МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ РАВНОКОНТРАСТНОГО ЦВЕТОВОГО ПРОСТРАНСТВА ДЛЯ ЗАДАННОЙ СИСТЕМЫ ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ И УСЛОВИЙ КОНТРОЛЯ

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-4-15-22

Поташников Алексей Михайлович,

Московский технический университет связи и информатики,
Москва, Россия, nickmikh@gmail.com

Власюк Игорь Викторович,

Московский технический университет связи и информатики,
Москва, Россия, ru3dlp@yandex.ru

Ключевые слова: цветное пространство, CIE LAB, порог цветоразличимости, равноконтрастное пространство, цветовая модель, зрительная система человека

проанализированы существующие в настоящее время цветовые равноконтрастные пространства и области их применения. Показано, что, с одной стороны, фактически существует в различных вариациях лишь одна цветовая модель такого типа, с другой стороны, существует множество приложений, где было бы желательно использование цветовой модели как с заранее заданными ограничениями по сложности и, соответственно, точности соответствия параметров зрительной системы, так и обеспечение возможности задания начальных условий проведения эксперимента. Такими параметрами могут быть, например, условия адаптации, угол поля зрения, различные временные параметры тестовых стимулов, поскольку зрительная система человека характеризуется сложной нелинейной многомерной функцией преобразования параметров стимулов в ощущения. Возможность применения "специализированных" моделей простираются от оптимизации представления информации, например, при раскрашивании изображений в псевдоцвета до создания отображающих устройств с персонализированными параметрами. Работа содержит обоснование с учетом известных параметров и характеристик зрительной системы человека и разработку методики проведения предварительных экспериментальных исследований, и обработку результатов ее применения на группе из 66 испытуемых. Далее рассмотрены все этапы обработки результатов эксперимента таким образом, что читатели смогут при необходимости выполнить аналогичную обработку для своих результатов экспериментов, полученных требуемых условиях. В отличие от предыдущих попыток создания равноконтрастного цветового пространства, удалось получить не имеющие разрывов выражения, позволяющее выполнять переход из пространств XYZ или RGB в предложенное и обратно. Полученное цветовое пространство уже применяется в решении практических задач оптимального цветового контрастирования объектов, при этом дальнейшим направлением работ является введение в модель зависимости цветоразличимости деталей объектов от их яркости, что, однако, требует значительного увеличения количества проводимых экспериментов.

Для цитирования:

Поташников А.М., Власюк И.В. Метод построения равноконтрастного цветового пространства для заданной системы отображения информации и условий контроля // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №4. С. 15-22.

For citation:

Potashnikov A.M., Vlasuyk I.V. (2020) Method of equal contrast color space construction for a given information visualization system and control conditions. T-Comm, vol. 14, no.4, pp. 15-22. (in Russian)

Введение

Во многих цифровых телевизионных системах, нацеленных на субъективное восприятие видеоданных, требуется обеспечить максимальное соответствие системы отображения информации параметрам зрительной системы человека для наилучшего восприятия цветового контраста изображения. К таким системам относятся системы сжатия видео, аппаратная часть организации субъективной оценки качества изображений, цветовые системы контрастирования чёрно-белых изображений и другие.

Одной из таких характеристик является цветовой контраст, то есть восприятие различий между двумя разными цветами. Оценка этого параметра может позволить создавать адаптивные уровни квантования, проводить сравнения цветовых охватов телевизионных систем.

Аналоги

В настоящее время в мире используются два пространства, в которых изменение цвета пропорционально заметности этого изменения с точки зрения зрительной системы человека: Hunter LAB [1] и, являющуюся по сути её развитием, CIE LAB [2]. Последняя получила в настоящее время широкое распространение благодаря более согласованному с зрительной системой компонентам, однако формулы её преобразования несколько сложнее и используют корень третьей степени. Несмотря на это, оба пространства имеют определённые недостатки. Так, Hunter LAB имеет сжатие в области жёлтых и расширение в области синих цветностей. CIE LAB имеет расширение в области жёлтых цветов. Как следствие, существуют сложности при определении видимого расстояния между цветами. В 2001 году была опубликована формула CIEDE2000 [3], позволяющая на основе CIE LAB получить приемлемое визуальное расстояние между цветами. Однако использование пространства с кубическими корнями и последующие громоздкие вычисления не применимо при обработке больших объёмов данных, что является частой задачей в телевизионных системах.

Кроме того, известно, что свойства зрительной системы существенно зависят от контекста и условий контроля и представленные для некоторых заданных условий зависимости фактически пригодны только для использования в близких по параметрам условиях.

