

СИНИЦЫНА В. В.

МЕТОД РЕКОЛОРИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ЛЮДЕЙ С ПРОТАНОПИЕЙ И ДЕЙТЕРАНОПИЕЙ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В результате проведенных исследований разработан метод для помощи людям с наиболее распространенными формами дихромазии – дейтеранопией и протанопией. Для людей с протанопией осуществляется преобразование цветов с преобладающей красной составляющей, для дейтеранопов – с преобладающей зеленой составляющей. Особенности описанного метода являются нахождение неразличимых для дихроматов цветов при помощи настраиваемого колориметрического отклонения и изменение координат b и L неразличимых цветов таким образом, чтобы в результате преобразований неразличимые цвета одного изображения как можно сильнее отличались друг от друга, но в то же время наилучшим образом сохраняли свою натуральность. Среди преимуществ данного метода следует отметить возможность для каждого пользователя настроить в соответствии с индивидуальным восприятием визуальной информации такие персонализированные параметры реколоризации, как колориметрическое отклонение неразличимых цветов, коэффициент преобразования координаты b и коэффициент преобразования яркости L . Реколоризация согласно разработанному методу допустима как для более реалистичных изображений, так и для графиков, вывесок, HTML-документов, интерфейсов приложений.

Проверка корректности работы метода произведена посредством рассмотрения нормальным трихроматом симулированного при помощи метода Brettel et al. реколоризованного изображения для дейтеранопического и протанопического зрения, в результате чего ранее недоступные для зрения дихромата области изображения стали различимыми. Качество реколоризации также оценено по потерям натуральности цветов и глобальному хроматическому разнообразию. Так, потери натуральности цветов для тестовых изображений имели удовлетворительные значения и изменялись в пределах от 4.39 до 20.15 в зависимости от цветовой составляющей изображений. Глобальное хроматическое разнообразие всех тестовых изображений в результате реколоризации было увеличено. Время выполнения метода для обоих случаев дихромазии указывает на удовлетворительную скорость обработки изображений и составляет 3 с для изображений размером 170 000 пикселей.

Ключевые слова: аномалии цветового зрения, дихромазия, протанопия, дейтеранопия, реколоризация, потеря натуральности цвета, глобальное хроматическое разнообразие, колориметрическое отклонение неразличимых цветов, коэффициенты преобразования, персонализированные параметры реколоризации, время выполнения метода, цветовое пространство

Введение

Дихромазия представляет собой наиболее известный вид аномалий цветового зрения, хотя и не является наиболее распространенным. Встречается дихромазия примерно у 2,5 % населения Земли, в то же время другой вид цветоаномалий – аномальная трихромазия – наблюдается примерно у 6,5 %, однако проявляется дихромазия в более тяжелой форме. Если у аномальных трихроматов нет достаточного для нормального цветовосприятия количества фотопигментов определенного типа, то у дихроматов колбочки с каким-либо фотопигментом отсутствуют или же не функционируют. Так, в случае отсутствия фотопигмента красного цвета принято говорить о наличии у человека такой формы дихромазии, как протанопия. Если же нет фотопигмента зеленого цвета, отмечается иная форма дихромазии – дейтеранопия.

Случаи тританопии – отсутствия коротковолновых колбочек с синим фотопигментом – очень редки (0,002 %).

На сегодняшний день дихромазия не поддается лечению, а потому многие исследователи и разработчики занимаются вопросом создания методов и алгоритмов для реколоризации изображений с целью последующего корректного восприятия визуальной информации людьми с дихромазией. Но, несмотря на это, многие существующие методы и алгоритмы имеют как свои достоинства, так и недостатки.

Так, среди ключевых недостатков существующих методов выделяются следующие.

1. Сильная потеря натуральности, представляющей собой разницу в цветности между исходным изображением и реколоризованным (в частности, во многих методах наблюдается преобразование

в результате реколоризации исходных красных или зеленых цветов в синие), в методах Jefferson-Harvey [1, 2], Deng et al. [3], Ma et al. [4], Bao et al. [5], Ruminski et al. [6], Wong-Bishop [7], Ching-Sabudin [8], Rasche et al. [9, 10], Wakita-Shimamura [11], Kuhn et al. [12] и др.

