

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. ЦВЕТОВЫЕ МОДЕЛИ И ПРОСТРАНСТВА

Цветовая система, называемая также цветовым пространством или системой цветов, дает возможность описания цветов некоторым стандартным, общепринятым образом. Цветовая система определяет некоторую систему координат и подпространство внутри этой системы, в котором каждый цвет представляется единственной точкой.

На практике большинство современных цветовых моделей ориентированы либо на устройства цветовоспроизведения (например, цветные мониторы или принтеры), либо на определенные прикладные задачи (такие как создание цветной графики в анимации). Наиболее часто используемыми аппаратно-ориентированными цветовыми моделями являются модель RGB для цветных мониторов и широкого класса цветных видеокамер; модели CMY и CMYK для цветных принтеров; модели HSL и HSV, хорошо соответствующие цветовосприятию человека [1].

1.1. Восприятие цвета человеком

Исаак Ньютон обнаружил, что при прохождении луча солнечного света через стеклянную призму выходящий поток лучей не является белым, но состоит из непрерывного спектра цветов, от фиолетового цвета на одном конце до красного – на противоположном (рис. 5.1). Этот эксперимент доказал, что белый цвет не является простейшим, а состоит из множества различных цветов.

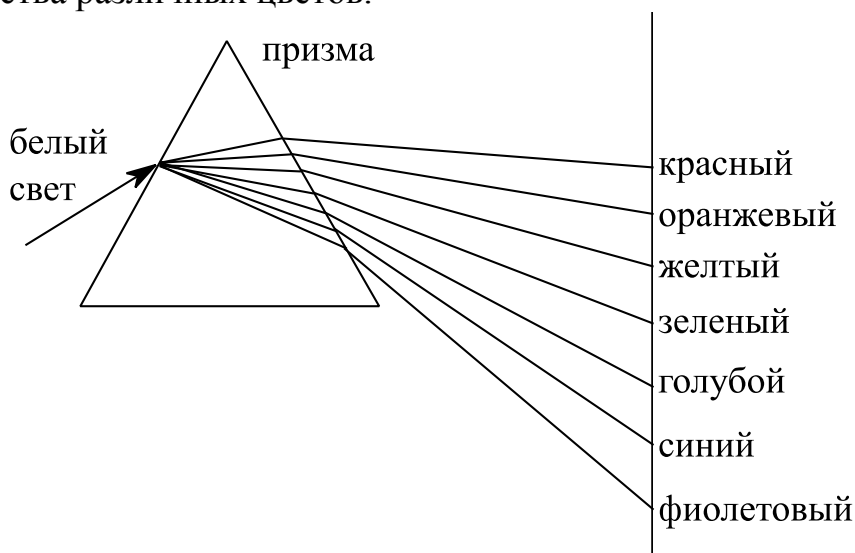


Рис. 1.1. Опыт Ньютона по разложению белого цвета в спектр

Вообще цвет, воспринимаемый человеком, определяется характером отраженного от объекта света, и зависит от источника света, типа отражающей поверхности и восприимчивостью зрительной системы человека.

Как глаз человека воспринимает свет. На сетчатке глаза находятся два типа рецепторов: палочки и колбочки [2]. Палочки восприимчивы к яркости, т. е. хорошо различают оттенки серого цвета, используются нами преимущественно в темное время суток. Цвет воспринимается только колбочками. Колбочки бывают трех видов, их чувствительность к световым излучениям различного спектра представлены на рис. 5.2.

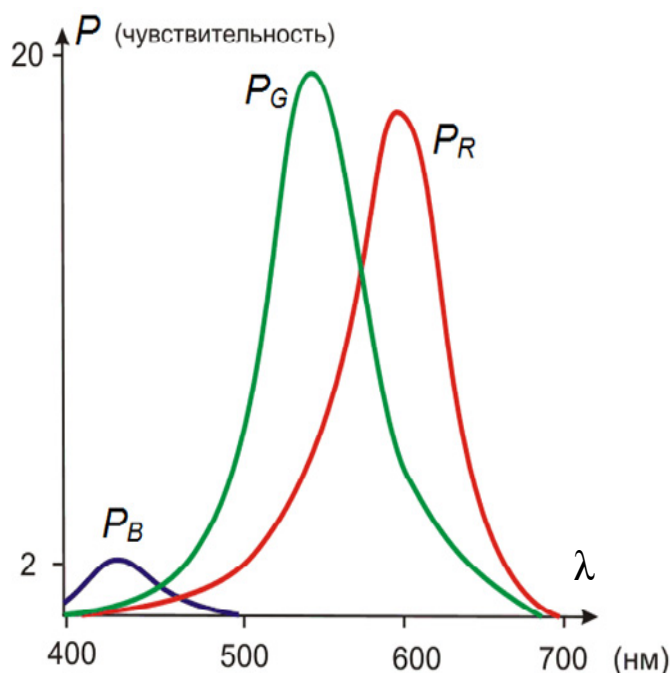


Рис. 1.2. Чувствительность трех типов колбочек к разным участкам спектра

Суммарные по каждому из трех диапазонов интенсивности и воспринимаются человеком как разные цвета (красный — R , зеленый — G , синий — B):

$$R = \int I(\lambda) \cdot P_R(\lambda) d\lambda; \quad G = \int I(\lambda) \cdot P_G(\lambda) d\lambda; \quad B = \int I(\lambda) \cdot P_B(\lambda) d\lambda,$$

где $I(\lambda)$ — зависимость интенсивности света от длины волны.