Цель

Таким образом, целями настоящей работы являются оценка различимости градаций цвета и построение равноконтрастного пространства, с одной стороны превышающего рассмотренные выше по согласованности со зрительной системой человека, но с другой – более простого с вычислительной точки зрения, чем CIEDE2000. При этом методика должна быть легко модифицируемой для применения в других условиях видеоконтроля. Были решены следующие задачи: рассмотрена существующая цветовая модель на основе исследования Мак Адама, выбрана исходная цветовая модель для анализа различимости, поставлен эксперимент для уточнения порогов различимости цветов, рассчитаны коэффициенты разработанной равноконтрастной модели, сделаны выводы.

Постановка эксперимента

В целях разработки пространства на кафедре ТиЗВ был подготовлен эксперимент по определению порогов зависимости цветовых отличий зрительной системой человека. При этом предлагалось создать тестовые изображения, по которым испытуемые будут определять отличие цветов. Параметры предъявляемых при тестировании образцов обоснованы с учетом известных параметров и характеристик зрительного анализатора.

Для постановки эксперимента следует решить ряд задач и зафиксировать набор условий, поскольку общее количество воспринимаемых вариаций цвета велико для того, чтобы можно было технически реализовать репрезентативное число тестов. В связи с вышеизложенным, можно сформулировать задачи, которые должны быть решены для возможности реализации эксперимента.

1. Разработать такую схему проведения эксперимента, чтобы избежать применения сложно достижимых условий и специализированного оборудования, что позволит привлечь большее количество участников.

2. Базируясь на ортогональности аргументов видеоинформации (направления, время, цвет) выбрать с учетом свойств зрительной системы такую схему эксперимента, (размеры, форму, время предъявления, взаимное расположение) тестовых элементов, чтобы обеспечить максимальное отношение сигнал-шум на выходе зрительного анализатора человека с учетом того, что высокочастотные детали по времени и пространству, обладая хорошей заметностью, не обеспечивают на своей структуре хорошего отношения сигнал-шум, поскольку указанная заметность обеспечивается коррекцией уровней сигналов при первичной обработке.

В связи с изложенным, проведем анализ пространственной и временной характеристик зрительной системы человека.

Известно, что эксперимент будет состоять в сравнении образцов цвета на экране монитора с эталонными. Для того, чтобы не использовать свойства зрительной системы [4-7] в части подъема ЧКХ, тем самым избежав задействования апертурной коррекции зрительной системы, следует выбрать размер тестовых областей не меньше, чем обратная величина начала подъема ЧКХ зрения, то есть пространственная частота по крайней мере первой гармоники должна быть менее 1 пер/градус, при условии, что остальные гармоники будут малы по амплитуде. Это требование приводит к необходимости создания sinc-образных по амплитуде элементов. Но ввиду как неудобства создания такого элемента (вследствие бесконечных размеров), так и для исключения влияния изменения параметров цвета ВКУ от яркости, целесообразно отказаться от элементов такого типа в пользу элементов с равномерной заливкой. При этом, очевидно, гармоники сигналов этих тестовых элементов будут попадать в область нелинейности ЧКХ. Для частичной компенсации этого эффекта размеры тестовых элементов следует увеличить, чтобы понизить частоту их первой гармоники, соответственно, чтобы первые 3-4, наиболее интенсивные гармоники также попали в область до начала подъема ЧКХ. Таким образом, линейный размер элемента по вертикали и горизонтали должен составлять 3-4 градуса.

При условии, когда поле ясного видения, которое, как известно, по вертикали приблизительно составляет 10-12

градусов, соответствует высоте экрана, по вертикали может быть размещено не более 2-3 тестовых элементов.

Форма элемента должна соответствовать импульсной характеристике зрения человека для возможности накопления информации об этом элементе при подавлении сигналов фона и соседних элементов. С учетом анизотропии зрения, это должен быть не круг, а фигура ближе к квадрату. Следует выполнить скругление его углов для соответствия их формы ФРТ, то есть, радиус закругления должен быть около 0,05 градуса или $5 \cdot 10^{-3}$ от высоты экрана.

Минимальное расстояние между элементами определяется из условия, чтобы при анализе одного из элементов не вносился бы вклад от соседних элементов. Как видно из ФРТ зрительной системы, минимальное угловое расстояние должно составлять не менее 0,45 градуса. В противном случае, из-за отрицательного знака боковых лепестков ИХ, порог цветоразличимости будет снижен (повышена цветоразличимость) на трудно контролируемую величину. Эскиз тестовой области показан на рис. 1. На ней обозначены размеры элементов. В соответствии с обоснованием, приведенным выше, следует выбирать относительно размеров экрана $H > 25-50\%$, $D > 3.7-4.5\%$, $R \approx 0.5\%$

Рис. 1. Эскиз тестовой области

Для удобства оценивания, каждый соседний тестовый с тестовым элементом объект должен быть эталоном. Из всех видов распределений для простоты инструктажа испытуемых целесообразно выбрать со средним (в случае трех рядов) горизонтальным эталонным рядом элементов.

