

Информатика в техническом университете

А.Н. Божко, Д.М. Жук, В.Б. Маничев

Компьютерная графика



Издательство МГТУ
им. Н.Э. Баумана

Серия основана в 2000 году

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

чл.-кор. РАН *И.Б. Федоров* — главный редактор
д-р техн. наук *И.П. Норенков* — зам. главного редактора
д-р техн. наук *В.В. Девятков*
канд. техн. наук *И.П. Иванов*
д-р техн. наук *В.А. Матвеев*
канд. техн. наук *Н.В. Медведев*
д-р техн. наук *В.В. Сюзев*
д-р техн. наук *Б.Г. Трусов*
д-р техн. наук *В.М. Черненький*
д-р техн. наук *В.А. Шахнов*

А.Н. Божко, Д.М. Жук, В.Б. Маничев

Компьютерная графика

Допущено Учебно-методическим объединением вузов
по университетскому политехническому образованию
в качестве учебного пособия для студентов
высших учебных заведений,
обучающихся по направлению
«Информатика и вычислительная техника»

Москва
Издательство МГТУ имени Н.Э.Баумана
2007

УДК 004.92(075.8)
ББК 32.973
Б72

Рецензенты:
д-р техн. наук, проф. А.Н. Данчул;
кафедра «Цифровые информационные системы»
Московского университета печати
(зав. кафедрой д-р пед. наук, проф. М.Ф. Меняев)

Божко А.Н., Жук Д.М., Маничев В.Б.

Б72 Компьютерная графика: Учеб. пособие для вузов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. — 392 с.: ил. — (Информатика в техническом университете.)

ISBN 978-5-7038-3015-4

Рассмотрены физические основы цветовосприятия и особенности самых распространенных цветовых моделей. Дано представление о принципах измерения цвета и калибровки устройств ввода-вывода. Подробно описаны технические средства компьютерной графики и особенности графических устройств современных вычислительных систем. Изложены алгоритмы растровой графики и форматы графических файлов. Отдельная глава посвящена математическим моделям кривых, поверхностей и тел.

Содержание книги соответствует курсу лекций, который авторы читают в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов, обучающихся по различным направлениям и специализациям современных информационных технологий. Может быть полезна специалистам по системам автоматизированного проектирования, разработчикам игр, программистам, пользователям современных графических пакетов.

УДК 004.92(075.8)
ББК 32.973

ISBN 978-5-7038-3015-4

© А.Н. Божко, Д.М. Жук,
В.Б. Маничев, 2007
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	5
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	8
1. ВВЕДЕНИЕ В КОМПЬЮТЕРНУЮ ГРАФИКУ	11
1.1. Направления и области использования компьютерной графики.....	12
1.1.1. Изобразительная компьютерная графика.....	12
1.1.2. Обработка и анализ изображений	13
1.1.3. Анализ сцен и распознавание образов.....	13
1.1.4. Когнитивная компьютерная графика.....	13
1.1.5. Области использования компьютерной графики	14
1.2. Растровая и векторная графика	14
1.2.1. Векторный формат	16
1.2.2. Растровый формат	17
1.3. Свет и физические основы цветовосприятия.....	18
1.3.1. Светотехнические величины	19
1.3.2. Зрительный аппарат человека	20
1.3.3. Чувствительность глаза.....	22
1.3.4. Дефекты цветового восприятия	24
1.3.5. Цветовые иллюзии	25
1.3.6. Хроматическая адаптация.....	27
1.4. Формирования цветных изображений.....	28
1.4.1. Базовые принципы описания цвета.....	28
1.4.2. Модель RGB.....	30
1.4.3. Модели CMY и CMYK	31
1.4.4. Модели YUV и YIQ.....	33
1.4.5. Модель CIE XYZ	34
1.4.6. Модели CIE Luv и CIE Lab	36
1.4.7. Интуитивные цветовые модели.....	37
1.4.8. Цветовой круг	39
1.4.9. Стандартные источники света CIE	39
1.4.10. Формирование цветов на экране монитора.....	40
1.4.11. Интерполяция цветов	43
1.5. Измерение цвета и калибровка технических средств	44
1.5.1. Системы управления цветом	45
1.5.2. Профили ICC.....	47
1.5.3. Инструменты для измерения цвета.....	48
1.5.4. Создание профиля монитора	50
1.5.5. Создание профиля сканера	51
1.5.6. Создание профиля печатающего устройства	53
1.5.7. Передача цветовых значений	54