Заметим, что восприимчивость к синему цвету значительно ниже, чем к двум другим [3].

Сумма чувствительностей трех типов колбочек определяет чувствительность глаза к интенсивности света в данном диапазоне λ (рис. 1.3):

$$Y(\lambda) = \int I(\lambda) P(\lambda) d\lambda, \quad \text{где} \quad P(\lambda) = P_R(\lambda) + P_G(\lambda) + P_B(\lambda).$$



Рис. 1.3. Суммарная чувствительность колбочек

Существенным аспектом в понимании цвета является учет различий в моделировании цвета, в ситуации, когда наблюдатель смотрит на источник света, и цвета, когда наблюдатель смотрит на поверхность, отражающую свет. Оказалось, что эти два случая описываются различными моделями.

Назначение цветовой модели состоит в том, чтобы стандартизировать и унифицировать процесс описания цветов. По существу, цветовая модель определяет некоторую систему координат, в которой каждый цвет представляется единственной точкой.

1.2. Цветовая модель RGB

В модели RGB любой цвет представляется красным (*Red*), зеленым (*Green*) и синим (*Blue*) – первичными основными компонентами. Модель является аддитивной – это значит, что получение необходимого цвета определяется суммой основных компонент цветовой модели: *R*, *G* и *B*.

В основе модели лежит декартова система координат. Цветовое пространство RGB представляет собой куб, показанный на рис. 1.4. Точки, отвечающие красному, зеленому и синему компонентам, расположены в трех вершинах куба, лежащих на координатных осях. Голубой (*Cyan*), пурпурный (*Magenta*) и желтый (*Yellow*) являются дополнительными к *R*, *G*, *B* и располагаются в трех противоположных им вершинах куба. Черный цвет находится в начале координат, а белый – в наиболее удаленной от начала координат вершине. Ось оттенков серого цвета (точки с равными значениями *RGB*) совпадает с диагональю, соединяющей черную и белую вершины [4].

Главной целью модели RGB является ее применение для вывода изображений в электронных системах, представляющих собой источник

света. Это могут быть экраны телевизоров, мониторов и мобильных телефонов. При этом каждый элемент изображения состоит из трех отдельных компонент, по одному для каждого первичного основного цвета. При воспроизведении RGB монитором эти три изображения смешиваются на люминесцирующем экране и образуют составное цветное.

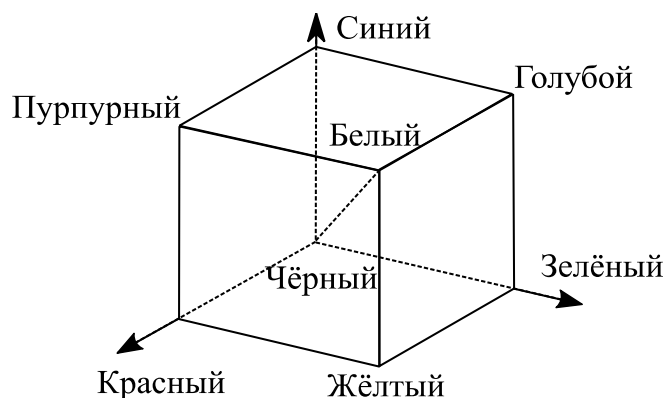


Рис. 1.4. Схематическое изображение цветового куба RGB

1.3. Цветовая модель СМΥК

В модели СМΥ основными цветами являются голубой (*Cyan*), пурпурный (*Magenta*) и желтый (*Yellow*) цвета. Эта модель используется для формирования цвета в полиграфии при осуществлении стандартной триадной печати, т. е. когда источник света является внешним, например солнечный или дневной свет. Данная модель является **субтрактивной**, она определяется вычитанием цветов, поглощаемых поверхностью. Для того чтобы разобраться с поглощением цветов, рассмотрим рис. 1.5