Чтобы избежать переходного процесса по яркости при анализе различных образцов, яркость фона и образцов должна быть равной. Фоновые области целесообразно сделать нейтрально серыми в соответствии с колориметрией белого цвета используемой видеоинформационной системы.

Поскольку определены параметры одного эксперимента, перейдем анализу вариантов последовательного проведения этих экспериментов. Для этого проведем анализ временной импульсной характеристики зрительной системы. Из кривой видно, что переходной процесс зрительной системы составляет менее 0,2 с по протяженности при условии полной адаптации.

Таким образом, для оценивания образцов оп эталону требуется не менее $2(0,2 n_s) + t_a$ секунд, где n_s — число образцов, t_a — время анализа и принятия решения, принимаем 5 с. Формула получена исходя из того, что каждый образец нужно сравнить с эталоном и что человек в состоянии одновременно анализировать и регистрировать образцы. Например, для экрана с 12 образцами минимальное время анализа для такого случая составит 9,8 с.

Для определения количественного состава тестов следует ограничить время тестирования. [8] не дает конкретных рекомендаций по ограничению времени проведения эксперимента. В связи с этим, можно руководствоваться условиями безопасной работы за ЭВМ, согласно которым время работы не должно превышать 6 часов с перерывами 15 минут в час.

Для выполнения тестирования каждому участнику предлагается предъявить пакет тестов. Каждый тест предполагает выделение объектов, отличающихся, по мнению участника, от эталона. Объекты каждого теста имеют близкие к эталону насыщенности и цветовые тона и равную яркость. Методика предполагает использование для каждого эталонного цвета предъявление смещенных по цвету 24 цветов (по 2 теста на каждый эталонный цвет). Предполагается, что ввиду малости смещения, функция чувствительности изменения цвета по отношению к эталону может считаться четной.

Всего предполагается в каждом эксперименте предъявить 100 эталонных цветов. Эксперимент делится по времени на три подэксперимента. Таким образом, каждый эксперимент состоит из 200 тестов с минимальным временем выполнения 35 минут (10 секунд на тест). В пределах каждого из них предполагается последовательно предъявлять цветовые эталоны дополнительных цветов для снижения влияния эффекта цветовой адаптации.

Ввиду неопределенности числа участников тестирования, цвета и яркости эталонов подэкспериментов предполагается для каждого участника выбирать по псевдослучайному закону с равномерным распределением вероятностей так, чтобы равномерно покрыть весь диапазон видимых цветов. Таким образом, для генерации эталонных цветов в пространстве XYZ генерируется равномерная объемная решетка с числом узлов, равным требуемому числу тестов. Далее сетка смещается по осям на случайную величину не более $\pm$ половины шага ячеек решетки. В результате в координаты узлов и будут использоваться в эксперименте как координаты эталонных цветов. Случайное смещение применено вследствие неопределенного количества участников.

Методика обработки результатов в целом может быть использована из рекомендации МСЭ-R BT.500-13. Дополнительно могут быть исключены участники, допускающие более 6 за эксперимент выделений объектов, имеющих меньшие отличия при невыделении объектов с большими отличиями, а также выделившие все или не выделившие ни одного объекта. Все результаты таких тестов вне зависимости от дисквалификации участников, должны быть исключены.

Выбор цветового пространства

Метод создания равноконтрастного цветового пространства основан на преобразовании известного пространства таким образом, чтобы пороги заметности отличий цвета по всей области были одинаковые.

От выбора исходного пространства зависит как сложность результирующего преобразования, так и удобство его использования. Кроме того, использование того или иного пространства при подготовке эксперимента влияет на количество требуемых тестов. В качестве возможных кандидатов были выбраны два цветовых пространства HSB и XYZ.