1.6. Теоретические основы оцифровки	56
1.6.1. Типы сканирующих устройств.....	57
1.6.2. Разрешение.....	59
1.6.3. Глубина цвета устройства оцифровки	61
1.6.4. Диапазон оптических плотностей.....	62
1.6.5. Размеры изображений	64
1.6.6. Масштабирование	65
1.6.7. Дискретизация	67
Вопросы для самоконтроля.....	69
2. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКИ.....	71
2.1. Общие сведения об ЭВМ, используемых для обработки графической информации	71
2.1.1. Основные технические параметры ЭВМ.....	72
2.1.2. Классификация ЭВМ.....	73
2.1.3. Аппаратные средства ЭВМ	83
2.2. Графическая подсистема ЭВМ	105
2.2.1. Принципы работы графического адаптера.....	109
2.2.2. Технологии 3D-графики	128
2.2.3. Последовательность работы графического конвейера.....	149
2.2.4. Поколения графических процессоров	154
2.2.5. Мониторы.....	155
2.2.6. Проекторы.....	166
Вопросы для самоконтроля.....	170
3. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ	172
3.1. Представление кривых и поверхностей	172
3.1.1. Полигональные сетки.....	174
3.1.2. Представление полигональных сеток.....	174
3.1.3. Согласованность полигональных сеток	177
3.1.4. Уравнения плоскости	177
3.2. Параметрические кубические кривые	179
3.2.1. Основные положения	179
3.2.2. Кривые Эрмита	184
3.2.3. Кривые Безье.....	189
3.2.4. Однородные нерациональные В-сплайны.....	194
3.2.5. Неоднородные нерациональные В-сплайны	199
3.2.6. Рациональная форма кривых и сплайнов	205
3.2.7. Разбиение кривых	206
3.2.8. Преобразование представлений	209
3.2.9. Рисование кривых.....	210
3.2.10. Сравнение кубических кривых.....	214
3.3. Параметрические бикубические поверхности	216
3.3.1. Поверхности Эрмита	217
3.3.2. Поверхности Безье	222
3.3.3. Бисплайновые поверхности	223
3.3.4. Нормали поверхностей	223
3.3.5. Визуализация бикубических поверхностей	224

3.3.6. Поверхности второго порядка	228
3.4. Твердотельное моделирование	229
3.4.1. Основные положения	229
3.4.2. Регулярные булевские операции	232
3.4.3. Параметрическое моделирование геометрии	236
3.4.4. Заметание	238
3.4.5. Граничное представление	240
3.4.6. Модели пространственного разбиения	255
3.4.7. Конструктивная твердотельная геометрия	264
3.4.8. Сравнение представлений	267
Вопросы для самоконтроля	268
4. МЕТОДЫ, АЛГОРИТМЫ И ФОРМАТЫ ФАЙЛОВ КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКИ	270
4.1. Методы и алгоритмы двумерной компьютерной графики	270
4.1.1. Входные и выходные данные растровые	271
4.1.2. Входные данные растровые, выходные данные векторные	291
4.1.3. Входные данные векторные, выходные данные растровые	303
4.1.4. Входные и выходные данные векторные	317
4.2. Методы и алгоритмы трехмерной графики и геометрии	346
4.2.1. Алгоритмы визуализации трехмерных моделей	346
4.2.2. Алгоритмы закрашивания видимых поверхностей	357
4.2.3. Детальное отображение поверхностей	364
4.2.4. Алгоритмы анимации трехмерных моделей	367
4.3. Форматы графических и геометрических файлов	376
4.3.1. Форматы векторных данных	376
4.3.2. Форматы растровых данных	385
4.3.3. Язык Adobe PostScript	388
Вопросы для самоконтроля	390
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	391

ПРЕДИСЛОВИЕ

Информационные технологии являются основными инструментами в решении сложных проблем, поставленных перед человечеством в XXI в. При этом одним из главных факторов, определяющих эффективность использования информационных технологий, служит уровень развития компьютерной графики. Оснащение компьютерной графики включает в себя технические средства, математические методы, модели и алгоритмы, программное обеспечение. Компьютерная графика занимает важнейшее место в решении одной из главных проблем практического использования информационных технологий – проблемы взаимодействия человека и вычислительной системы (проблемы HCI – Human Computer Interaction).

Возможности компьютерной графики в целом определяются уровнем развития технических средств и в особенности средств визуализации графических изображений. Математические основы дисциплины «Компьютерная графика» отличаются разнообразием используемых методов вычислительной математики, математического моделирования, статистики, математического программирования, дискретной математики и искусственного интеллекта.