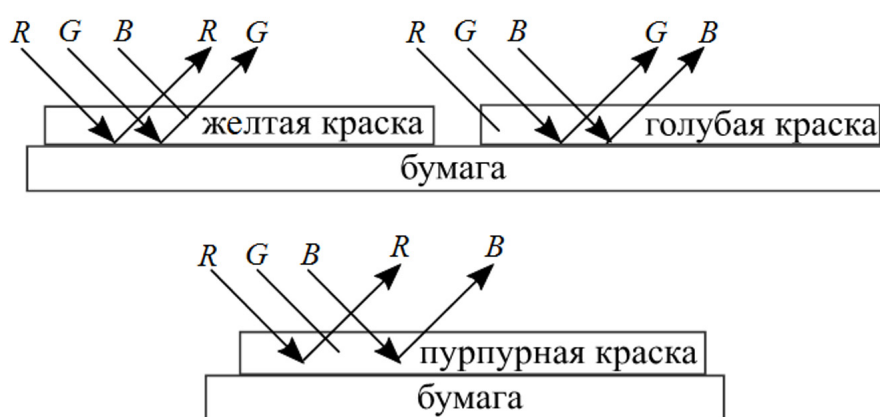


Рис. 1.5. Поглощение (вычитание) цветов

Предположим, что белый лист бумаги освещен дневным светом, который может быть представлен тремя компонентами: R , G , B . Для по-

лучения желтого цвета на листе нам необходимо нанести такую краску, которая является дополнительной к синей, тогда синий луч будет поглощен, а красный и зеленый – отражены. Смешение красного и зеленого световых лучей дают желтый. При нанесении голубой краски будет поглощен красный цвет, а пурпурной – зеленый.

Комбинирование красок позволяет получить другие цвета – зеленый, красный, синий и черный. Черный цвет соответствует поглощению всех цветов при отражении (рис. 1.6).

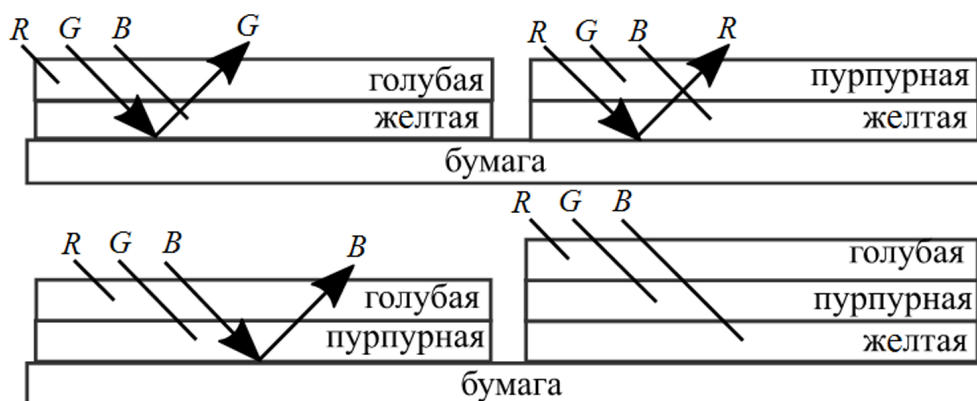


Рис. 1.6. Субтрактивность для двух и трех красок

Цветовая модель CMY, как и RGB, может быть представлена цветовым кубом. Большинство устройств для нанесения цветных красителей на бумагу, такие как цветные принтеры и копировальные устройства, либо требуют представления входных данных в виде CMY, либо осуществляют преобразование данных из RGB в CMY. Это преобразование выполняется с помощью формулы [5]:

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \frac{1}{255} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}.$$

На практике, смешение трех этих цветов в процессе печати приводит к появлению черного цвета, который выглядит осветленным по сравнению с оригиналом. Поэтому для получения при печати чистого черного цвета, цветовая модель CMY расширяется до модели CMYK, содержащей четвертый основной цвет – черный (*black*). Преобразование цвета между RGB и CMYK моделями зависит от профиля принтера. В управлении цветом ICC-профилем называют набор данных, характеризующий устройство цветного ввода или вывода.

Подводя итоги по поводу цветовых моделей RGB и CMYK, надо сказать, что они являются **аппаратно-зависимыми**. Если речь идет об RGB, то в зависимости от примененного в мониторе люминофора

будут разниться значения базовых цветов. Еще хуже обстоит дело с CMYK. Здесь идет речь о типографских красках, особенностях печатного процесса и носителя, поэтому одинаковое изображение может по-разному выглядеть на разной аппаратуре.

Таким образом, модели RGB и CMYK, хотя и связаны друг с другом, однако их взаимные переходы друг в друга (конвертирование) не происходят без потерь, поскольку цветовой охват у них разный. И речь идет лишь о том, чтобы уменьшить потери до приемлемого уровня. Это вызывает необходимость очень сложных калибровок всех аппаратных частей, составляющих работу с цветом: сканера (он осуществляет ввод изображения), монитора (по нему судят о цвете и корректируют его параметры), выводного устройства (оно создает оригиналы для печати), печатного станка (выполняющего конечную стадию).

1.4 Проблема разложения монохромного цвета

Моделям RGB и CMYK присущ один существенный недостаток: с помощью нее нельзя представить все цвета, видимые человеком.