При эксперименте по анализу различимости зрительной системы использование цветового пространства HSB является удобным, поскольку оно согласуется с цветовым восприятием в мозгу человека [9]. Однако функция преобразования компоненты H в это пространство имеет изломы, как видно формулы:

$$H = \begin{cases} 0 & \text{если } Max > Min; \\ 60 \frac{G - B}{Max - Min} & \text{если } Max = R \text{ и } G \geq B \\ 60 \frac{G - B}{Max - Min} + 360 & \text{если } Max = R \text{ и } G < B \\ 60 \frac{B - R}{Max - Min} + 120 & \text{если } Max = G \\ 60 \frac{R - G}{Max - Min} + 240 & \text{если } Max = B \end{cases} \quad (1)$$

Поэтому практическое использование результатов исследования (например, при разработке оптимальных преобразователей свет сигнала в камерах) не целесообразно, поскольку компоненты пространства не имеют полиномиальных преобразований в основные цветовые пространства, применяемые в современных системах.

В связи с этим, методика оценки различимости зрительной системой человека количества градаций цвета в зависимости от тона была изменена путём введения цветового пространства XYZ, имеющее линейное преобразование в RGB и полученное на основе характеристик восприятия зрительной системой человека.

К недостаткам данной системы можно отнести то, что, хотя все видимые цвета можно представить триплетом $[X, Y, Z]$, при диапазоне каждой из компонент $[0-1]$, не все триплеты представляют реальные цвета (рис. 2).

Рис. 2. Расположение реальных цветов в пространстве XYZ (по рекомендации МСЭ-R BT.709-6)

Исходные данные эксперимента

Для проведения эксперимента были выбраны цвета, удовлетворяющие двум условиям. Они расположены в сетке XYZ с шагом 0.1111 и они являются реальными. Шаг был выбран таким образом, чтобы каждый испытуемый проходил тест с 100 цветами. Это количество является оптимальным, поскольку при меньшем количестве цветов производится недостаточно экспериментов для получения репрезентативных результатов, а большее количество экспериментов вызывает усталость, что снижает их качество. Конечные цвета представлены на рис. 3.

Рис. 3. Экспериментальные цвета и их координаты в пространстве XYZ

Для увеличения количества экспериментальных данных, а также в силу невозможности проведения большого числа тестов с одним испытуемым, сетка тестовых цветов (рис. 3) для каждого испытуемого смещалась в пределах половины шага сетки. Таким образом, каждый испытуемый проходил исследования с разными тестами, что позволило лучше покрыть область реальных цветов. Исследование проводилось над 66 испытуемыми, таким образом, получены результаты для 6600 разных цветов.

Результатами эксперимента оценки различимости зрительной системой человека является массив векторов v_{ij} в плоскости XZ для каждого эталонного цвета i в трёхмерном пространстве XYZ, представляющих собой отклонения компонент X и Z (кроме компоненты Y, представляющую яркость), а также результат эксперимента (видимость отклонения данного отклонения) r_{ij} для каждого вектора (рис. 4).

Обработка результатов производится в несколько этапов:

1. Для каждого из эталонных цветов определение областей, в пределах которых цвета не различимы зрительной системой испытуемого;
2. Оценка совокупности результатов каждого испытуемого для отбраковки заведомо ложных результатов (при наличии у испытуемого особенностей зрительной системы, например, дальтонизма);
3. Усреднение остальных результатов экспериментов;
4. Определение аналитического выражения зависимостей границ области различимости цветов по направлениям цветового тона и насыщенности от яркости, насыщенности и цветового тона.

Рис. 4. Результаты эксперимента в пространстве XYZ для одного испытуемого: а) изометрия; б) в плоскости XZ

В рамках эксперимента для определения видимых глазом отклонений использовалось нормированное пространство xuY :

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}; y = \frac{Y}{X+Y+Z}; Y = Y. \quad (2)$$

Нормировка пространства позволяет учитывать яркость при выборе шага эксперимента, поскольку при большей яркости отличия менее заметны.

Исследовалась различимость цветов по плоскости xu (цветовой тон – насыщенность) в направлениях x , y и под 45° по 16 векторов в каждом направлении:

$$v_{i,j} = \begin{cases} [x_i + k(j+1), y_i], j \in [0,7] \\ \left[x_i + \frac{k}{\sqrt{2}}(j-7), y_i + \frac{k}{\sqrt{2}}(j-7) \right], j \in [8,15] \\ \left[x_i + \frac{k}{\sqrt{2}}(j-15), y_i - \frac{k}{\sqrt{2}}(j-15) \right], j \in [16,23] \\ [x_i, y_i + k(j-23)], j \in [24,31] \end{cases} \quad (3)$$

$$v_{i,j+32} = \begin{cases} [x_i - k(j+1), y_i], j \in [0,7] \\ \left[x_i - \frac{k}{\sqrt{2}}(j-7), y_i - \frac{k}{\sqrt{2}}(j-7) \right], j \in [8,15] \\ \left[x_i - \frac{k}{\sqrt{2}}(j-15), y_i + \frac{k}{\sqrt{2}}(j-15) \right], j \in [16,23] \\ [x_i, y_i - k(j-23)], j \in [24,31] \end{cases}$$

где i – номер эксперимента, j – номер вектора оцениваемого цвета, $v_{i,j}$ – вектор отклонения цвета, x_i и y_i – координаты эталонного цвета, $k = 0.003$ – коэффициент удалённости.

