

Цветовые пространства

Восприятие цвета человеком

Человеческие глаза способны воспринимать электромагнитные волны в малом диапазоне частот от 400 нм до 700 нм, при этом волны с разной длиной волны воспринимаются человеческим глазом по-разному, именно так и возникает понятия цвета. Самым общим описание светового потока является его спектральная функция $I(\lambda)$. Если спектр состоит из одного значения, то свет называется монохроматическим.

Описание цвета в качестве спектральных функций в большинстве своём слишком громоздко. Для того чтобы как-то упростить это представление, мы рассмотрим, как человек воспринимает свет различных цветов.

На сетчатке глаза находятся два типа рецепторов: палочки и колбочки. Палочки реагируют на яркость света, а колбочки отвечают за различение цветов. При этом колбочки могут работать только при достаточном уровне освещения. В темноте они резко теряют чувствительность, поэтому при недостаточном освещении все объекты начинают казаться серыми. Колбочки бывают трёх видов: S (от англ. *small*)- воспринимают синий цвет, M (от англ. *middle*)- воспринимают зелёный цвет и L (от англ. *large*)- воспринимают красный цвет. При этом надо заметить, что чувствительность глаза к различным цветам сильно различается: восприимчивость к синему цвету значительно меньше, чем к двум другим.

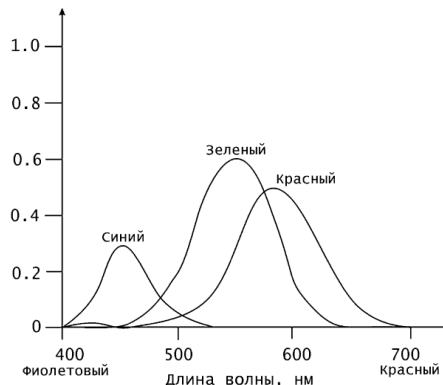


Рисунок 1 Кривые чувствительности колбочек

Важным свойством восприятия света человеком является его линейность: при освещении объекта двумя источниками света с различными спектральными функциями $I_1(\lambda)$, $I_2(\lambda)$ человек воспримет их как один источник со спектральной функцией равной сумме $I_1(\lambda) + I_2(\lambda)$. Этот эффект называют законом Грассмана. Именно этот закон позволяет строить относительно простую теорию цветовосприятия.

Модель RGB

Из модели человеческого зрения вытекает цветовая модель RGB (красный, зелёный, синий). Новые цвета в этой модели получаются суммированием базовых цветов. Такие модели называют аддитивными.

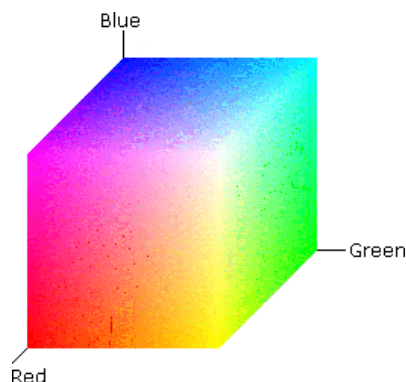


Рисунок 2 RGB-куб

Кодирование некоторых цветов в модели *RGB*:

- Чёрный (0,0,0);
- Фиолетовый (1,0,1);
- Красный (1,0,0)
- Белый (1,1,1).

Эта модель является самой распространенной, но, тем не менее, ей присущ существенный недостаток: не все цвета, видимые человеком, представимы в этой модели. Эксперименты показали, что существуют цвета, для представления которых необходимо использовать отрицательные веса базовых компонент. Это связано с тем, что кривые чувствительности различных видов колбочек частично перекрываются. К счастью, доля воспроизводимых в -модели цветов значительно больше, чем доля невозпроизводимых.

Цветовая система *CIE XYZ*

В 1931 году международная комиссия по освещению приняла стандарт представления цвета *CIE XYZ*. Этот стандарт основан на особенностях человеческого зрения. В этой модели рассматривается т.н. «стандартный наблюдатель», возможности которого были тщательно изучены и зафиксированы в ходе длительных исследований человеческого зрения, проведенных комитетом *CIE*. В стандарте экспериментально определяются три базисные функции $\rho_X(\lambda)$, $\rho_Y(\lambda)$, $\rho_Z(\lambda)$, зависящие от длины волны. Линейные комбинации этих функций с неотрицательными весами X, Y, Z позволяют получить все видимые человеком цвета.