В конце 1920-х годов В.Д. Райтом и Дж. Гилдом были проведены эксперименты, в которых наблюдателю предлагалось каждому монохроматическому цвету – шаблону фиксированной яркости в видимом диапазоне сопоставить цвет, составленный из смеси основных цветов R , G и B с некоторыми весами, регулируемые наблюдателем. Оказалось, что для некоторых монохроматических цветов подобрать такие значения оказалось невозможным. Проблема решалась добавлением к яркости исходного цвета – шаблона некоторой компоненты (R) [6].

Таким образом, в результате проведенного эксперимента с помощью трех основных компонент были получены все цвета, однако для получения некоторых из них требовалось брать R -компоненту с отрицательным весом (рис. 5.7).

Поскольку некоторые монохромные цвета раскладываются по RGB с отрицательными коэффициентами, то **не все возможные цвета представимы в рамках аддитивной модели RGB**. В 1931 году принят стандарт CIE (*Commission International de l'Eclairage* – Международная комиссия по стандартам освещенности, МКО), решающий эту проблему. В том числе определены длины волн, соответствующие R , G и B :

$$\lambda_R = 700 \text{ нм}, \lambda_G = 546,1 \text{ нм}, \lambda_B = 435,8 \text{ нм}.$$

Отметим, что в качестве стандартных длин волн синего и зеленого выбраны значения, в которых график красного цвета на рис. 5.7 пересекает ось.

Еще одним шагом международного стандарта представления цвета CIE было принятие модели XYZ, снимающей проблемы модели RGB.

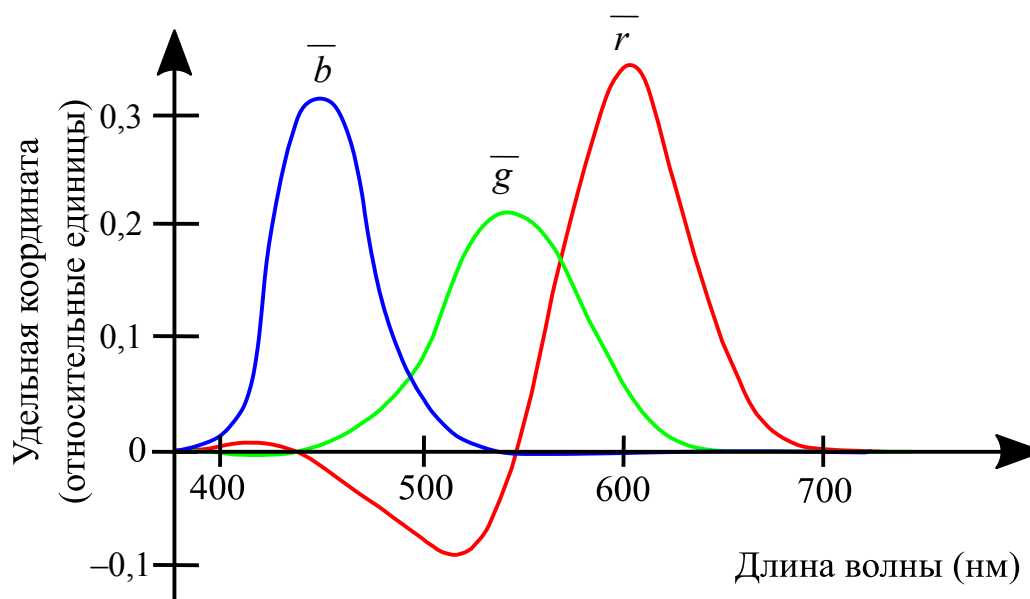


Рис. 1.7. Результат получения различных цветов комбинацией базовых компонент R, G и B

1.5. Цветовые модели пространства CIE: XYZ

В стандарте представления цвета CIE XYZ определяются три базисные функции: $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ (рис. 5.8), зависящие от длины волны, и на их основе перенасыщенные цвета X , Y , Z : линейные комбинации которых с неотрицательными коэффициентами, позволяют получить все видимые человеком цвета. Перенасыщенные цвета не соответствуют никаким реальным, но все реальные могут быть представлены их комбинациями с положительными коэффициентами.

Y выражает интенсивность света [Вт/м²] с учетом спектральной чувствительности глаза стандартного наблюдателя и называется **люминантностью** (*CIE luminance*), k — масштабный коэффициент, выбираемый исходя из того, какой цвет принимается за белый:

$$k = \frac{Y_{\max}}{\int I_{\text{бел}}(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda},$$

где $I_{\text{бел}}(\lambda)$ — спектральная функция распределения для выбранного эталона белого цвета.

Координата Z соответствует отклику коротковолновых («синих») колбочек, а координата X в большей степени отвечает за длинноволновые излучения, всегда неотрицательна [7].