Экспериментальные данные представлены на рис. 3. На графике кружочками отмечены вектора $x_{i,j}$, соответствующие цветам, отмеченным испытуемым как заметные отличия ($v_{i,j} = 1$), а крестиками – отмеченные как незаметные отличия ($v_{i,j} = 0$).

Равноконтрастное пространство

На основании данных каждого эксперимента i определяется эллиптическая область неразличимости, соответствующая экспериментальным данным:

$$Area_i(X, Y) = \frac{(X - X_i)^2}{\Delta X_i^2} + \frac{(Z - Z_i)^2}{\Delta Z_i^2} < 1 \quad (4)$$

где ΔX и ΔZ – длины полуосей эллипса в направлениях цветового тона и насыщенности соответственно, X и Z – координаты в плоскости $X-Z$.

Величины ΔX и ΔY определяются из функции логистической регрессии:

$$\Delta X_i, \Delta Z_i = \arg \min \left(\sum_{j=0}^{64} -r_{i,j} \log(\text{sig}(v_{i,j}, \Delta X_i, \Delta Z_i)) - (1 - r_{i,j}) \log(1 - \text{sig}(v_{i,j}, \Delta X_i, \Delta Z_i)) \right) \quad (5)$$

где $\text{sig}(x, \Delta X, \Delta Z)$ – функция вероятности различимости вектора в зависимости от длин полуосей эллипса области различимости:

$$\text{sig}(v, \Delta X, \Delta Z) = \frac{1}{1 + e^{\left(\frac{v(1)^2 + v(2)^2}{\Delta X^2 + \Delta Z^2} - 1 \right)}} \quad (6)$$

Таким образом, определяется матрица размеров областей неразличимостей для всех исходных данных.

Из дальнейшей обработки исключаются результаты испытуемых, не подходящие по некоторым критериям:

1. Результаты измерений таковы, что для шести и более эталонных цветов, выделены как незаметные отличия, превышающие на четыре уровня квантования те, которые выделены как заметные;
2. Исследуемая окрестность эталонного цвета не достаточна для измерения области неразличимости (в одном из направлений все отклонения отмечены как незаметные);
3. Отношение длин полуосей эллипса более, чем в полтора раза отличается от средних по всем испытуемым для близких цветов;
4. Длины полуосей отрицательны, что возможно, если результаты в направлении под 45° заметно отличаются от направлений вдоль X и Z .

По этим критериям было исключено 29% испытаний.

На рисунке 5 изображены определённые области для выборки из 5% экспериментов (столбиками отмечены координаты тестовых цветов).

Рис. 5. Результаты исследования испытуемых

Для определения функции преобразования пространства XYZ в равноконтрастное пространство $X'YZ'$ следует определить следующие функции:

$$\begin{aligned} X' &= f(X, Y, Z) \\ Z' &= g(X, Y, Z) \end{aligned} \quad (7)$$

В равноконтрастном пространстве $X'YZ'$ размеры эллипсов для каждого из эталонных цветов должны быть одинаковы. Рассмотрим функцию $f(X, Y, Z)$ для заданных $Y=Y_0$ и $Z=Z_0$:

$$f_X(X) = f(X, Y_0, Z_0) \quad (8)$$

Длина полуоси области для любого эксперимента ΔX_i в пространстве $X'YZ'$ можно представить через функцию $f_X(X)$ следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta X'_i &= X'_{i2} - X'_i \\ X'_i &= f_X(X_i) \\ X'_{i2} &= f_X(X_i + \Delta X_i) \\ \Delta X'_i &= f_X(X_i + \Delta X_i) - f_X(X_i) \end{aligned} \quad (9)$$

где X'_{i2} – максимальное незаметное значение компоненты X в пространстве $X'YZ'$, $Y_0 = Y_i$ и $Z_0 = Z_i$.