2. Возможность ограниченного применения методов:

а) метод Chen et al. [13] был разработан для отличия синих и желтых цветов соседних анатомических органов, которые различимы для нормальных трихроматов, но схожи в представлении дихроматов;

б) метод Ching-Sabudin [8] предназначен для вывесок, а не для реальных изображений, так как в вывесках используется ограниченное количество цветов, что способствует лучшему сохранению натуральности, но сужает круг вариантов использования таких методов;

в) метод Wakita-Shimamura [11] больше подходит лишь для графиков и вывесок из-за произвольной замены цветов;

г) возможность использования метода Flatla et al. [14] для реальных изображений предусматривается, но в статье указана проверка только для HTML-документов с крайне ограниченным набором цветов.

3. Не усиливается и не сохраняется контраст в методе Ruminski et al. [6], когда изображение достаточно наполнено красными и синими цветами. Кроме того, присутствует созависимость потери контраста и натуральности в методе Yang-Ro [15], в результате чего контраст сохраняется лишь ценой потери натуральности.

4. Не всегда известно, какие именно коэффициенты применяются для преобразований (например, в методе Lai-Chang [16] не указаны значения коэффициентов Δh , Δs).

5. Применение нейронных сетей имеет свои недостатки в виде необходимости обучения модели на определенном наборе реколоризированных данных, которые следует получить при помощи некоторого метода реколоризации, который, в свою очередь, необходимо подобрать с определенной точностью. Например, в методах Li et al. [17], Chen et al. [18]. Таким образом, задача сводится не просто к обучению модели, а также к получению набора данных при помощи какого-либо уже существующего метода реколоризации.

6. В методе Milivojevic et al. [19] сочетается реколоризация изображений с методами водяных знаков, однако данный подход имеет такой недостаток, как предназначение лишь для помощи людям с дейтеранопией.

Таким образом, цель исследования – разработать метод реколоризации изображений для помощи людям с дейтеранопией и протанопией, который будет применим для преобразования цветовой состав-

ляющей не только изображений реального мира, но и графиков, вывесок, HTML-документов, интерфейсов приложений, а также будет сохранять натуральность изображений после реколоризации и усиливать их контраст. Все используемые в методе коэффициенты должны быть описаны. Кроме того, скорость реко-лоризации должна быть довольно высокой.

Среди задач исследования выделены следующие:

- разработка собственного метода;
- проведение экспериментов по реколоризации изображений для дейтеранопов и протанопов;
- оценка качества реколоризации изображений.

Метод реколоризации изображений для протанопов и дейтеранопов

Метод реколоризации изображений для людей с протанопией и дейтеранопией представляет собой метод оптимизации, реализующий извлечение из изображения ключевых цветов и последующее нахождение для них новых оптимальных цветов, так как данный тип методов считается наиболее эффективным в случае реколоризации изображений для людей с дихромазией, и включает следующие пункты.

1. Преобразование исходного изображения из цветового пространства BGR, которое является пространством по умолчанию для любых изображений, поступающих на вход устройств, в цветовое пространство CIEL*a*b*. Цветовое пространство CIEL*a*b* было выбрано в связи с использованием в нем Евклидова расстояния между цветами, которое близко к воспринимаемой человеческим глазом разнице между данными цветами. Стоит отметить, что в пространстве CIEL*a*b* каждая точка характеризуется тремя координатами: яркостью L , красно-зеленым значением a и сине-желтым значением b . Таким образом, важно отметить такую ключевую особенность данного пространства, как возможность отдельного изменения яркости и показателей цветности.

2. Преобразование трехмерного массива изображения в двумерный для возможности последующего применения алгоритма кластеризации k -средних с целью извлечения ключевых цветов.

3. Определение количества кластеров: так, по умолчанию, в используемых примерах выбиралось количество кластеров равное 30, что показывало наиболее удовлетворительные значения выделенных ключевых цветов на более комплексных с точки зрения цвета реалистичных изображениях размером не более 500×500 пикселей, однако, в случае меньшего количества имеющихся в изображении цветов, следует фильтровать ключевые цвета на дубликаты.