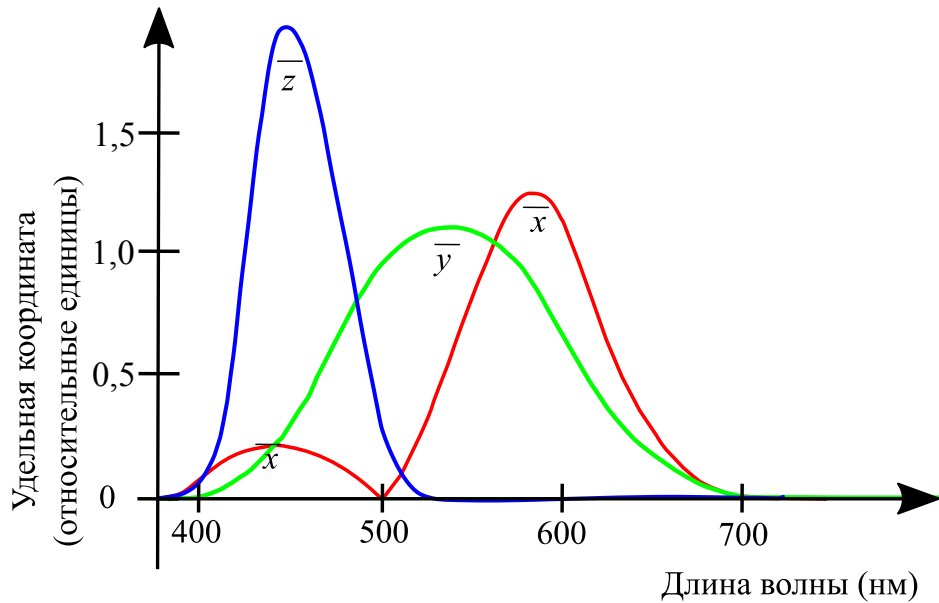


Рис. 1.8. Функции представления цвета для CIE XYZ

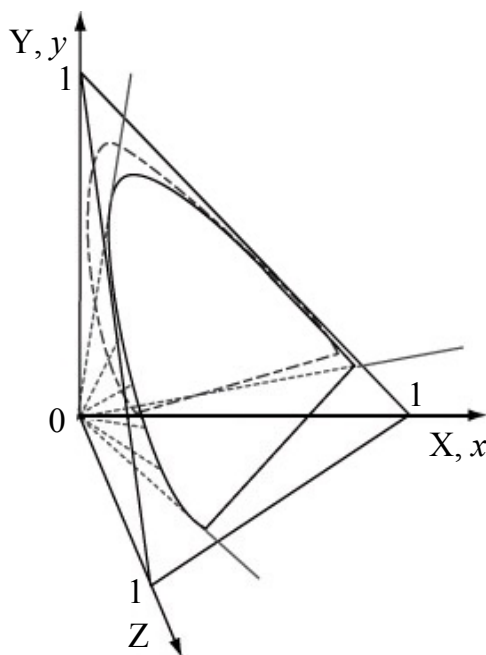


Рис. 1.9. Конус видимых цветов в трехмерном пространстве модели CIE XYZ

Если рассмотреть значения X , Y , Z как координаты в трехмерном евклидовом пространстве, то видимые цвета образуют криволинейный конус в первом квадранте (рис. 1.9).

В данной модели также вводятся значения цветности, представляющие собой нормированные координаты x , y , z , определяемые из X , Y , Z следующим образом:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z};$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z};$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z},$$

$$x + y + z = 1.$$

Значения цветности вводятся для описания только цветовых свойств света, без учета его энергии, и зависят только от основной длины волны и насыщенности. Если поместить эти точки в трехмерное евклидово пространство, то они будут лежать на плоскости $X + Y + Z = 1$ (она также показана на рис. 5.9). Проекция этой плоскости на Oxy называется диаграммой цветности CIE (рис. 5.10).