Таким образом, длина полуоси эллипса $\Delta X'_i$ в цветовом пространстве $X'YZ'$ в пределе равна:

$$dX'_i = df_X(X) \quad (10)$$

Аналогичными рассуждениями можно найти формулу для полуоси области в направлении $Z - \Delta Z'_i$:

$$\begin{aligned} g_Z(Z) &= g(X_0, Y_0, Z) \\ \Delta Z'_i &= Z'_{i2} - Z'_i \\ Z'_i &= g_Z(Z_i) \\ Z'_{i2} &= g_Z(Z_i + \Delta Z_i) \\ \Delta Z'_i &= g_Z(Z_i + \Delta Z_i) - g_Z(Z_i) \\ dZ'_i &= dg_Z(Z) \end{aligned} \quad (11)$$

где Z'_{i2} – максимальное незаметное значение насыщенности в пространстве $X'YZ'$, $X_0 = X_i$ и $Y_0 = Y_i$.

В равноконтрастном пространстве величины dX' и dZ' должны быть постоянны при любых X', Y', Z' :

$$\begin{aligned} df(X, Y, Z) &= \text{const} \\ dg(X, Y, Z) &= \text{const} \end{aligned} \quad (12)$$

Следовательно, производные функции $f(X, Y, Z)$ и $g(X, Y, Z)$ обратно пропорциональны длине полуосей областей незаметности в пространстве XYZ :

$$\begin{aligned} \frac{df(X, Y, Z)}{dX} &= \frac{\text{const}}{dX(X, Y, Z)} \approx \frac{\text{const}}{\Delta X(X, Y, Z)} \\ \frac{dg(X, Y, Z)}{dZ} &= \frac{\text{const}}{dZ(X, Y, Z)} \approx \frac{\text{const}}{\Delta Z(X, Y, Z)} \end{aligned} \quad (13)$$

Функции преобразования в равноконтрастное пространство можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} f(X, Y, Z) &= k_X \int \frac{1}{\Delta X(X, Y, Z)} dX \\ g(X, Y, Z) &= k_Z \int \frac{1}{\Delta Z(X, Y, Z)} dZ \end{aligned} \quad (14)$$

где k_X и k_Z – константы, определяющие пределы значений функций $f(X, Y, Z)$ и $g(X, Y, Z)$. Выбор данных коэффициентов не вносит изменений в степень равноконтрастности. Поэтому для удобства использования пусть все реальные цвета должны лежать в диапазоне значений $[0;1]$ для всех компонент пространства $X'YZ'$. Тогда коэффициенты можно найти по следующей формуле:

$$\begin{aligned} k_X &= \frac{1}{\max \left(\int \frac{1}{\Delta X(X, Y, Z)} dX \right)} \\ k_Z &= \frac{1}{\max \left(\int \frac{1}{\Delta Z(X, Y, Z)} dZ \right)} \end{aligned} \quad (15)$$

Задача нахождения аналитических значений функций $f(X, Y, Z)$ и $g(X, Y, Z)$ сводится к аппроксимации значений, обратных длинам полуосей областей неразличимости с последующим их интегрированием вдоль соответствующих направлений.

Определим производные функции через многочлен 3-го порядка:

$$\begin{aligned} \frac{df(X, Y, Z)}{dX} &= a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 Z + a_4 X^2 + a_5 XY + a_6 Y^2 + a_7 XZ + \\ &+ a_8 YZ + a_9 Z^2 + a_{10} X^3 + a_{11} X^2 Y + a_{12} XY^2 + a_{13} Y^3 + a_{14} X^2 Z + a_{15} XYZ + \\ &+ a_{16} Y^2 Z + a_{17} XZ^2 + a_{18} YZ^2 + a_{19} Z^3 \\ \frac{dg(X, Y, Z)}{dZ} &= b_0 + b_1 X + b_2 Y + b_3 Z + b_4 X^2 + b_5 XY + b_6 Y^2 + b_7 XZ + \\ &+ b_8 YZ + b_9 Z^2 + b_{10} X^3 + b_{11} X^2 Y + b_{12} XY^2 + b_{13} Y^3 + b_{14} X^2 Z + b_{15} XYZ + \\ &+ b_{16} Y^2 Z + b_{17} XZ^2 + b_{18} YZ^2 + b_{19} Z^3 \end{aligned} \quad (16)$$

Найдём коэффициенты a_i и b_i аппроксимацией результатов экспериментов методом линейной регрессии как:

$$a = \arg \min \left(\sum_{i=1}^m \left(\frac{df(X_i, Y_i, Z_i)}{dX} \right)^2 - \frac{1}{\Delta X_i^2} + \lambda \sum_{j=1}^{19} a_j^2 \right) \quad (17)$$

$$b = \arg \min \left(\sum_{i=1}^m \left(\frac{dg(X_i, Y_i, Z_i)}{dZ} \right)^2 - \frac{1}{\Delta Z_i^2} + \lambda \sum_{j=1}^{19} b_j^2 \right)$$

где a и b – вектор коэффициентов a_i и b_i , m – количество экспериментов, λ – коэффициент регуляризации, равный 0.3.