4. Определение критериев для кластеризации k -средних: целевое значение точности равно 0.1,

количество итераций – 10. При достижении данных значений работа алгоритма кластеризации будет прекращена. Количество попыток было взято равное 10, так как данное значение является достаточным для кластеризации 30 цветов. Кроме того, используется такая реализация метода, при которой он сначала выполняет итерацию всего изображения для определения вероятных центров, а лишь затем начинает сходиться, что обеспечивает лучшее определение заданного количества кластеров, хоть и большее время выполнения по сравнению с подходом, использующим случайный набор начальных данных.

5. В результате кластеризации будут получены значения центров кластеров в пространстве CIEL*a*b*, а также матрица исходного изображения с индексами ключевых цветов в соответствующих ячейках пикселей изображений, которые будут определять отношение каждого пикселя на изображении к тому или иному кластеру.

6. Среди полученных значений ключевых цветов следует выделить только такие, которые относятся к красным или зеленым оттенкам, так как данные оттенки люди с протанопией и дейтеранопией различают хуже всего в силу слияния таких цветов в восприятии красно-зеленых дихроматов в один желтый цвет [20]. Так, данные цвета должны быть с любыми значениями координат L и a , но только с положительным значением координаты b .

Важно отметить, что красно-зеленые дихроматы видят все цвета как оттенки только желтого или синего цветов. Дихроматы воспринимают яркость L и сине-желтое значение b почти корректно, но не красно-зеленое значение a . Так, протанопы и дейтеранопы не видят различий между двумя цветами, когда единственным изменяющимся параметром является a .

7. Получение для каждого отфильтрованного значения ключевого цвета соответствующего ему значения симулированного цвета для протанопов или же дейтеранопов согласно методу симуляции Brettel et al [21]. Данный метод сохраняет различия в цветовом контрасте и яркости, которые воспринимают люди с аномалиями цветового зрения, а также является более физиологически точным, так как основывается на том, как человек с аномалией воспринимает цвет.

8. Формирование пар «ключ-значение» из исходных значений ключевых цветов и соответствующих им значений симулированных цветов. Стоит отметить, что симулированное значение также получено в цветовом пространстве CIEL*a*b*.

9. Среди сгруппированных пар необходимо выделить такие, ключи которых относятся к красным оттенкам (то есть имеют положительные значения координат a и b), если реколоризация осуществляется для протанопического зрения, и ключи с зелеными оттенками (в таком случае цвета будут иметь

положительные значения b и отрицательные значения a) для дейтеранопического зрения.

10. Затем каждый ключевой цвет, полученный на предыдущем шаге, сравнивается с каждым ключевым цветом, полученным в пункте 8, кроме самого себя, в результате чего вычисляются Евклидовы расстояния между соответствующими ключевыми исходными и симулированными цветами.

11. Так, если расстояние между исходными значениями цветов больше или равно некоторому выбранному пользователем колориметрическому отклонению, а расстояние между симулированными цветами меньше данного колориметрического отклонения, то в таком случае цвета считаются различимыми нормальными трихроматами, но неразличимыми для людей с цветоаномалией, а текущее симулированное значение ключевого цвета из пункта 8 сохраняется в отдельный список. Причем колориметрическое отклонение имеет значение по умолчанию равное 4, являющееся минимальным колориметрическим отклонением, при котором цвета считаются различимыми [22], но которое пользователь может увеличивать по своему усмотрению из-за существующего цветового различия между изображениями. Возможность изменения колориметрического отклонения была реализована в связи с разным характером наблюдаемых изображений: изображения реального мира и природы с большим количеством цветов, а также изображения, например, вывесок и изображений из теста Ишихары с некоторым ограниченным цветовым разнообразием.