Различные подсистемы компьютерной графики входят в состав практически всех современных программных продуктов — от простейших текстовых редакторов до сложнейших компьютерных игр с большим числом участников. Особое место они занимают в составе систем автоматизированного проектирования и пакетов, предназначенных для создания художественных и анимационных фильмов. Без преувеличения можно сказать, что знание основ компьютерной графики и умение работать с ее средствами необходимо практически каждому специалисту. Трудно себе представить плодотворную работу офиса, издательства, проектной организации, рекламного агентства, образовательного учреждения без использования компьютерных графических технологий.

Компьютерная графика как научное направление берет свое начало в 60-х годах прошлого столетия с защиты диссертации Айвена Сазерленда, в которой были рассмотрены новые возможности графического интерфейса с ЭВМ в интерактивном режиме. Графический интерфейс был реализован в первой интерактивной графической системе — Sketchpad, — разработанной Сазерлендом и продемонстрированной в Массачусетском технологическом институте (МТИ) в 1963 г. В этой системе можно было с помощью светового пера рисовать на экране векторного дисплея простые геометрические фигуры и осуществлять с ними различные манипуляции. Однако это была скорее демонстрация возможностей техники и особенностей графического интерфейса, поскольку данная программа

не могла решать какие-либо практические задачи. Система была очень дорогой, поскольку почти вся вычислительная мощность высокопроизводительного (по меркам того времени) компьютера использовалась для управления дисплеем.

Менее чем за полвека своего развития компьютерная графика проделала громадный путь. Сейчас это самая динамично развивающаяся отрасль информационной технологии. В подтверждение этой мысли упомянем лишь о динамичном рынке графических ускорителей, где почти каждые полгода происходит смена поколений графических процессоров, а мощность современных графических вычислителей превысила потенциал центральных процессоров.

Предлагаемое учебное пособие предназначено для широкой аудитории пользователей, связанных с компьютерной графикой. В нем рассмотрены проблемы, интересующие специалистов по системам автоматизированного проектирования, разработчиков игр, программистов, пользователей современных графических пакетов и др. Она может оказаться полезной студентам, обучающимся по различным направлениям и специализациям современной информационной технологии.

В главе 1 рассмотрены основные направления и области применения компьютерной графики, общая структура процесса создания и визуализации графической информации. В цепочке преобразований, которые претерпевает компьютерная геометрическая модель, особое значение имеет зрительная система человека. Обсуждаются особенности зрительного аппарата человека, дефекты восприятия цвета, основные цветовые модели. Растровая графика — одно из самых востребованных направлений компьютерной графики. Здесь приведены основные сведения о преобразовании изображений в растровую форму и о базовых технических характеристиках средств оцифровки.

В главе 2 описано техническое обеспечение компьютерной графики. Основное внимание уделено центральным устройствам компьютеров, используемым при обработке графической информации, а также созданию математических моделей и фотореалистичной визуализации сложных изображений. Подробно описаны видеоподсистемы компьютеров, современные графические процессоры и аппаратная реализация алгоритмов фотореалистичной визуализации, периферийные устройства, используемые для визуализации и документирования графических изображений.

В главе 3 даны теоретические основы компьютерной графики, рассмотрены математические модели кривых, поверхностей и тел, широко применяемых в современных системах геометрического моделирования. Компактно изложены ключевые вопросы математического моделирования графики: сплайны, кривые Безье, параметрические поверхности, булевы операции, твердотельные модели трехмерных объектов и др.

Глава 4 посвящена алгоритмическому обеспечению компьютерной графики и описанию графических форматов. В ней приведены базовые алгоритмы растровой и векторной графики, к которым в первую очередь относятся универсальные способы машинного геометрического преобразования — перемещение, по-

ворот и масштабирование. В растровой графике фундаментальными являются алгоритмы заполнения и сглаживания. В основе функционирования любых систем трехмерного геометрического моделирования лежат алгоритмы визуализации трехмерных сцен. Любая сцена независимо от состава и технологии обработки хранится в файловой форме. Специалистами в области компьютерной графики разработано множество форматов хранения геометрических данных, но только немногие из них применяются в современных системах и пакетах и лишь единицы могут именоваться отраслевыми стандартами. В главе 4 также рассмотрены основные файловые форматы, предназначенные для записи геометрической и сопутствующей информации на машинные носители, и техника сжатия избыточных данных файловой формы хранения.

Авторы выражают глубокую признательность рецензентам — профессору А.Н. Данчулу и коллективу кафедры «Цифровые информационные системы» (зав. кафедрой профессор М.Ф. Меняев) — за полезные замечания и советы, которые были учтены.