Коэффициенты определённых аппроксимационных многочленов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты аппроксимационных многочленов производных функций $f(X, Y, Z)$ и $g(X, Y, Z)$

I	i	b_i	I	a_i	b_i
0	3.43	4.48	10	0	-0.79
1	-5.7	-4.33	11	1.08	2.48
2	0.5	-1.73	12	0.82	2.02
3	-2.8	-6.2	13	-0.93	-2.14
4	0.02	0.55	14	0	-2.11
5	1.7	4	15	0.26	-0.25
6	-1.18	-3.68	16	-0	-1.98
7	2.80	3.71	17	0	-0.88
8	3.4	7.90	18	-2.95	0.16
9	-0.30	1.62	19	1	-0.95

Таким образом, функции перехода $f(X, Y, Z)$ и $g(X, Y, Z)$ можно получить интегрированием соответствующих многочленов. На рисунках 6а,б приведены зависимости $f(X, Y, Z)$ и $g(X, Y, Z)$ от цветового тона и насыщенности при максимальной яркости.

а)

б)

Рис. 6. Функции преобразования пространства XYZ в равноконтрастное пространство при $Y = 0.5$: а) $f(X, Y, Z)$; б) $g(X, Y, Z)$

Переход в равноконтрастное пространство $X'YZ'$ осуществляется из пространства XYZ следующим преобразованием:

$$X'(X, Y, Z) = f(X, Y, Z) = 3.43X - 2.85X^2 + 0.55XY - 2.82XZ + 0.007X^3 + 0.86X^2Y - 1.18XY^2 + 1.4X^2Z + 3.42XYZ - 0.3XZ^2 + 0.04X^4 + 0.36X^3Y + 0.41X^2Y^2 - 0.93XY^3 + 0.067X^3Z + 0.13X^2YZ - 0.73XY^2Z + 0.08X^2Z^2 - 2.95XYZ^2 + 1.27XZ^3 - 0.73XY^2Z + 0.08X^2Z^2 - 2.95XYZ^2 + 1.27XZ^3 \quad (18)$$

$$Y'(X, Y, Z) = Y$$

$$Z'(X, Y, Z) = g(X, Y, Z) = 4.48Z - 4.33XZ - 1.73YZ - 3.1Z^2 + 0.55X^2Z + 4XYZ - 3.68Y^2Z + 1.86XZ^2 + 3.95YZ^2 + 0.54Z^3 - 0.79X^3Z + 2.48X^2YZ + 2.02XY^2Z - 2.14Y^3Z - 1.05X^2Z^2 - 0.13XYZ^2 - 0.99Y^2Z^2 - 0.29XZ^3 + 0.053YZ^3 - 0.237Z^4.$$

На рисунке 7 приведено преобразование равномерной сетки цветов пространства XYZ при $Y=0.1$ в пространство $X'YZ'$, шаг сетки равен 0.1.

Рис. 7. Преобразование равномерной сетки пространства XYZ в пространство $X'YZ'$

Выводы

Проведённое в рамках статьи исследование позволило рассчитать равноконтрастное пространство, в котором визуальное расстояние между цветами приближено к евклидову, при условии равной яркости.

При этом использованные многочлены четвёртого порядка позволяют осуществлять быстрый пересчёт в пространство XYZ и далее в RGB, при этом полученные функции удобны при математических обработках за счёт отсутствия критических точек, что имеет место, например, в CIEDE2000 [3].

Использование данного пространства может оптимизировать цветовое квантование в современных кодеках. Кроме того, возможно проводить анализ цветового охвата при про-

ведении измерений телевизионных систем. С использованием результатов работы позволит оптимизировать количество и спектральные характеристики светофильтров в телевизионных камерах.

Недостатком цветового пространства является отсутствие равноконтрастности вдоль компоненты Y , определяющей яркость. В дальнейшем планируется проведение исследований в данном направлении.

Литература

1. Hunter, Richard S., and Harold, Richard W. The Measurement of Appearance, 2nd ed., John Wiley and Sons, Inc. New York, NY USA, 1987.
2. CIE International Commission on Illumination, Recommendations on Uniform Color Spaces, Color-Difference Equations, Psychometric Color Terms, Supplement No. 2 to CIE Publication No. 15, Colorimetry, 1971 and 1978.
3. Gaurav Sharma, Wencheng Wu, Edul N. Dalal. The CIEDE2000 Color-Difference Formula: Implementation Notes, Sup-

plementary Test Data, and Mathematical Observation, COLOR research and application, Vol. 30, No. 1, Feb. 2005

4. Mark D. Fairchild Color appearance models. Munsell color science laboratory Rochester Institute of Technology, USA. 2004. 437 с.