12. В случае, если таких сохраненных в список цветов больше 0, то для каждого значения пар из пункта 9 и значений из списка, заполненного в пункте 11, формируются неравенства согласно формуле

$$\sqrt{(l_o - l_i)^2 + (a_o - a_i)^2 + ((b_o - b_i) + \Delta b)^2} \geq \Delta_c, \quad (1)$$

где l_o, a_o, b_o – координаты значений из пар «ключ-значение» пункта 9, l_i, a_i, b_i – координаты значений из списка, полученного в пункте 11, Δb – искомое слагаемое, призванное увеличить координату b_o таким образом, чтобы расстояние между неразличимыми цветами стало больше настраиваемого пользователем колориметрического отклонения Δ_c .

13. Сформированные неравенства объединяются через логический оператор «И», затем решаются. Из полученных решений неравенств выбирается минимальное положительное значение. В случае отсутствия возможности решения неравенств выбирается заранее определенный пользователем коэффициент преобразования координаты b , который по умолчанию имеет нулевое значение.

Кроме того, если координата b_o уже представлена максимально возможным значением, то в таком случае составляются и затем решаются с нахождением минимального положительного значения неравенства вида

$$\sqrt{((l_o - l_i) + \Delta l)^2 + (a_o - a_i)^2 + (b_o - b_i)^2} \geq \Delta_c, \quad (2)$$

где l_o, a_o, b_o – координаты значений из пар «ключ-значение» пункта 9, l_i, a_i, b_i – координаты значений из списка, полученного в пункте 11, Δl – искомое слагаемое, призванное увеличить координату l_o таким образом, чтобы расстояние между неразличимыми цветами стало больше настраиваемого пользователем колориметрического отклонения Δ_c .

Если решить неравенства не представляется возможным, используется значение по умолчанию равное 4.

14. Затем в исходном изображении каждый пиксель, относящийся к тому или иному кластеру, увеличивает значение координаты b на величину, полученную в результате решения неравенств (1) или определенную пользователем. Значение же координаты L увеличивается либо на величину, полученную в результате решения неравенств (2), либо на определенное по умолчанию значение 4, либо остается неизменным, если неразличимый цвет не имеет координату b с максимальным значением. Стоит отметить, что значение коэффициента преобразования b всегда выбирается положительным, чтобы не произошла сильная потеря натуральности из-за перехода цвета в синие оттенки.

Кроме того, вводится также персонализированный коэффициент преобразования яркости l , применяемый к каждому неразличимому цвету, который по умолчанию имеет нулевое значение, но который пользователь может настроить в случае необходимости.

15. Преобразованное изображение конвертируется в цветовое пространство BGR для отображения на экране устройства.

Методика проведения эксперимента

Для выполнения процесса рекolorизации разработанный метод реализован на языке программирования Python. Так, на вход подается исходное изображение и настраиваемые пользователем параметры, а на выходе получается рекolorизованное изображение. В качестве исходных изображений взяты картинки из теста Ишихары, а также более реалистичные изображения со сложными цветовыми комбинациями. Для проведения экспериментальных исследований использовался ноутбук с процессором 11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-1135G7 2.40GHz и 32GB RAM.

Кроме того, для проверки качества рекolorизации использована методика исследований, включающая несколько этапов.

1. Для начала необходимо определить, каким образом цветоаномалии с дейтеранопией и протанопией воспринимают некоторое исходное изображение. Так, при помощи метода симуляции изображений Brettel et al. [21] исходное изображение

преобразуется таким образом, что человек с нормальным трихроматическим зрением видит, как исходное изображение воспринимает человек с той или иной формой дихромазии.

2. Далее, исходное изображение передается для рекolorизации в разработанный метод, который преобразует исходное изображение для протанопического или дейтеранопического зрения.

3. К рекolorизованным изображениям также применяется метод симуляции, в результате чего получаются симуляции рекolorизованных изображений.

4. На данном этапе происходит сравнение симулированных изображений из первого пункта с соответствующими симуляциями рекolorизованных изображений на основании объективной оценки качества рекolorизации. Качество рекolorизации оценивается эмпирически нормальным трихроматом при сравнении симулированных исходного и рекolorизованного изображений и определении усиления контраста между определяемой на картинке цифрой и ее фоном (появление возможности распознавания ранее не воспринимаемых дихроматом объектов на изображениях).