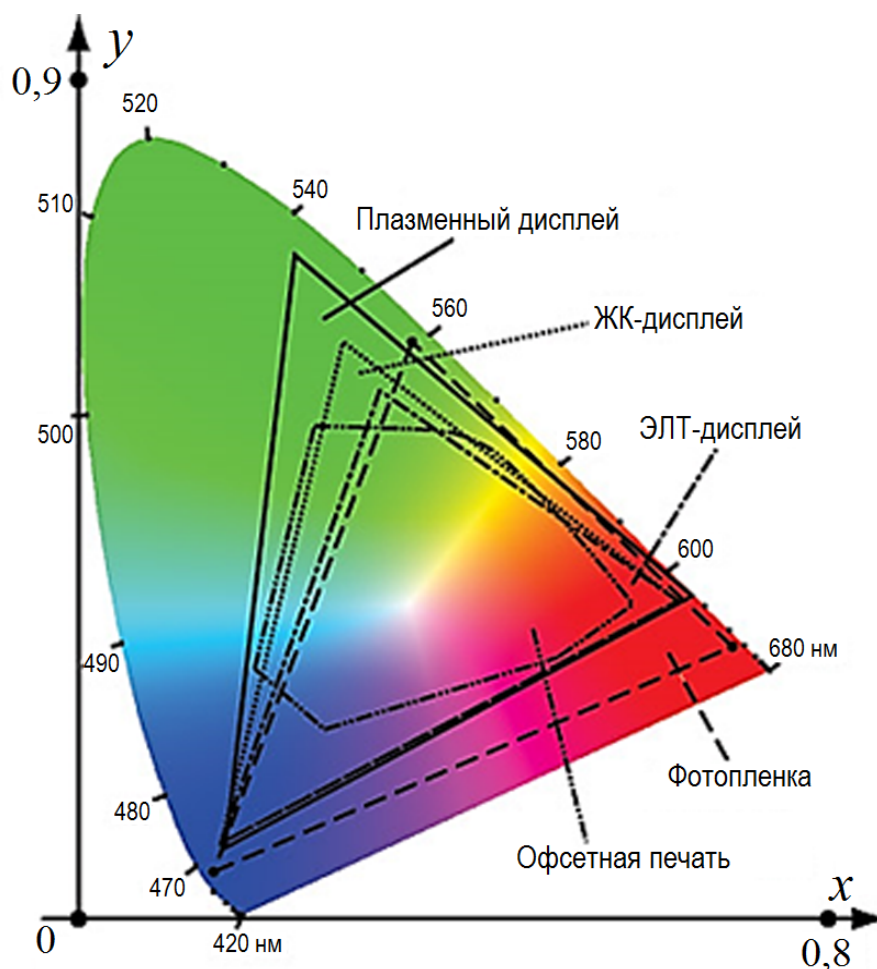


Рис. 1.10. Диаграмма цветности CIE с цветовыми гаммами для разных классов устройств

Диаграмма цветности полезна и наглядна и широко используется. Цвета, расположенные на границе проекции, являются монохроматическими. При смешении базисных цветов можно получить все цвета, находящиеся в их выпуклой оболочке на диаграмме цветности. Этим как раз и объясняется, что с помощью трех базовых цветов R , G , B (да и любых других) мы не можем получить все видимые цвета.

Важную роль в цветопередаче от одного устройства к другому имеет понятие «точки белого» (англ. *white point*) на диаграмме цветности, соответствующее измеренным координатам белого цвета. Она может варьироваться в зависимости от того, какой источник цвета принимается за белый. В исходной модели CIE XYZ весовые функции подобраны так, чтобы дневному свету солнца соответствовала точка $(x, y, z) = (1/3, 1/3, 1/3)$. Зная положение точек белого в исходном материале, его можно пересчитать для компенсации условий съемки или свойств оборудования (найти баланс белого).

Важной характеристикой как цветовых моделей, так и конкретных устройств, отображающих цветную информацию, является цветовая гамма – подмножество цветов, воспроизводимое в условиях конкретной цветовой модели или для конкретного устройства цветового отображения. Корректно отображать цветовую гамму как некоторое подмножество в конусе видимых цветов (см. рис. 5.10), но можно также ограничиться проекцией на диаграмму цветности, не учитывая диапазон яркости. На рис. 1.10 представлены некоторые типичные цветовые гаммы, которые позволяют судить о полноте охвата отображаемых цветов разными устройствами.

1.6. Цветовая модель CIE $L^*a^*b^*$

Также CIE в 1976 году с той же целью предложила и другую похожую модель $L^*a^*b^*$, которая получила несколько более широкое распространение. Эта модель рекомендуется для представления отраженного света. В цветовой модели CIE $L^*a^*b^*$ координатами цвета являются яркость цвета (L), соотношение красного и зеленого цветов (a) и соотношение синего и зеленого (b) (рис. 1.11).



Рис. 1.11. Цветовая модель CIE $L^*a^*b^*$

Модель CIE $L^*a^*b^*$ отличается от других моделей независимостью от устройства. Преобразование цветовых компонент между моделями RGB и CIE $L^*a^*b^*$ осуществляется с помощью модели XYZ. Сначала цветовые компоненты преобразуют из RGB в XYZ, потом из XYZ в CIE $L^*a^*b^*$. Аналогично для обратного преобразования из CIE $L^*a^*b^*$ в RGB, сначала цветовые компоненты преобразуют из CIE $L^*a^*b^*$ в XYZ, потом из XYZ в RGB:

- из RGB в XYZ:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,412 & 0,358 & 0,180 \\ 0,213 & 0,715 & 0,072 \\ 0,019 & 0,119 & 0,950 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}; \quad (1.1)$$

- из XYZ в RGB:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,240 & -1,537 & 0,499 \\ -0,969 & 1,876 & 0,042 \\ 0,056 & -0,204 & 1,057 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}; \quad (1.2)$$

- из XYZ в L*a*b*:

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_0}\right) - 16, \quad (1.3)$$

$$a^* = 500 \left[f\left(\frac{X}{X_0}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_0}\right) \right], \quad (1.4)$$

$$b^* = 200 \left[f\left(\frac{Y}{Y_0}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_0}\right) \right], \quad (1.5)$$