Авторы будут признательны всем читателям за замечания по содержанию книги, которые можно направлять по электронным адресам: zhuk@bmstu.ru, manichev@bmstu.ru.

1. ВВЕДЕНИЕ В КОМПЬЮТЕРНУЮ ГРАФИКУ

Глава 1 представляет собой расширенное введение в компьютерную графику (КГ). В ней обсуждаются базовые понятия и соглашения этого плодотворного направления современной информационной технологии. Приводится классификация самых заметных направлений и областей приложения КГ. Дается описание основных подходов к представлению геометрических моделей и графических образов, а также сравнительный анализ векторных растровых геометрических моделей. Подробно рассматриваются основные световые модели и особенности восприятия цвета человеком.

Мы получаем информацию об окружающем мире с помощью органов чувств, которые можно рассматривать как информационные каналы. Основную часть необходимых данных человек получает с помощью органов зрения. Информация, поступающая через органы зрения, обрабатывается головным мозгом и на ее основе принимаются решения о дальнейших действиях. При обработке поступающей информации головной мозг использует два механизма мышления:

- осознанный (логико-вербальный) манипулирует абстрактными последовательностями символов (объектов) с учетом семантики символов и практических знаний, связанных с символами;
- неосознанный (интуитивный, образный) работает с чувственными образами и представлениями о них.

Первый механизм отличается невысокой скоростью обработки информации, поскольку связан с распознаванием и идентификацией символов, осознанием семантики последовательности символов и логической обработкой данной информации. Результат содержит точную (часто количественную) оценку полученной информации. Второй механизм обеспечивает максимальную скорость обработки информации, воспринимаемой в форме графических изображений. При этом имеет место качественная интегральная оценка информации. С точки зрения максимизации объема и скорости получения информации сочетание обоих механизмов обеспечивает наилучшие результаты. Таким образом, в процессе взаимодействия человека с компьютером необходимо сбалансированное использование как символической, так и образной информации.

Рассмотрим условия, в которых наблюдатель получает полезную зрительную информацию. В общем случае группа источников освещает объекты сцены естественного или искусственного происхождения. Световой поток, падающий на объект, отражается от его поверхностей, частично проходит через него и, возможно, дополняется светом, идущим от самого объекта. Затем часть светово-

го потока, содержащего информацию об объекте, распространяясь в окружающей среде, попадает в органы зрения человека. Иногда на эту составляющую светового потока воздействуют фильтр или оптическая система, находящиеся между объектом и наблюдателем. Органы зрения воспринимают видимую часть светового потока, пришедшую от объекта, и передают ее для дальнейшей обработки. Информация, заключенная в этом сигнале, преобразуется головным мозгом в осознанное изображение. Человек наделяет это представление всеми характеристиками, которые отличают структурированную информацию от хаоса и превращают его в сцену, обладающую семантикой и прагматикой. Итак, человек получает всю зрительную информацию в графическом виде, которая после дополнительной обработки головным мозгом преобразуется в другие виды информации.

Средства компьютерной графики (КГ) используют для моделирования описанных процессов получения графической информации и создания изображений, по своим изобразительным свойствам максимально приближенных к объектам реального мира.

1.1. Направления и области использования компьютерной графики

Выделяют следующие направления КГ:

- изобразительная КГ;
- обработка и анализ изображений;
- анализ сцен и распознавание образов;
- КГ для визуализации синтезированных абстрактных изображений (когнитивная КГ — графика, способствующая познанию).

1.1.1. Изобразительная компьютерная графика

В этом направлении КГ изображение является не промежуточным результатом, не исходными данными для выполнения расчетов или реализации алгоритмов, а основным продуктом. Источником графических данных служат образы искусственного происхождения, созданные средствами геометрического моделирования.

К основным задачам изобразительной графики относятся:

- построение модели сцены по реальному или идеальному прообразу;
- преобразование модели сцены для генерации требуемых технических параметров или получения визуального эффекта;
- визуализация и вывод сцены на устройство печати или экран монитора.

Изобразительная КГ нашла широкое применение в различных отраслях народного хозяйства: компьютерные презентации, графические приложения в полиграфии, анимационные ролики, компьютерные игры и многое другое.

1.1.2. Обработка и анализ изображений

В этом направлении КГ основным источником графических данных является реальная плоская или трехмерная сцена. Процедура оцифровки позволяет представить сцену в цифровом виде и передать для обработки в вычислительную систему. Машинное описание, полученное таким способом, представляет собой образ, который фиксирует только видимую страту оригинала, поэтому модель обладает ограниченными прогностическими и расчетными возможностями.