В качестве объективных оценок качества рекolorизации выступают глобальное хроматическое разнообразие GCD (global chromatic diversity) и оценка потери натуральности NL (naturalness loss). Эффективность метода также оценивается по времени выполнения.

Вычисляется глобальное хроматическое разнообразие GCD на основании формулы, представленной в [23], но обобщенной как вычисление среднего глобального хроматического разнообразия для изображения согласно формуле

$$GCD(i, j) = \frac{1}{K} \sum_{(i, j) \in K} \sqrt{(l_i - l_j)^2 + (a_i - a_j)^2 + (b_i - b_j)^2}, \quad (3)$$

где i и j – диапазон цветов в симулированном изображении, l_i, a_i, b_i – координаты пикселя i в цветовом пространстве CIEL*a*b*, l_j, a_j, b_j – координаты пикселя j в цветовом пространстве CIEL*a*b*, K – количество всех возможных комбинаций цветов в симулированном изображении.

Потеря натуральности цветов рекolorизованного изображения вычисляется при помощи выражения, представленного в работе Zhu et al. [24], следующим образом:

$$NL(I^t, I^r) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(a_i^t - a_i^r)^2 + (b_i^t - b_i^r)^2}, \quad (4)$$

где I^t – исходное изображение; I^r – рекolorизованное изображение; a_i^t, b_i^t – координаты пикселя исходного изображения в цветовом пространстве CIEL*a*b*; a_i^r, b_i^r – координаты соответствующего пикселя рекolorизованного изображения в цветовом пространстве CIEL*a*b*; N – размер матрицы изображения.

Результаты и их обсуждение

Как и указано в методике проведения эксперимента, получены симулированные изображения исходных картинок для людей с протанопией и дейтеранопией, затем исходные изображения рекolorизованы

для тех же форм цветоаномалии, а также получены симуляции рекolorизованных изображений. Для выполнения оценки качества рекolorизации симулированные изображения исходных картинок и симуляции рекolorизованных изображений объединены в таблицы, представленные на рисунках 1 и 2.

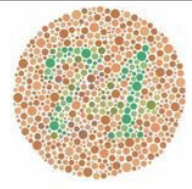
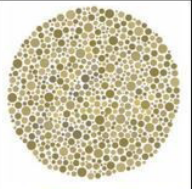
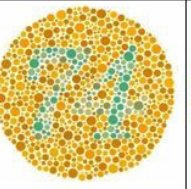
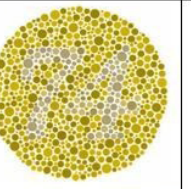
Исходное изображение	Симуляция	Рекolorизованное изображение	Симуляция рекolorизованного изображения	Колориметрическое отклонение неразличимых цветов, Δ_{cp}	Коэффициент преобразования, Δb_p	Коэффициент преобразования яркости, l_p
				20	40	1.57
				10	20	0.4

Рисунок 1. Результаты симуляции исходных и рекolorизованных изображений для протанопов

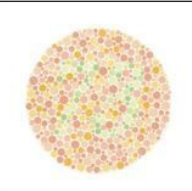
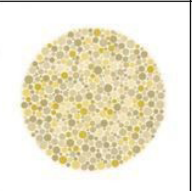
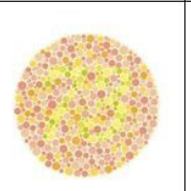
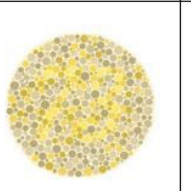
Исходное изображение	Симуляция	Рекolorизованное изображение	Симуляция рекolorизованного изображения	Колориметрическое отклонение неразличимых цветов, Δ_{cd}	Коэффициент преобразования, Δb_d	Коэффициент преобразования яркости, l_d
				10	30	1.57
				10	20	0

Рисунок 2. Результаты симуляции исходных и рекolorизованных изображений для дейтеранопов

Так, на рисунках 1 и 2 в первой колонке представлены исходные изображения, во второй колонке располагается симулированное по методу Brettel et al. [21] исходное изображение в соответствии с тем, как данное исходное изображение воспринимает человек с протанопией или дейтеранопией, затем располагается рекolorизованное исходное изображение и симулированное рекolorизованное изображение.