где

$$f(t) = \begin{cases} t^{1/3}, & \text{если } t > \left(\frac{6}{29}\right)^3, \\ \frac{1}{3}\left(\frac{29}{6}\right)^2 t + \frac{4}{29}, & \text{иначе} \end{cases}$$

и значения X_0 , Y_0 и Z_0 – это координаты белой точки в модели CIE XYZ;

- из L*a*b* в XYZ:

$$X = X_0 f^{-1}\left(\frac{1}{116}(L^* + 16) + \frac{1}{500}a^*\right), \quad (1.6)$$

$$Y = Y_0 f^{-1}\left(\frac{1}{116}(L^* + 16)\right), \quad (1.7)$$

$$Z = Z_0 f^{-1}\left(\frac{1}{116}(L^* + 16) - \frac{1}{200}b^*\right), \quad (1.8)$$

где

$$f^{-1}(t) = \begin{cases} t^3, & \text{если } t > \frac{6}{29}, \\ 3\left(\frac{6}{29}\right)^2 \left(t - \frac{4}{29}\right), & \text{иначе} \end{cases} \quad (1.9)$$

и значения X_0 , Y_0 и Z_0 – это координаты белой точки в модели CIE XYZ.

1.7. Цветовые модели YUV и YCbCr

В цветовой модели YUV каждый цвет представляется в виде трех компонент – яркостной составляющей (Y) и двух цветоразностных составляющих (U и V). Модель YUV широко применяется для аналогового кодирования цветной информации изображений и видеозаписей. Эта цветовая модель обычно используется в PAL и SECAM видеостандартах. Яркостный компонент содержит изображение в оттенках серого, а оставшиеся два компонента содержат информацию для восстановления требуемого цвета. Преобразования цветовых компонент между моделями RGB и YUV осуществляются по следующим формулам [2]:

- из RGB в YUV:

$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ -0,147 & -0,289 & 0,436 \\ 0,615 & -0,515 & -0,100 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}; \quad (1.10)$$

- из YUV в RGB:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1,14 \\ 1 & -0,396 & -0,581 \\ 1 & 2,032 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix}. \quad (1.11)$$

Цветовая модель YCbCr имеет свойства подобные модели YUV, в которой цвет представляется в виде трех компонент: яркости (Y) и двух цветоразностных компонент (Cb и Cr). Модель YCbCr обычно используется для цифрового кодирования цветной информации при осуществлении процедуры сжатия, а также для передачи видео и изображений (MPEG и JPEG). Преобразования цветовых компонент между моделями RGB и YCbCr проводится по следующим формулам:

- из RGB в YCbCr:

$$\begin{bmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ -0,169 & -0,331 & 0,500 \\ 0,500 & -0,419 & -0,081 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}; \quad (1.12)$$

- из YCbCr в RGB:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1,402 \\ 1 & -0,344 & -0,714 \\ 1 & 1,772 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix}. \quad (1.13)$$

1.8. Цветовая модель HSV

К сожалению, несмотря на то, что процесс формирования цвета в моделях RGB и CMYK подобны зрительной системе человека, они плохо приспособлены для описания цветов образом, подобным человеку.

Например, при описании цвета человек, как правило, не говорит о процентном соотношении в нем основных цветов, а описывает его цветовой тон, насыщенность и яркость [3]. Цветовой тон является характеристикой, которая описывает собственно цвет (красный, синий, оранжевый и др.), тогда как насыщенность дает меру того, в какой степени этот цвет чистый, т. е. неразбавленный белым. Чем меньше насыщенность, тем бледнее выглядит цвет. Яркость соответствует понятию интенсивности в ахроматическом случае и является мерой «светлости» изображения в градациях серого.

В цветовой модели HSV (также часто называемой HSB) координатами цвета являются (рис. 5.12):

1. Цветовой тон (*Hue*), значение которого варьируется в пределах от 0° по 360° , одно иногда приводится к диапазону $0 \dots 100$ или $0 \dots 1$.

2. Насыщенность (*Saturation*), значение которой варьируется в пределах $0 \dots 100$ или $0 \dots 1$. Чем больше значение насыщенности, тем «чище» цвет. А чем ближе это значение к нулю, тем ближе цвет к нейтральному серому.

3. Яркость (*Value*, или *Brightness*) также получается значение в пределах $0 \dots 100$ или $0 \dots 1$.