5. Власюк И.В. Разработка модели зрительной системы человека для метода объективного контроля качества изображений в системах цифрового телевидения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2009. №5. С. 189-191.

6. Безруков В.Н. О некоторых особенностях характеристик зрительной системы наблюдателя телевизионных изображений // Труды учебных институтов связи, 1976. № 74. С. 28-36.

7. Eye, Brain, and Vision, David H. Hubel. Volume 22, Scientific American Library, distributed by W. H. Freeman & Co., New York, 1988. 240 p.

8. Рекомендация МСЭ-R BT.500-13 [Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures [электронный ресурс] Режим доступа: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.500-13-201201-I!!PDF-R.pdf.

9. Vlasuyk I.V., Potashnikov A.M., Romanov S.G. and Balobanov A.V. Synthesis of the Perceptually Linear Color Space Using Machine Learning Methods // 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russia, 2019, pp. 1-7.

METHOD OF EQUAL CONTRAST COLOR SPACE CONSTRUCTION FOR A GIVEN INFORMATION VISUALIZATION SYSTEM AND CONTROL CONDITIONS

Aleksei M. Potashnikov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, nickmikh@gmail.com
Igor V. Vlasuyk, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, ru3dlp@yandex.ru

Abstract

The paper analyzes the current use of equal-contrast color spaces and shows that, on the one hand, in fact, there is only one such color model of in various variations, on the other hand, there are many applications where it would be desirable to use a color model with both predefined restrictions on the complexity and, accordingly, the accuracy of matching the parameters of the visual system, and the ability to set the initial conditions of the experiment, such as, for example, adaptation conditions, field of view, various temporal parameters of test stimuli because the human visual system is characterized by a complex nonlinear multidimensional function transformation parameters of sense stimuli. The possibility of using "specialized" models ranges from optimizing the presentation of information, for example, when painting images in pseudo colors, to creating display devices with personalized parameters. The work contains a justification, taking into account the known parameters and characteristics of the human visual system, and the development of methods for conducting preliminary experimental studies, and processing the results of its application in a group of 66 subjects. Next, we consider all the stages of processing the experimental results in such a way that, if necessary, readers can perform similar processing for their experimental results obtained with the required conditions. Unlike previous attempts to create an equal-contrast color space, it was possible to obtain non-discontinuous expressions that allowed us to perform transitions from XYZ or RGB spaces to the proposed one and vice versa. The resulting color space is already used in solving practical problems of optimal color contrasting of objects, while a further area of work is the introduction of the dependence of color differentiation of parts of objects on their brightness into the model, which, however, requires a significant increase in the number of experiments.

Keywords: color space, CIE LAB, color distinguishability threshold, equal contrast space, color model, human visual system.

References

1. Hunter, Richard S., and Harold, Richard W. (1987). *The Measurement of Appearance*, 2nd ed., John Wiley and Sons, Inc. New York, NY USA.
2. CIE International Commission on Illumination, Recommendations on Uniform Color Spaces, Color-Difference Equations, Psychometric Color Terms, Supplement No. 2 to CIE Publication No. 15, Colorimetry, 1971 and 1978.
3. Gaurav Sharma, Wencheng Wu, Edul N. Dalal. (2005). The CIEDE2000 Color-Difference Formula: Implementation Notes, Supplementary Test Data, and Mathematical Observation, COLOR research and application, Vol. 30, Num. 1, Feb. 2005.
4. Mark D. Fairchild. (2004). *Color appearance models*. Munsell color science laboratory Rochester Institute of Technology, USA. 437 p.
5. Vlasuyk I.V. (2009). Development of a model of the human visual system for the method of objective quality control of images in digital television systems. *T-Comm*. No. 5, pp. 189-191.
6. Bezrukov V.N. (1976). On some features of the characteristics of the visual system of an observer of television images. *Proceedings of educational institutes of communication*. No. 74, pp. 28-36.
7. Eye, Brain, and Vision, David H. Hubel. (1988). Vol. 22, Scientific American Library, distributed by W. H. Freeman & Co., New York. 240 p.
8. Recommendation ITU-R BT.500-13 [Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures [electronic resource] Access mode: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.500-13-201201-I!!PDF-R.pdf
9. I.V. Vlasuyk, A.M. Potashnikov, S.G. Romanov and A.V. Balobanov. (2019). Synthesis of the Perceptually Linear Color Space Using Machine Learning Methods. *2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russia, pp. 1-7.