На основании оценки восприятия полученных симулированных результатов нормальным трихроматом определено, что различение на картинках искомой цифры улучшилось.

Результаты рекolorизации оцениваются и по таким объективным показателям качества, как потеря натуральности цветов рекolorизованного изображения и глобальное хроматическое разнообразие. Для уменьшения сложности и вре-

мени вычислений исходные изображения преобразовывались к размеру 20×20 пикселей, чего вполне достаточно для относительного сравнения величин. В таблице 1 представлены результаты вычислений потерь натуральности цветов для изображений, рекolorизованных разработанным методом для людей с протанопией и дейтеранопией, по формуле (4). Таблица 2 объединяет данные о значениях глобального хроматического разнообразия для симулированных исходных и рекolorизованных изображений согласно формуле (3).

Чем больше значение глобального хроматического разнообразия, тем больше значение контраста для соответствующего изображения. Так, видно, что у рекolorизованных изображений значение контраста больше, чем у исходных, что говорит об усилении контраста в результате рекolorизации.

Таблица 1. Потери натуральности цветов реколоризованного изображения для случаев дейтеранопии и протанопии

Форма дихромазии и соответствующая картинка	Потеря натуральности цветов реколоризованного изображения
$NL_{protanopia_Ishihara}$	20.15
$NL_{protanopia_flowers}$	7.43
$NL_{deutanopia_Ishihara}$	4.55
$NL_{deutanopia_butterfly}$	4.39

Таблица 2. Глобальное хроматическое разнообразие для случаев дейтеранопии и протанопии

Форма дихромазии и соответствующая картинка	Значение для симуляции исходного изображения	Значение для симуляции реколоризованного изображения
$GCD_{protanopia_Ishihara}$	51.39	58.69
$GCD_{protanopia_flowers}$	68.06	69.29
$GCD_{deutanopia_Ishihara}$	29.52	33.41
$GCD_{deutanopia_butterfly}$	52.07	54.43

Кроме того, считается, чем ближе значение потери натуральности к нулю, тем лучше. Стоит отметить, что в результате работы данного метода изменение натуральности цветов наблюдалось небольшое для более реалистичных изображений, но более выраженное для изображений теста Ишихары.

Время выполнения реколоризации для каждой из рассматриваемых форм дихромазии при использовании картинок размером 170 000 пикселей с 20 ключевыми красно-зелеными оттенками не превышало 3 с, что удовлетворительно для методов оптимизации.

Заключение

Разработан метод реколоризации изображений для помощи людям с дейтеранопией и протанопией. Особенностями данного метода являются нахождение неразличимых для дихроматов цветов при помощи настраиваемого колориметрического отклонения и изменение координат b и L неразличимых цветов таким образом, чтобы в результате преобразований неразличимые цвета одного изображения как можно сильнее отличались друг от друга, но в то же время наилучшим образом сохраняли свою натуральность.

Среди преимуществ метода выделяются следующие:

- возможность для каждого пользователя настроить в соответствии с индивидуальным восприятием визуальной информации такие персонализированные параметры реколоризации, как коло-

риметрическое отклонение неразличимых цветов, коэффициент преобразования координаты b и коэффициент изменения яркости изображений;

- реколоризация согласно разработанному методу допустима как для более реалистичных изображений, так и для графиков, вывесок, HTML-документов, интерфейсов приложений с ограниченными наборами цветов;

- все используемые в методе коэффициенты подробно описаны;

- удовлетворительное время выполнения, составляющее 3 с для изображений размером 170 000 пикселей.

