

УДК 519.7

С. Н. КАПЛУН

ИЗУЧЕНИЕ ЦВЕТОВОЙ ИНДУКЦИИ НА БАЗЕ КОМПЬЮТЕРА

Одно из наиболее важных свойств зрения человека — цветовая индукция. Явление цветовой индукции заключается в том, что одно и то же световое излучение, исходящее от наблюдаемого предмета, порождает в нашем сознании различные цветовые ощущения в зависимости от цвета фона, окружающего этот предмет. Глаз, внося поправку на освещение, получает возможность анализировать не только световое излучение, исходящее от предметов, но и отражательные свойства поверхностей этих предметов. Например, лист бумаги выглядит белым и при прямом освещении его солнцем, и в тени леса при освещении его зеленым светом, отраженным от листьев, хотя световые излучения, отраженные листом в двух случаях, разные. Обладая такой способностью, узнающие автоматы смогут распознать предметы вне зависимости от спектра освещения, который все время меняется в реальных условиях.

В колориметрии до недавнего времени использовались различные виды колориметров.

Визуальные колориметры, подразделяемые на субтрактивные, аддитивные, имеют малый охват цветности (кроме колориметра Дональдсона) и малую чувствительность (неточность 0.005 по координатам цветности x_u , в то время как разница обнаруживается при 0.001). Они применяются в основном в полиграфии и телевидении.

Фотоэлектрические колориметры просты в работе и обладают достаточной воспроизводимостью результатов измерений, но имеют недостаточную точность и высокую стоимость. Погрешность наиболее простых из них по координатам цветности x_u — 0.02, а сложных, например, таких как фильтровый колориметр Декслера, — 0.004.

Спектрофотометры и спектроколориметры являются на сегодняшний день самыми точными колориметрами. Они измеряют спектр в видимом диапазоне. По спектру вычисляются координаты цвета. Точность результатов зависит от точности шкалы длин волн и фотометрической шкалы спектрофотометра. Наиболее распространенные спектрофотометры имеют погрешность в координатах цветности — 0.01.

Описанные колориметры предназначены в основном для измерения цветов или их сравнения. Для экспериментального исследования явления цветовой индукции этого недостаточно: необходимо соблюдение некоторых условий, которые зачастую не могут быть реализованы на существующих

колориметрах. Среди них наиболее важные: дозирование цвета с высокой точностью, изменение цвета тестового поля и окружающего его фона, смена одной пары поле — фон на другую с заданной скоростью.

Из сказанного выше следует, что для проведения экспериментов необходимо либо создавать дорогостоящие колориметры, либо комбинировать имеющиеся, что само по себе может обойтись недешево. Чтобы этого избежать, можно использовать принципиально новую технику — компьютеры с достаточно совершенными цветными дисплеями. Основная идея создания колориметра на базе ЭВМ заключается в следующем. Оптические колориметры всегда создавались для изучения зависимости цвета от светового излучения. Попыты по изучению явления цветовой индукции можно проводить без оптической техники, так как анализируется лишь связь между колориметрическими цветами объекта и фона, а не между световыми излучениями, их породившими. Следовательно, формирование цветов на дисплее ЭВМ является достаточным средством для осуществления экспериментов по цветовой индукции. Изучение состояния вопроса показывает, что компьютеры использовались лишь как вычислительные устройства к спектроколориметрам, а возможности многоцветных дисплеев, способных заменить оптику, не рассматривались вообще.

При создании компьютерного колориметра необходимо преодолеть ряд сложностей. Во-первых, цвета, формируемые на дисплее персональной ЭВМ, маркируются не в той системе, которая общепринята в колориметрии (RGB, XYZ и т. д.). И чтобы полученные результаты можно было применить для построения адекватной модели цветовой индукции, необходимо осуществить привязку цветов, формируемых машиной, к колориметрической системе. Во-вторых, количество цветов, которые можно воспроизвести на дисплее современной персональной ЭВМ, недостаточно для достижения требуемой точности изменения цветов. Так, для изучения порогов необходимо порядка 500 млрд. цветов, а для изучения цветовой индукции — порядка 1 млрд. Но в доступном на сегодня 256-цветном режиме на экране можно одновременно отобразить 256 цветов из $64^3=262144$ возможных (64 градации красного, синего и зеленого цветов).