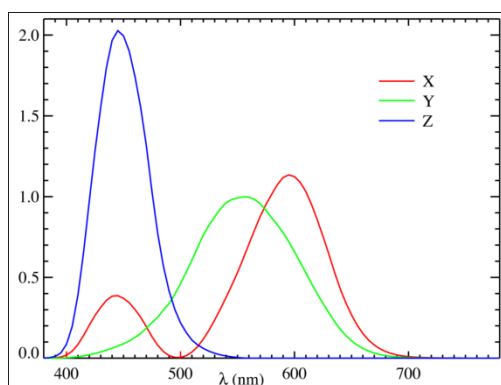


Рисунок 3 Функции представления цвета для *CIE XYZ*

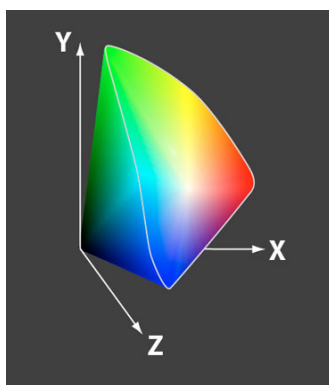


Рисунок 4 Конус видимых цветов

Рассмотрим значения цветности x, y, z , которые определяются из X, Y, Z следующим образом:

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

Эти значения цветности вводятся для описания только цветовых свойств света, безотносительно его энергии. Если поместить эти точки в трёхмерное евклидово пространство, то они будут лежать на плоскости $X + Y + Z = 1$. Проекция этой плоскости на ось Oxy называется диаграммой цветности. При описании цветов часто говорят только о паре (X, Y) , полагая $Z = 1 - X - Y$.

Цвета, расположенные на границе проекции являются монохроматическими. При смешении базисных цветов можно получить цвета, находящиеся в выпуклой оболочке на диаграмме цветности. Этим как раз объясняется, почему с помощью трёх базисных цветов RGB мы не можем получить все видимые цвета.

Ещё одно важное понятие в модели $CIE XYZ$ точка белого. Эта точка на диаграмме цветности, соответствующая измеренным координатам белого цвета. Понятно, что эта точка может варьироваться в зависимости от того, какой источник света принимается за белый. В исходной модели весовые функции специально подобраны так, чтобы дневному свету солнца соответствовала точка $(x, y, z) = (\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$. Другие точки белого применяются для компенсации условий съёмки.

Преобразования между $CIE XYZ$ и RGB

Для перехода между пространствами можно воспользоваться матрицами преобразований 3×3 . Для преобразования достаточно задать координаты базисных векторов RGB в системе $CIE XYZ$. Это принято делать, задавая цветовую информацию точками (x, y) на диаграмме цветности и яркостной компонентой Y . Если цвет зада как (x, y, Y) , то легко заметить, что

$$\begin{matrix} X \\ Y \\ Z \end{matrix} = \begin{matrix} \frac{Y}{y}x \\ Y \\ \frac{Y}{y}(1-x-y) \end{matrix}.$$

Тогда, если базисные RGB цвета заданы как $(x_R, y_R, Y_R), (x_G, y_G, Y_G), (x_B, y_B, Y_B)$, получаем следующую формулу преобразования:

$$Z_R = 1 - x_R - y_R$$

$$Z_G = 1 - x_G - y_G$$

$$Z_B = 1 - x_B - y_B$$

$$\begin{array}{r}
 X \\
 Y \\
 Z
 \end{array}
 =
 \begin{array}{ccc}
 \frac{Y_R}{y_R} * x_R & \frac{Y_G}{y_G} * x_G & \frac{Y_B}{y_B} * x_B \\
 Y_R & Y_G & Y_B \\
 \frac{Y_R}{y_R} * z_R & \frac{Y_R}{y_R} * z_G & \frac{Y_R}{y_R} * z_B
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 R \\
 * G \\
 B
 \end{array}$$

Цветовые модели CIE L*u*v* и CIE L*a*b*

У модели CIE XYZ всё-таки есть существенный недостаток: расстояние между двумя точками на диаграмме цветности зачастую не соответствует восприятию человеком отличий между двумя цветами. В идеале хотелось бы, чтобы одинаковые расстояния между точками соответствовали одинаковому восприятию человеком отличий между этими парами цветов.