В данном разделе КГ решаются следующие типовые задачи:

- повышение качества изображения;
- оценка изображения, определение его формы, местоположения, размеров и других параметров;
- преобразование изображения для получения требуемых декоративных свойств или технических характеристик.

Самым известным примером этого направления можно считать растровую изобразительную графику, где объектом преобразования является оцифрованный оригинал, например фотография или рисунок, который подвергается преобразованиям, решающим поставленную художественную или техническую задачу.

1.1.3. Анализ сцен и распознавание образов

В этом направлении КГ объектами анализа и обработки служат их графические модели, размещенные в некоторой естественной или искусственной среде. Основными задачами при распознавании объектов являются локализация объекта, определение его типа, а также расчет геометрических и структурных характеристик. Задачи такого вида решаются в системах машинного зрения (роботы), при анализе рентгеновских снимков в медицине и технике, в процессе расшифровки результатов аэрофото- и космической съемки.

1.1.4. Когнитивная компьютерная графика

Когнитивная КГ занимается синтезом и визуализацией абстрактных изображений, не имеющих реальных физических аналогов или первообразов. Простейшим примером такого использования машинной графики является построение диаграмм, гистограмм, графиков распределений, которые в наглядной графической форме представляют абстрактные сущности, возникающие в результате созидательной деятельности человека.

Основная проблема когнитивной КГ — создание моделей представления знаний, допускающих компактное и единообразное описание логического и образного знания. Для этого требуется решить три важнейшие задачи:

- разработка техники визуализации данных и знаний;
- представление знаний в компактной форме, доступной для восприятия и обработки наблюдателем;
- синтез правил, гипотез, механизмов объяснения и предсказания.

1.1.5. Области использования компьютерной графики

Современный пользователь общается с компьютером посредством графического интерфейса. Графический интерфейс как посредник между человеком и машиной косвенно участвует во всех реализациях информационной технологии. Кроме этого существует множество направлений, где достижения компьютерной графики и геометрии играют принципиальную созидательную роль:

- системы автоматизации научных исследований, системы автоматизированного проектирования, системы автоматизации технологической подготовки производства, автоматизированные системы организации и управления производственными процессами, геоинформационные системы и др.;
- системы организации и управления бизнес-процессами;
- геометрическое моделирование объектов реального мира;
- компьютерная живопись и графика для печати и онлайн-изданий;
- создание статичных и анимированных изображений для Интернета;
- компьютерные издательские и полиграфические системы и другие приложения в области средств массовой информации;
- моделирование и изготовление одежды;
- архитектурное проектирование и строительство;
- системы виртуальной реальности: тренажеры и симуляторы, которые используются для подготовки специалистов в различных отраслях народного хозяйства;
- компьютерные игры и другие приложения в области развлечений.

Области применения средств компьютерной графики в книге не рассматриваются, поскольку они детально освещаются в специальной и научно-популярной литературе.

1.2. Растровая и векторная графика

Компьютер может обрабатывать данные только если они представлены в цифровом виде. Описание графических данных выполняется в соответствии с определенными правилами, совокупность которых часто называется форматом. Важнейшей частью любого графического формата является пространство, в котором расположены объекты сцены или элементы изображения.

В КГ используются два основных варианта описания графических данных, отличающихся количеством независимых координат, необходимых для определения положения графических объектов и их элементов:

- плоское, или двухмерное (2D), которое оперирует только двумя независимыми координатами;
- объемное, или трехмерное (3D), требующее задать три независимые координаты.

Двухмерная сцена может формироваться из объектов, расположенных как в координатной плоскости, так и из проекций всех видимых объектов на плоскость изображения. Компьютерная графика изобилует примерами плоских сцен: цифровые фотографии; сканированные рисунки и картины; изображения, созданные растровыми и двухмерными векторными редакторами.

Трехмерная КГ — одно из наиболее динамично развивающихся направлений информационных технологий. Трехмерное описание геометрии намного сложнее двухмерного, поэтому массовое применение достижений этой отрасли долгое время сдерживалось вычислительными возможностями персональных компьютеров. Основными заказчиками и потребителями трехмерной графики являются компьютерные игры, киноиндустрия, компьютерные тренажеры и симуляторы.