Обозначим символами R' , G' , B' машинные координаты цвета, а символами R'' , G'' , B'' — колориметрическую интенсивность красного, зеленого и синего цветов соответственно. Известно, что в электронно-лучевых трубках координата любой компоненты цветности изменяется в пределах от 0 до 63 и связана с колориметрической интенсивностью квадратичной зависимостью [2]. Поэтому от машинных координат цвета к соответствующим им колориметрическим интенсивностям можно перейти, используя следующие соотношения:

$$R''=R'^2/63^2; \quad G''=G'^2/63^2; \quad B''=B'^2/63^2, \quad (1)$$

где R' , G' , B' изменяется от 0 до 63, а R'' , G'' , B'' — от 0 до 1.

Красный, зеленый и синий цвета, маркированные машинной координатой 63, согласно американскому стандарту (система NTSC), образуют белый цвет с координатами цветности $x_W=0.31$; $y_W=0.316$ [1]. Соотношения яркости этих цветов, согласно стандарту, имеют следующие значения: 0.299; 0.587; 0.114 [1]. Яркость синего цвета, маркированного числом 63, принимаем за 1. Тогда яркость красного и зеленого цветов, обозначенных числом 63, составит соответственно $0.299 / 0.114=2.62$ и $0.587 / 0.114=5.16$. Обозначив символами R , G , B координаты цвета в системе NTSC получим зависимости:

$$R=2.62R''; \quad G=5.16G''; \quad B=B'' \quad (2)$$

Из равенств (1) и (2) мы получаем формулы перехода от машинных цветов к цветам в системе NTSC и наоборот:

$$R=2.62R''/63^2; \quad G=5.16G''/63^2; \quad B=B''/63^2 \quad (3)$$

В компьютерном колориметре цветности и яркости объектов удобно изменять по отдельности, поэтому необходимо связать координаты RGB системы NTSC с координатами XYZ международной системы МКО.

Координаты цветности основных цветов в системе NTSC определяют, согласно стандарту, следующими значениями: $x_R=0,67$; $y_R=0,33$; $x_G=0,21$; $y_G=0,71$; $x_B=0,14$; $y_B=0,08$. Вычисляем координаты ортов R , G , B в системе XYZ. Согласно сказанному ранее, яркости основных цветов принимаем равными единице: $Y_R=Y_G=Y_B=1$. Координаты цвета X , Y , Z связаны с координатами цветности x , y , z зависимостями [1]: $X=Y*(x/y)$; $Z=Y*(1-x-y)/y$, тогда

$$X_R = 1*(0.67 / 0.33)=2,030303; \quad Z_R = 1*(1-0.67-0.33) / 0.33 = 0;$$

$$X_G = 1*(0.21 / 0.71) = 0,295774; \quad Z_G = 1*(1-0.21-0.71) / 0.71= 0,112676;$$

$$X_B = 1*(0.14 / 0.08) = 1,75; \quad Z_B = 1*(1-0.14-0.08) / 0.08= 9,75.$$

Согласно найденным значениям пересчет координат R , G , B цвета из колориметрической системы NTSC в координаты цвета X , Y , Z системы МКО описывается системой:

$$\begin{cases} X = 2,0303R + 0,2958G + 1,75B; \\ Y = R + G + B; \\ Z = 0,1127G + 9,75B. \end{cases}$$

Обратный переход определяется системой равенств:

$$\begin{cases} R = 0,5709372X - 0,1591740Y - 0,0861504Z; \\ G = -0,5776139X + 1,1727296Y - 0,0166056Z; \\ B = 0,0066766X - 0,0135555Y + 0,1027560Z. \end{cases} \quad (4)$$

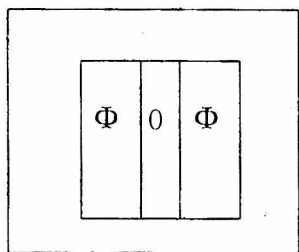
Используя соотношения (3) и (4), можно переходить от колориметрических цветов в системе XYZ к машинным.