Для этих целей была разработана и предложена модель CIE L*u*v*. Эта модель скорректирована с учётом особенностей человеческого восприятия и чаще всего применяется для представления света от источников. Определим функцию

$$F(x) = \begin{cases} 7.787 * x + \frac{16}{116}; & 0 \leq x < 0.008856 \\ \frac{1}{x^3}; & x \geq 0.008856 \end{cases}$$

и определим

$$\begin{cases} u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}; \\ v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z}; \end{cases}$$

Пусть точка белого имеет координаты (X_w, Y_w, Z_w) , тогда получается следующий алгоритм:

$$\begin{cases} L^* = 116F\left(\frac{Y}{Y_w}\right) - 16; \\ u^* = 13L^*(u' - u'_w); \\ v^* = 13L^*(v' - v'_w); \end{cases}$$

и обратное преобразование

$$\begin{cases} u' = \frac{u^*}{13L^*} + u'_w; \\ v' = \frac{v^*}{13L^*} + v'_w; \\ Y = F^{-1}\left(\frac{L^* + 16}{116}\right) * Y_w; \\ X = \frac{9Y u'}{4v'}; \\ Z = \frac{4X - 15v'Y - v'X}{3u'}; \end{cases}$$

С той же целью была предложена похожая модель CIE L*a*b*, которая получила несколько большее распространение. Она используется для описания отражённого света.

В ней используется функция $F(x)$, а L^* имеет то же самое значение, что и в модели $CIE L^*u^*v^*$.
 Переход от XYZ к $CIE L^*a^*b^*$ выглядит так:

$$\begin{cases} L^* = 116F\left(\frac{Y}{Y_w}\right) - 16; \\ a^* = 500 \left[F\left(\frac{X}{X_w}\right) - F\left(\frac{Y}{Y_w}\right) \right]; \\ b^* = 200 \left[F\left(\frac{Y}{Y_w}\right) - F\left(\frac{Z}{Z_w}\right) \right]; \end{cases}$$

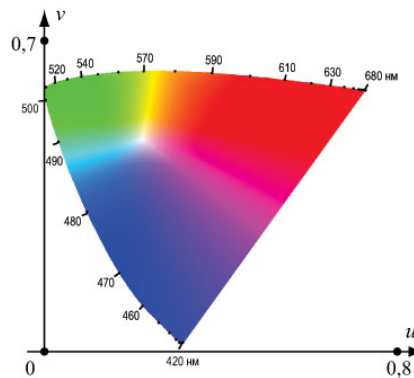


Рисунок 5 Модель $L^*u^*v^*$

Цветовые модели CMY и $CMYK$

Цветовая модель CMY (от англ. *Cyan, Magenta, Yellow*) используется в первую очередь в типографии. И по сути она является как бы инвертированной моделью RGB :

$$\begin{cases} C = 1 - R \\ M = 1 - G \\ Y = 1 - B \end{cases}$$

Т.е. эта система субтрактивная: в ней от белого цвета отнимаются C, M, Y вплоть до получения чёрного. Эта модель удобна при рассмотрении таких устройств, как принтеры, которые наносят краску на белую бумагу. Как правило, в них есть краски, соответствующие C, M, Y , а другие цвета получают смешиванием основных цветов модели CMY в определённых пропорциях.

Модель $CMYK$ является дополнением модели CMY , созданной для современных принтеров. В таких принтерах к трём базовым добавляется четвёртая чёрная краска, что приводит к существенной экономии остальных красок. Переход от CMY к $CMYK$ осуществляется по следующей формуле:

$$\begin{cases} K = \min(C, M, Y) \\ C = C - K \\ M = M - K \\ Y = Y - K \end{cases}$$

Цветовая модель HSV

Цветовая модель HSV (тон, насыщенность, величина) является, ориентированной на человека и его интуитивные представления о выборе цвета. Саму модель можно получить нелинейным преобразованием из RGB .