Множество способов представления графических объектов в памяти вычислительной системы можно разбить на два больших класса, существенно отличающихся базовыми принципами моделирования геометрии:

- геометрический объект представляется посредством координат характеристических точек и математических моделей кривых и поверхностей;
- геометрический универсум разбивается на множество элементарных областей (точек или объемов), а каждый объект представляется как множество занимаемых им областей дискретного пространства.

Наиболее известная модель первого класса называется векторной. В ней характеристические точки объекта соединяют отрезки прямых линий — векторы. Векторная модель может быть использована для представления плоских и пространственных объектов. Она лежит в основе многих популярных векторных графических форматов. Большинство современных пакетов (системы автоматизированного проектирования, пакеты изобразительной графики, автоматизированные системы научных исследований) используют для обработки графической информации векторное описание.

Известно много вариантов описания геометрии как набора элементов некоторого дискретного универсума. Большинство из них имеют либо теоретический интерес, либо очень узкую область применения. Наибольшее распространение в современных системах КГ получила так называемая растровая модель. В ней описываемое пространство покрывается регулярной сетью одинаковых двухмерных или трехмерных элементов. Элементы сетки имеют форму квадрата или прямоугольника (куба или параллелепипеда в трехмерном случае). Их принято называть пикселями (вокселями — для трехмерного пространства), а саму сеть — растром.

Совокупность элементов растра задает изображение, заполняя область пространства, которое этот объект занимает. Элементы растра — независимые об-

разования, которые могут принимать любые значения цвета и тона из допустимого диапазона. Если размеры пикселей невелики, то наблюдатель воспринимает дискретную растровую картинку как целостный образ — фотографию или рисунок.

Многие популярные графические форматы предназначены для хранения растровых данных в самой простой редакции — в виде плоского массива однородных точек. В геоинформационных системах нашли применение другие модели пространственного разбиения, например регулярно-ячеистые, квадротомические и др.

Помимо растровых и векторных моделей иногда используют их сочетание — так называемые гибридные модели. Все эти модели при описании одной и той же области пространства могут быть взаимно преобразованы. Как правило, осуществить переход от векторного способа хранения изображения к растровому несложно. При таком преобразовании необходимо задать масштаб для пересчета координат векторов в пиксели. Обратный переход в общем случае является достаточно сложным и неоднозначным, поскольку связан с интеллектуальной интерпретацией точечных образов.

Выбор растрового или векторного формата зависит от поставленных целей и решаемых задач. Практически все современные устройства вывода графических изображений являются растровыми и отображают любое изображение в виде совокупности точек. Это, в частности, относится к самым распространенным представителям компьютерной периферии: мониторам и принтерам. На экране монитора или принтерном оттиске отображается растровый образ независимо от его исходной формы хранения, которая может быть векторной или растровой.

1.2.1. Векторный формат

Векторное представление графических данных предполагает наличие совокупности базовых геометрических элементов, называемых примитивами. Обычно это фигуры простой формы. Так, для создания плоских объектов используются прямоугольники, треугольники, овалы, прямые; для трехмерных фигур — кубы, параллелепипеды, сферы, эллипсоиды, конусы и др. Для всех перечисленных объектов известны математические модели, задающие их форму, положение и габаритные размеры. Кроме того, в векторном файле хранятся оформительские атрибуты примитивов: цвет, тип заливки, толщина граничного контура, окончание линии и др. Кривые сложной формы представляются в виде ломаной со звеньями, размеры которых не распознаются наблюдателем как прямые. Звенья ломаных называются векторами. Векторы задаются координатами начальной и конечной точек или координатами начала, длиной и направлением.

Объекты сложной геометрии образуются из базовых примитивов при помощи допустимого множества операций. В двумерных векторных редакторах это множество ограничивается группированием, наложением и простейшими бу-

левскими операциями. В трехмерных редакторах набор допустимых преобразований намного шире. В него могут входить регулярные булевские операции, заметание, смещение и вращение контура, а также множество других операций, зависящих от вида примитивов и системы моделирования.

Векторное описание отличается несколькими значимыми достоинствами. Оно позволяет задавать достаточно сложные изображения с высокой точностью. Благодаря этому векторные форматы широко используются в САД-системах для геометрического моделирования технических объектов, когда необходимо детально представить форму и положение реальной машины или прибора.

Объекты, заданные в векторной форме, легко масштабируются, а точность их отображения определяется только параметрами устройства вывода. Как правило, такое описание намного компактнее, чем растровое, когда форма объекта задается множеством пикселей, заполняющих его периметр или объем.

Векторные объекты разрешается масштабировать в очень широких пределах без потерь визуального качества и точности моделирования.

