9-11.
3. Bulatov K.B. and Ivanov A.A. Programma biometricheskoj identifikacii na mobil'nom ustrojstve po udostoverayayushchej fotografii. [A program for biometric identification on a mobile device using an authenticating photo] // Patent RF № 2019665172. 2019

4. Polevoy D. V. Ispol'zovanie mobil'nyh ustrojstv dlya vy-yavleniya priznakov fabrikacii dokumentov, udostoveryayushchih lichnost' [Using mobile devices to detect signs of identity documents counterfeit] // *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2019. V. 33. №. 2. Pp. 142-156.
5. Bulatov K. et al. Smart IDReader: Document recognition in video stream // 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR). IEEE, 2017. V. 6. Pp. 39-44.
6. Chernov T. S., Nikolaev D. P., Kliatskine V. M. A method of periodic pattern localization on document images // Eighth International Conference on Machine Vision (ICMV 2015). International Society for Optics and Photonics, 2015. V. 9875. P. 987504.
7. Chernov T. S., Kolmakov S. I., Nikolaev D. P. An algorithm for detection and phase estimation of protective elements periodic lattice on document image // *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2017. V. 27. №. 1. Pp. 53-65.
8. Chernyshova Y. S. et al. Optical font recognition in smartphone-captured images and its applicability for ID forgery detection // Eleventh International Conference on Machine Vision (ICMV 2018). – International Society for Optics and Photonics, 2019. T. 11041. P. 110411J.
9. Polevoy D.V., Aliev M.A., Nikolaev D.P. Choosing the best image of the document owner's photograph in the video stream on the mobile device / ICMV 2020, SPIE 1160540-40-5/ V. 11605, 11605 0F. Pp. 1-9. 2021. DOI: 10.1117/12.2586939.
10. Aliev M. A. et.al. Algorithm for choosing the best frame in a video stream in the task of identity document recognition / *Computer Optics*. V. 45. № 1. Pp. 101-109. 2021. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-811.
11. Ilyukhin S.A., Chernov T.S., Polevoy D.V. Povyshenie tochnosti nejrosetevykh metodov verifikacii lic za schet prostranstvenno-vzveshennoj normalizacii jarkosti izobrazhenija [Improving the Accuracy of Neural Network Methods of Verification of Persons by Spatial-Weighted Normalization of Brightness Image] // *ITiVS*. 2019. № 4. Pp. 12-20. DOI: 10.14357/20718632190402.
12. Hartl A., Arth C., Schmalstieg D. AR-based hologram detection on security documents using a mobile phone // *International Symposium on Visual Computing*. Springer, Cham, 2014. C. 335-346.
13. Arlazarov V.V. and others. Sposob detektirovaniya holograficheskikh elementov v videopotoke. [Method of detecting holographic elements in a video stream] // Patent RF № 2644513. 2018.
14. Ebner M. Color constancy. John Wiley & Sons, 2007.
15. Vinogradova YU. V., Nikolaev D. P., Slugin D. G. Rassloenie izobrazhenij pechatnyh dokumentov s ispol'zovaniem cvetovoj klasterizacii. [Layering of printed documents images using color clustering] // *Informacionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy*. [Information technologies and computing systems] 2015. №. 2. Pp. 40-49.
16. Nikolaev D. P., Nikolayev P. P. Linear color segmentation and its implementation // *Computer Vision and Image Understanding*. 2004. V. 94. №. 1-3. Pp. 115-139.
17. Buchsbaum G. A spatial processor model for object color perception // *Journal of the Franklin institute*. 1980. V. 310. №. 1. Pp. 1-26.
18. Kaiming He, Jian Sun and Xiaoou Tang. Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 33.12. 2011. Pp. 2341—2353. doi: 10.1109/TPAMI.2010.168.
19. Akkaynak D., Treibitz T. Sea-thru: A method for removing water from underwater images // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2019. Pp. 1682-1691.
20. Shepelev D. A., O tochnosti cvetoperedachi pri pokanal'nom modelirovanii podvodnyh izobrazhenij. [The accuracy of color rendering of channel-by-channel underwater images modeling.] // *Informacionnye process* [Information Processes] 20.3. 2020. Pp. 254—268.
21. Paulus D., Csink L., Niemann H. Color cluster rotation // *Proceedings 1998 International Conference on Image Processing. ICIP98* (Cat. No. 98CB36269). IEEE, 1998. V. 1. Pp. 161-165.
22. Ershov E. I., Asvatov E. N., Nikolaev D. P. Robastnaya ortogonal'naya linejnaya regressiya dlya malomernykh gistogramm. [Robust orthogonal linear regression for low-dimensional histograms] // *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2017. V. 31. №. 4. Pp. 331-342
23. Ershov E. I., Terekhin A. P., Nikolaev D. P. Generalization of the fast hough transform for three-dimensional images // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2018. V. 63. №. 6. Pp. 626-636.
24. Bulatov K.B., Chukalina M.V., Nikolaev D.P. Fast x-ray sum calculation algorithm for computed tomography // *Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*, V. 13. № 1. Pp. 95-106. 2020. DOI: 10.14529/mmp200107.
25. Nikolaev D. P. et al. Hough transform: underestimated tool in the computer vision field // *Proceedings of the 22th European Conference on Modelling and Simulation*. 2008. V. 238. Pp. 246.
26. Gelfand I. M., Gindikin S. G., Graev M. I. Izbrannye zadachi integral'noj geometrii. [Selected Problems of Integral Geometry] // *Dobrosvet*, 2000.
27. Deriche R. Fast algorithms for low-level vision // *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 1990. V. 12. №. 1. Pp. 78-87.

Polevoy D. V. Ph.D, Federal Research Center Computer Science and Control of Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow.
E-mail: dvpsun@gmail.com

Panfilova E. I. M.S., Institute for Information Transmission Problems of Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow.
E-mail: mipt.epanfilova@gmail.com

Nikolaev D. P. Ph.D, Institute for Information Transmission Problems of Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow.
E-mail: d.p.nikolaev@gmail.com