Корректность метода подтверждается посредством рассмотрения нормальным трихроматом симулированного реколоризованного изображения для дейтеранопического и протанопического зрения, в результате чего ранее недоступные для зрения дихромата области изображения стали различимыми. Кроме того, объективно качество реколоризации оценено по показателям потерь натуральности цветов, которые для тестовых изображений имели значения в пределах от 4.39 до 20.15 в зависимости от присутствующих на изображениях цветов, а также по показателям глобальных хроматических разнообразий, которые были увеличены для всех тестовых изображений в результате реколоризации, что говорит об усилении контраста реколоризованных изображений.

REFERENCES

1. Jefferson L, Harvey R. Accommodating color blind computer users. *Proceedings of the 8th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*. 2006. pp. 40–47. **DOI:** 10.1145/1168987.1168996
2. Jefferson L, Harvey R. An interface to support color blind computer users. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2007. pp. 1535–1538. **DOI:** 10.1145/1240624.1240855
3. Deng Y, Wang Y, Ma Y, Bao J, Gu X. A fixed transformation of color images for dichromats based on similarity matrices. *Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Computing*. 2007. pp 1018–1028. **DOI:** 10.5555/1777454.1777568
4. Ma Y, Gu X, Wang Y. Color discrimination enhancement for dichromats using self-organizing color transformation. *Information Sciences*. 2008;179(6):830–843. **DOI:** 10.1016/j.ins.2008.11.01
5. Bao J, Wang Y, Ma Y, Gu X. Recoloring images for dichromats based on an improved adaptive mapping algorithm. *Proceedings of the International Conference on Audio, Language and Image Processing*. 2008. pp. 152–156. **DOI:** 10.1109/ICALIP.2008.4589958
6. Ruminski J, Wtorek J, Ruminska J, Kaczmarek M, Bujnowski A, Kocejko T, et al. Color transformation methods for dichromats. *Proceedings of the 3rd Conference on Human System Interactions*. 2010. pp. 634–641. **DOI:** 10.1109/HSI.2010.5514503
7. Wong A, Bishop W. Perceptually-adaptive color enhancement of still images for individuals with dichromacy. *Proceedings of the Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. 2008. pp. 2027–2032. **DOI:** 10.1109/CCECE.2008.4564901
8. Ching S-L, Sabudin M. Website image colour transformation for the colour blind. *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Technology and Development*. 2010. pp. 255–259. **DOI:** 10.1109/ICCTD.2010.5645874
9. Rasche K, Geist R, Westall J. Detail preserving reproduction of color images for monochromats and dichromats. *IEEE Computer Graphics and Applications*. 2005;25(3):22–30. **DOI:** 10.1109/MCG.2005.54
10. Rasche K, Geist R, Westall J. Re-coloring images for gamuts of lower dimension. *Computer Graphics Forum*. 2005;24(3):423–432. **DOI:** 10.1111/j.1467-8659.2005.00867.x
11. Wakita K, Shimamura K. SmartColor: disambiguation framework for the color blind. *Proceedings of the 7th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*. 2005. pp. 158–165. **DOI:** 10.1145/1090785.1090815
12. Kuhn GR, Oliveira MM, Fernandes LAF. An efficient naturalness-preserving image-recoloring method for dichromats. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2008;14(6):1747–1754. **DOI:** 10.1109/TVCG.2008.112
13. Chen W, Chen W, Bao H. An efficient direct volume rendering approach for dichromats. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2011;17(12):2144–2152. **DOI:** 10.1145/2470654.2481283
14. Flatla DR, Reinecke K, Gutwin C, Gajos KZ. SPRWeb: preserving subjective responses to website colour schemes through automatic recolouring. *Proceedings of the of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2013. pp. 2069–2078. **DOI:** 10.1145/2470654.2481283
15. Yang S, Ro YM. Visual contents adaptation for color vision deficiency. *Proceedings 2003 International Conference on Image Processing*. 2003;1:453–456. **DOI:** 10.1109/ICIP.2003.1246996
16. Lai C-L, Chang S-W. An image processing based visual compensation system for vision defects. *Proceedings of the 5th International Conference on Intelligent Information Hid-ing and Multimedia Signal Processing*. 2009. pp. 559–562. **DOI:** 10.1109/IIH-MSP.2009.126
17. Li H, Zhang L, Zhang X, Zhang M, Zhu G, Shen P, et al. Color vision deficiency datasets & recoloring evaluation using GANs. *Multimedia Tools and Applications*. 2020;79(37-38):27583–27614. **DOI:** 10.1007/s11042-020-09299-2
18. Chen L, Zhu Z, Huang W, Go K, Chen X, Mao X. Image recoloring for color vi-sion deficiency compensation using Swin transformer. *Neural Computing and Applications*. 2024;36:6051–6066. **DOI:** 10.1007/s00521-023-09367-2
19. Milivojevic ZN, Prlincevic B, Cekic M, Kostic D. Degradation recoloring deutan CVD image from block SVD watermark. *Cybernetics and Information Technologies*. 2024;24(1):137–156. **DOI:** 10.2478/cait-2024-0008
20. Ribeiro M, Gomes AJP. Recoloring algorithms for colorblind people: a survey. *ACM Computing Surveys*. 2019;52(4):1–37. **DOI:** 10.1145/3329118
21. Brettel H, Vienot F, Mollon JD. Computerized simulation of color appearance for dichromats. *Journal of the Optical Society of America A*. 1997;14(10):2647–2655. **DOI:** 10.1364/JOSAA.14.002647
22. Lyutov VP, Chetverkin PA, Golovastikov GY. *Color science and the basics of colorimetry*. Moscow: Yurait; 2023. 224 p. (In Russ.).
23. Zhu Z, Mao X. Image recoloring for color vision deficiency compensation: a survey. *The Visual Computer*. 2021;37:2999–3018. **DOI:** 10.1007/s00371-021-02240-0
24. Zhu Z, Toyoura M, Go K, Kashiwagi K, Fujishiro I, Wong T-T, et al. Personalized Image Recoloring for Color Vision Deficiency Compensation. *IEEE Transactions on Multimedia*. 2021;24:1721–1734. **DOI:** 10.1109/TMM.2021.3070108