К недостаткам векторных изображений относятся ограниченные возможности создания полных моделей для реальных сцен с учетом всего множества деталей обстановки. Кроме того, в векторной графике существуют серьезные проблемы с фотореалистичной визуализацией созданных моделей. Обычно недостатки векторных моделей компенсируются использованием технологий растровых моделей на этапе визуализации полученных изображений.

1.2.2. Растровый формат

Растровая модель представляет собой отображение непрерывного оригинала во множество элементов абстрактного дискретного пространства, называемого растром. Самый распространенный вариант этой парадигмы — это двухмерный растр, когда плоское изображение задается в виде множества точек регулярной ортогональной сеткой, состоящей из одинаковых элементов.

Двухмерная растровая графика — одно из самых популярных направлений КГ. Она поддерживает способ работы с цифровыми оригиналами, которые близки классическому рисованию или живописи. Простота растровой формы хранения данных обусловила широкое распространение растровых картинок в сети Интернет. Основным массивом графики, циркулирующим в сети, являются двухмерные растровые образы. Существуют и другие причины высокой популярности этого подхода — растровый принцип действия основной части устройств вывода (принтеров и мониторов).

Большая часть особенностей этой формы хранения графических данных связана с ее дискретностью. Только в растровой графике можно получить образ такого качества, который соответствует категории фотореалистичного. Причина этого заключается не в особых креативных свойствах растровых редакторов. Компьютерные образы высокой достоверности получаются оцифровкой реальных физических прототипов, а эта процедура создает только растровые изображения.

Размер растрового файла не зависит от содержимого отображаемой области. Уменьшить его можно с помощью алгоритмов сжатия. Если один оригинал представить в растровой и векторной формах, то в большинстве случаев первая форма потребует заметно больше дискового пространства, чем вторая.

Растровые изображения могут потерять качество в процессе геометрических преобразований, что особенно проявляется при масштабировании и повороте. Проведем простой мысленный эксперимент. Пусть растровое пространство представляет собой плоскость, обладающую способностью к бесконечному растяжению. Если значительно увеличить эту плоскость, то ее точки приобретут заметные размеры, а изображение — зернистую структуру.

В классическом растровом формате не существует понятия объекта. Для обрабатываемой программы нет овалов, линий, треугольников, а существуют только точки, которые для редактора совершенно независимы друг от друга. По этой причине для точечных изображений задачи идентификации и распознавания решаются с большим трудом, а часто и вовсе не имеют решения.

Несмотря на видимую простоту, в этом разделе компьютерной графики есть немало трудных для понимания тем.

1.3. Свет и физические основы цветовосприятия

Понятия света и цвета в КГ являются основополагающими. Известно, что свет имеет дуальную природу и его можно рассматривать либо как поток частиц различной энергии (тогда его цвет определяет энергия частиц), либо как поток электромагнитных волн (в этом случае цвет определяется длиной волны или частотой). Далее свет будет рассматриваться как поток электромагнитных волн. Электромагнитная волна характеризуется своей амплитудой A , длиной волны λ или частотой колебаний, фазой и поляризацией. Видимый свет — узкий участок спектра электромагнитных волн с длиной волны $\lambda = 400 \dots 700$ нм. Амплитуда определяет энергию волны, которая пропорциональна квадрату амплитуды. Фаза и поляризация электромагнитных волн в дальнейшем учитываться не будут.

Энергия, переносимая электромагнитной волной, зависит от ее длины — увеличивается с уменьшением длины волны. По этой причине коротковолновые ультрафиолетовые лучи по своей энергии значительно превосходят длинноволновые инфракрасные лучи. Какое влияние все это оказывает на характеристики света как переносчика информации? Несколько упрощая ситуацию, можно сказать, что общее число всех световых волн в световом луче, которое эквивалентно его общей энергии, обуславливает интенсивность, или яркость, света. Пропорции, в которых представлены различные световые волны, влияют на его хроматические характеристики, поэтому доминирующие длины волн светового потока определяют его цветность. Свет как носитель информации содержит только два основных вида данных — информацию о яркости и цвете.

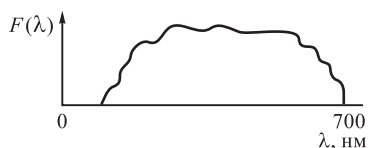


Рис. 1.1. Пример спектрально-го состава пучка света

На практике редко приходится сталкиваться с монохроматическим светом, т. е. с электромагнитными колебаниями какой-то одной определенной длины волны (примером такого света является излучение лазера). Обычно свет представляет собой непрерывный поток волн с различными длинами волн и различными амплитудами. Такой поток можно характеризовать так называемой энергетической спектральной кривой $F(\lambda)$, где само значение функции $F(\lambda)$ представляет собой энергетический вклад колебаний с длиной волны λ в суммарный световой поток.