Самый простой способ представить HSV в трёхмерном пространстве – воспользоваться цилиндрическими координатами. Пусть H - угол в горизонтальной плоскости от оси Ox , S - радиус

в горизонтальной плоскости (расстояние от оси Oz), V - высота (по оси Oz). Всё цветное пространство в этом случае представляет собой перевернутый конус.

Смешивая «чистые» цвета, можно получить любую точку, лежащую на основании конуса (в т.ч. смешав противоположные цвета можно получить белый). Добавляя к какому-либо цвету чёрный, мы будем спускаться вниз по конусу, получая различные оттенки. При этом диапазон S будет постепенно уменьшаться вплоть до нуля. На оси $S = 0$ значение H неопределено.

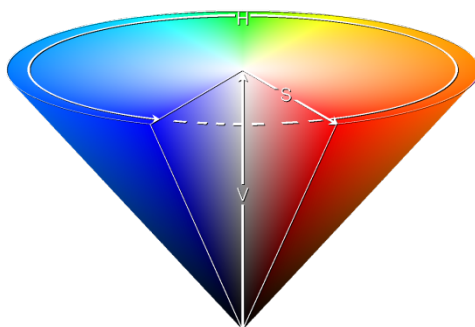


Рисунок 6 Пространство HSV

Переход от <i>RGB</i> к <i>HSV</i>	Переход от <i>HSV</i> к <i>RGB</i>
<pre> maxVal:=max(R,G,B); minVal:=min(R,G,B); V:=maxVal; if maxVal=0 then S:=0 else S:=(maxVal-minVal)/maxVal; if S=0 then H:=undefined else begin if R=maxVal then H:=(G-B)/(maxVal-minVal) else if G=maxVal then H:=2+(B-R)/(maxVal-minVal) else H:=4+(R-G)/(maxVal-minVal); H:=H*60; if h<0 then H:=H+360; end; </pre>	<pre> if S=0 then begin R:=V; G:=V; B:=V; end else begin sector :=trunc(H/60); {наибольшее целое <=x} frac:=H/60-sector; T:=V*(1-S); P:=V*(1-S*frac); Q:=V*(1-S*(1-frac)); case sector of 0: begin R:=V; G:=Q; B:=T; end; 1: begin R:=P; G:=V; B:=T; end; 2: begin R:=T; G:=V; B:=Q; </pre>

```

end;
3:
begin
R:=T;
G:=P;
B:=V;
end;
4:
begin
R:=Q;
G:=T;
B:=V;
end;
5:
begin
R:=V;
G:=T;
B:=P;
end;
end;
end;

```

Цветовая модель *HLS*

Цветовая модель *HLS* (тон, светлота, насыщенность) схожа с моделью *HSV*, но важно понимать, что светлота и яркость – разные параметры, поэтому не стоит путать модели *HLS* и *HSV*. Рассмотрим цилиндрические координаты в трёхмерном евклидовом пространстве. *H* – угол в горизонтальной плоскости от оси *Ox*, *S* – радиус в горизонтальной плоскости (расстояние до оси *Oz*), *L* – высота (по оси *Oz*). Всё цветовое пространство представляет собой два соединённых основаниями конуса.

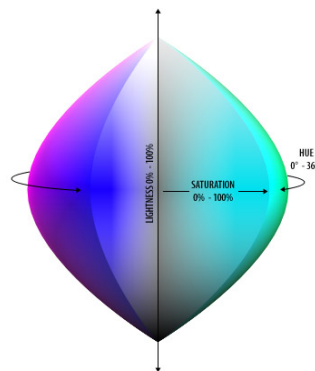


Рисунок 7 Пространство *HLS*

Можно сказать, что эта модель получена из *HSV* вытягиванием вдоль вертикальной оси. Понятия *H* и *S* остались теми же, только по вертикальной оси теперь *L* вместо *V*. Принципиальное различие состоит в том, что в *HLS* считается, что движение от чистых цветов (у которых $L = 0.5, S = 1$) как в направлении белого, так и чёрного одинаково приводит к уменьшению информации в *H* (в вершинах *H* не определено) и сужению диапазона по *S*.