SINITSYNA V. V.

IMAGE RECOLORING METHOD FOR PEOPLE WITH PROTANOPIA AND DEUTERANOPIA

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. As a result of the conducted research, a method was developed to help people with the most common forms of dichromacy – deuteranopia and protanopia. For people with protanopia, the transformation of colors with a predominant red component is carried out, for deuteranopes – with a predominant green component. The features of the described method are finding colors indistinguishable for dichromats using a customizable colorimetric deviation and changing the coordinates b and L of indistinguishable colors in such a way that as a result of the transformations, the indistinguishable colors of one image differ from each other as much as possible, but at the same time retain their naturalness in the best possible way. Among the advantages of this method, it is worth noting the ability for each user to customize such personalized recoloring parameters as the colorimetric deviation of indistinguishable colors, the transformation coefficient of coordinate b , and the transformation coefficient of brightness L in accordance with their individual perception of visual information. Recoloring according to the developed method is acceptable for both more realistic images and for charts, signs, HTML-documents, and application interfaces.

The correctness of the method was verified by examining a recolored image simulated by the Brettel et al. method for deuteranopic and protanopic vision with a normal trichromat, as a result of which areas of the image previously inaccessible to the dichromat's vision became distinguishable. The quality of recoloring was also assessed by the loss of color naturalness and global chromatic diversity. Thus, the loss of color naturalness for the test images had satisfactory values and varied within the range from 4.39 to 20.15 depending on the color component of the images. The global chromatic diversity of all test images was increased as a result of recoloring. The execution time of the method for both dichromacy cases indicates a satisfactory image processing speed and is 3 s for images of 170 000 pixels.

Keywords: color vision anomalies, dichromacy, protanopia, deuteranopia, recoloring, loss of color naturalness, global chromatic diversity, colorimetric deviation of indistinguishable colors, conversion coefficients, personalized recoloring parameters, execution time of the method, color space



Синицына Влада Владиславовна

Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники
Магистр, аспирант кафедры инженерной психологии и эргономики.

Vlada V. Sinitsyna

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Master, Postgraduate at the Engineering Psychology and Ergonomics Department

E-mail: vldasinitina1@gmail.com