Модель была создана Элви Реем Смитом [2], одним из основателей Pixar, в 1978 году. Эта модель является нелинейным преобразованием модели RGB. Она часто используется в программах компьютерной графики, так как ближе к человеческому восприятию цветов и удобна для человека. Она отличается от моделей RGB и CMYK тем, что компоненты цвета в модели HSV отображают информацию о цвете в более привычной человеку форме: Что это за цвет? Насколько он насыщенный? Насколько он светлый или темный? Преобразования цветовых компонент между моделями RGB и HSV выполняются по следующим формулам:

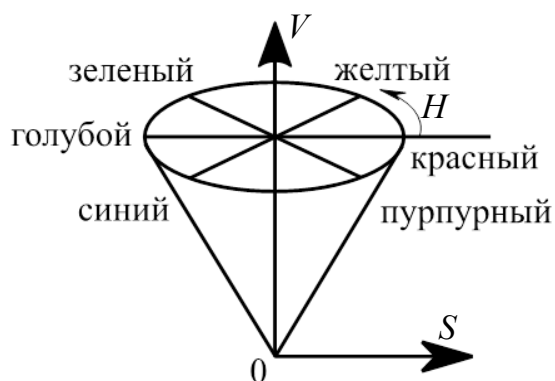


Рис. 5.12. Модель HSV

- из RGB в HSV:

RGB – координаты должны быть нормированы в диапазоне $[0, 1]$.

Цветовой тон H , равен:

$$H = \begin{cases} \theta & \text{при } B \leq G; \\ 360 - \theta & \text{при } B > G, \end{cases}$$

где

$$\theta = \arccos \left\{ \frac{1/2[(R-G) + (R-B)]}{[(R-G)^2 + (R-B)(G-B)]^{1/2}} \right\}.$$

Насыщенность S :

$$S = 1 - \frac{3}{(R+G+B)} [\min(R, G, B)].$$

Яркость V :

$$V = \frac{1}{3}(R+G+B);$$

- из HSI в RGB:

1. Если $0 \leq H < 120$, то

$$B = V(1-S), \quad R = V \left[1 + \frac{S \cdot \cos(H)}{\cos(60-H)} \right], \quad G = 3V - (R+B).$$

2. Если $120 \leq H < 240$, то $H = H - 120$,

$$R = V(1-S), \quad G = V \left[1 + \frac{S \cdot \cos(H)}{\cos(60-H)} \right], \quad B = 3V - (R+G).$$

3. Если $240 \leq H < 360$, то $H = H - 240$

$$G = V(1-S), \quad B = V \left[1 + \frac{S \cdot \cos(H)}{\cos(60-H)} \right], \quad R = 3V - (G+B).$$

Контрольные вопросы

1. Характеристика цветовой модели RGB. Для чего используется модель RGB?
2. Характеристика цветовой модели YUV. Для чего используется модель YUV?
3. Характеристика цветовых моделей HSL из HSV. Для чего используется модели HSL и HSV? Чем отличается цветовая модель HSL из HSV?
4. Почему считают, что цветовые модели HSL и HSV ближе к человеческому восприятию цветов?
5. Опишите основные компоненты CIE L^* , a^* и b^* .
6. Чем отличается цветовая модель CIE $L^*a^*b^*$ от других?

Задание

Цель работы

Изучение цветовых моделей RGB, YUV, CMYK, HSV, HSL, моделей семейства CIE: XYZ и $L^*a^*b^*$ и преобразований цветов при переходах между ними.

Разработать программу прямого преобразования цветовых компонент между цветовыми моделями, согласно своему варианту.

№	Цветовые модели
1	<ul style="list-style-type: none">• RGB \rightarrow YUV \rightarrow RGB;• RGB \rightarrow HSV \rightarrow RGB
2	<ul style="list-style-type: none">• RGB \rightarrow YCbCr \rightarrow RGB;• RGB \rightarrow HSV \rightarrow RGB
3	<ul style="list-style-type: none">• RGB \rightarrow XYZ \rightarrow RGB;• RGB \rightarrow YCbCr \rightarrow RGB
4	<ul style="list-style-type: none">• RGB \rightarrow XYZ \rightarrow RGB;• RGB \rightarrow HSV \rightarrow RGB
5	<ul style="list-style-type: none">• RGB \rightarrow CIE $L^*a^*b^*$ \rightarrow RGB

Список литературы

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – Москва : Техносфера, 2005г. – 1070 с.
2. Color transformation. – Режим доступа: <http://www.cg.info.hiroshima-cu.ac.jp/~miyazaki/knowledge/teche01.html> (дата обращения: 15.07.2016).
3. Intel MPI Library – Documentation. – URL: http://software.intel.com/sites/products/documentation/hpc/ipp/ippi/ippi_ch6/ch6_color_models.html.
4. Алгоритмические основы растровой машинной графики / Д.В. Иванов, А.С. Карпов, Е.П. Кузьмин и др. // БИНОМ. Лаборатория знаний, Интернет-университет информационных технологий – ИНТУИТ.ру. – Режим доступа: <http://www.intuit.ru/shop/product-2493469.html> (дата обращения: 16.08.2016).
5. Шикин Е.В. Компьютерная графика. Полигональные модели / Е.В. Шикин, А.В. Боресков. – Москва : ДИАЛОГ-МИФИ, 2001. – 464 с.
6. Порев В.Н. Компьютерная графика / В.Н. Порев. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2002. – 432 с.
7. Хилл Ф. OpenGL. Программирование компьютерной графики / Ф. Хилл. – Санкт-Петербург : Питер, 2002. – 1088 с.