Цветовые модели *Y***

Существует несколько тесно связанных цветовых моделей *Y***. В этих моделях используется явное разделение информации о яркости и цвете. Компонента *Y* отвечает за яркость. Такие

модели наиболее распространены в телевизионных стандартах, так как исторически была необходима совместимость с чёрно-белыми телевизорами, которые принимали только сигнал, обозначающий яркость. Также эти модели применяются в некоторых алгоритмах сжатия изображений (например популярный *JPEG*).

Цветовые модели *YUV*, *YPbPr*, *YCbCr*

Рассмотрим цветовую модель *YUV*. U, V – цветоразностные составляющие определяются через преобразование из *RGB*.

$$\begin{cases} Y = 0.299 * r + 0.587 * G + 0.114 * B \\ U = 0.429 * (B - Y) = -0.147 * R - 0.289 * G + 0.436 * B \\ V = 0.877 * (R - Y) = 0.615 * R - 0.515 * G + 0.100 * B \end{cases}$$

В цветовом пространстве *YUV* есть один компонент, который представляет яркость (Y), и два других компонента, которые представляют цвет (сигнал цветности). В то время как яркость передаётся со всеми деталями, некоторые детали в компонентах цветоразностного сигнала, лишённого информации о яркости, могут быть удалены путём понижения разрешения отсчетов (фильтрация или усреднение).

Цветовые модели *YCbCr* и *YPbPr* являются вариациями *YUV* с другими весами для U и V . *YPbPr* применяется для описания аналоговых (непрерывных) сигналов, а *YCbCr* - для цифровых (дискретных).

Преобразование из *RGB* в *YPbPr* следующими соотношениями:

$$\begin{cases} Y = Kr * R + (1 - Kr - Kb) * G + Kb * B; \\ Pb = \frac{1}{2} * \frac{1}{1 - Kb} * (B - Y); \\ Pr = \frac{1}{2} * \frac{1}{1 - Kr} * (R - Y); \end{cases}$$

Выбор Kr и Kb зависит от оборудования. Обычно берётся $Kb = 0.114$; $Kr = 0.299$. В последнее время также используется $Kb = 0.0722$; $Kr = 0.2126$, что лучше отражает характеристики современных устройств отображения.

Преобразование из *RGB* в модель *YCbCr*:

$$\begin{cases} Kg = 1 - Kr - Kb \\ Y = minY + (maxY - minY) * (Kr * R + Kg * G + Kb * B) \\ Cb = \frac{minC + maxC}{2} + \frac{maxC - minC}{2} * \frac{1}{1 - Kb} * (-Kr * R - Kg * G + (1 - Kb) * B) \\ Cr = \frac{minC + maxC}{2} + \frac{maxC - minC}{2} * \frac{1}{1 - Kr} * ((1 - Kr) * R - Kg * G - Kb * B) \end{cases}$$

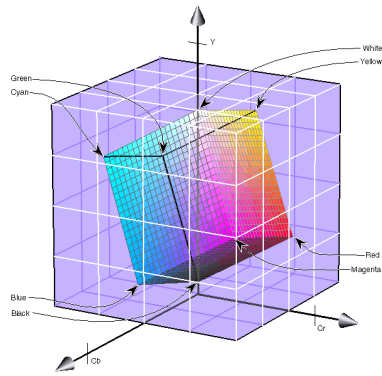


Рисунок 8 RGB куб в пространстве YUV

Цветовая модель YIQ

Цветовая модель YIQ применялась в телевизионной системе NTSC. Она получается поворотом UV в плоскости UV на 33°.

$$\begin{cases} Y = 0.299 * R + 0.587 * G + 0.114 * B \\ I = 0.735 * (R - Y) - 0.268 * (B - Y) = 0.596 * R - 0.274 * G + 0.321 * B \\ Q = 0.478 * (R - Y) + 0.413 * (B - Y) = 0.211 * R - 0.523 * G + 0.311 * B \end{cases}$$