Еще одна из проблем, возникающая при создании колориметра, заключается в том, что число градаций цвета, которое можно сформировать на экране дисплея персонального компьютера, меньше того, которое необходимо для достаточно точного формирования цветов при проведении экспериментов по изучению цветовой индукции. Увеличение числа градаций цвета, формируемого на дисплее компьютера достигается, методом цветовой мозаики. Из блоков размером $n \times n$ точек, представляющих собой цветовую мозаику, формируется цвет объекта. Число n зависит от требуемой точности изменения цветов и размера точки на экране дисплея. Цвета отдельных точек блока выбираем следующим способом (одинаково для всех блоков мозаики). Если в колориметре цвета изменяются в системе XYZ, то для перекодировки в машинные координаты цвета используем выражения (3), (4). Если цвета изменяются в системе RGB, то перекодировка производится по формуле (3). Получая значения машинных координат цвета R' , G' , B' , округляем их в меньшую и большую стороны до ближайших целых чисел, получаем шесть машинных уровней красного, зеленого и синего основных цветов R_{\min} , R_{\max} , G_{\min} , G_{\max} , B_{\min} , B_{\max} . Выбор цветов для точек блока начинаем с его левого верхнего угла, а затем движемся до конца блока слева направо, после этого переходим вниз на следующий ряд точек и движемся справа налево и т.д. Такой способ заполнения объектов и небольшие размеры мозаики предотвращают образование муара и обеспечивают равномерное распределение цвета, видимого наблюдателем, по всей площади тест-поля и фона с расстояния 0,7 м. Первую координату цвета текущей точки берем R_{\min} , если среднее значение этой же координаты, подсчитанной для всех предшествующих точек, больше R' . В противном случае берем R_{\max} . Аналогично выбираем вторую и третью координаты

цвета текущей точки. Для первой точки берем цвет с машинными координатами $R_{\max}, G_{\max}, B_{\max}$.

Колориметр представляет собой прибор, реализующий условия, описанные в начале статьи. Моделируется 2 поля: первое — небольшое, второе — обширное, окружающее первое. Первое поле выполняет роль тест-поля (0), а второе — фона (Ф). Цвета тест-поля и фона формируются по методу цветовой мозаики из блоков, образующих растр $4 \times 4 = 16$ цветных точек. По заданным колориметрическим координатам цвета, который требуется точно воспроизвести, необходимо найти ближайшие к нему 8 грубо дозируемых машинных цветов. В колориметрическом пространстве эти 8 цветов образуют вершины шестигранника, охватывающего точку заданного цвета. Кроме того, необходимо найти нужное число точек раstra 4×4 для каждого из 8 грубо дозируемых цветов и распределить эти точки равномерно по площади блока. Таким способом можно получить до $64 \times 16 = 1024$ градаций интенсивности по каждому из основных цветов.

Тест-поле располагается в центре экрана дисплея и имеет форму прямоугольника с шириной 0.5 см. Фон формируется внутри квадрата со стороной 16 см. Высота фона равна высоте тест-поля. За пределами этого квадрата — темнота (опыты выполняются в затемненном помещении при отсутствии внешнего освещения, и на дисплей надевается защитный колпак трапецевидной формы, окрашенный изнутри в черный матовый цвет).



Испытуемый ведет наблюдение двумя глазами, фиксируя взгляд на малом тест-поле и рассматривая его с расстояния 70 см. Экран дисплея перпендикулярен оси зрения наблюдателя, который смотрит горизонтально вперед. Угловой размер внутреннего тест-поля — около 0.5° , внешнего — около 16° . Опытты производятся при среднем фиксированном положении регулятора яркости и при максимальном контрасте.

Известно, что глаз различает объект, если его яркость отличается от яркости фона всего на 0.5 %. Поэтому если в колориметре изменение цветов производится в системе МКО XYZ, то дозирование их должно составлять 0.001 по осям цветности и яркости, что обеспечивает заданную точность изменения цветов. Такое дозирование обеспечивается использованием цветовой мозаики, составленной из блоков размером 4×4 . При таком размере блока возможно получение на экране дисплея всего $1024^3 = 1073741824$ цветов. Опытты подтверждают что заданное дозирование цвета обеспечивает результаты с ошибкой не более 7 %.

Можно предусмотреть быстрый выбор цвета тест-поля и фона с заданной дискретностью с помощью систем меню и «горячих» клавиш.

Описанный компьютерный колориметр позволяет с высокой точностью воспроизводить на экране компьютера цветовые поля, управлять ими и эффективно проводить с их помощью колориметрические эксперименты. Изменения цветов в колориметре производятся с дискретностью, достаточной для проведения высокоточных экспериментов, с ошибкой не более 7 % от пороговой величины.

С помощью колориметра могут быть проверены следующие свойства модели цветовой индукции: аддитивность, однородность, дистрибутивность, симметричность и транзитивность. Также он может быть использован для получения параметров модели преобразования колориметрического цвета в индукционный.

Список литературы: 1. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники. Ч.2. М.: Энергоатомиздат, 1989. 429 с. 2. Цуккерман И.И., Кац, Б.М., Лебедев Д.С и др. Цифровое кодирование телевизионных изображений. М.: Радио и связь, 1981. 239 с.

Поступила в редколлегию 08.10.97