Общая мощность видимого светового потока равна интегралу от спектральной функции по всему видимому диапазону длин волн. Типичная спектральная кривая приведена на рис. 1.1.

1.3.1. Светотехнические величины

Область физической оптики, посвященная измерению энергии, переносимой световыми волнами и связанными с ней величинами, называется фотометрией. Рассмотрим основные светотехнические величины и единицы их измерения.

Световой поток (F). Световой поток через некоторую поверхность S равен суммарной энергии, переносимой световыми волнами сквозь эту поверхность. Световой поток измеряется в люменах (лм).

Сила света (I). Источник в общем случае может иметь неравномерное излучение по разным направлениям. Плотность светового потока в телесном угле выбранного направления называется силой света и определяется по формуле

$$I = dF/d\omega,$$

где F — световой поток, проходящий через площадку dS ; ω — телесный угол.

Единица силы света называется канделлой (кд). Если в телесном угле, равном одному стерadianу (ср), проходит, равномерно распределяясь, световой поток в 1 лм, то сила света в этом направлении равна одной канделле: 1 кд = 1 лм/1 ср.

Освещенность (E). Плотность светового потока по поверхности S , на которую он падает, называется освещенностью. Освещенность можно рассчитать по следующей формуле:

$$E = F/S.$$

Единицей освещенности является люкс (лк). Освещенность в 1 лк создается световым потоком в 1 лм на площади в 1 м²; 1 лк = 1лм/1м². Освещенность экрана в кинотеатре составляет приблизительно 200 лк. Освещенность объекта передачи в телевизионной студии достигает 2000 лк.

Яркость (B). Яркостью называется плотность силы света. Эту величину можно определить по формуле

$$B = I/S,$$

где I — сила света, кд; S — площадь излучения, m^2 .

Единицей яркости является канделла на квадратный метр: $1 \text{ кд}/m^2$. Яркость экрана кинескопа на белых участках изображения составляет от 40 до $80 \text{ кд}/m^2$.

Само понятие цвета тесно связано с тем, как человек (органы его зрения) воспринимает свет; можно сказать, что оттенок цвета создается в глазу и головном мозге человека. Поскольку светоприемником в КГ являются органы зрения человека, при создании средств КГ необходимо учитывать физические и психофизиологические особенности зрения.

1.3.2. Зрительный аппарат человека

Рассмотрим, каким именно образом происходит восприятие света человеческим глазом. На рис. 1.2 показано строение глазного яблока человека. Глаз расположен в глазнице черепа. Из глазного яблока выходит глазной нерв, содержащий около 800 000 волокон и соединяющий его с головным мозгом. Глазное яблоко состоит из внутреннего ядра и окружающих его трех оболочек — наружной, средней и внутренней. Наружная оболочка — белочная оболочка — представляет собой жесткую непрозрачную капсулу, переходящую спереди в прозрачную роговицу, через которую в глаз проникает свет. Под ней находится сосудистая оболочка, переходящая спереди в радужную оболочку, в центре которой расположен зрачок. Под действием мышц зрачок способен сужаться и

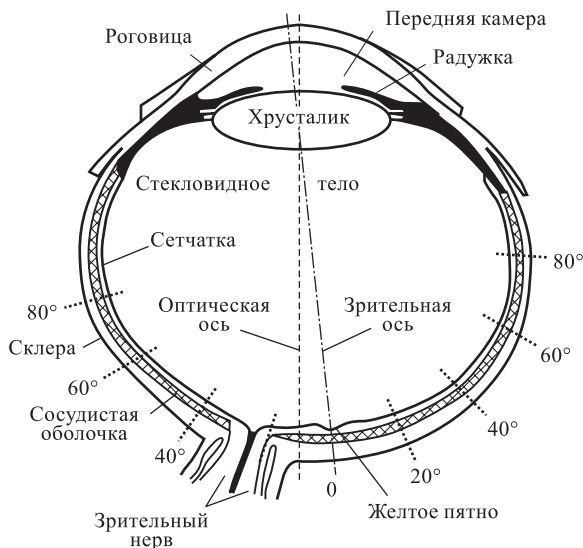


Рис. 1.2. Строение глазного яблока человека

расширяться. В сосудистой оболочке находится ресничная мышца, которая регулирует кривизну хрусталика. Во внутренней оболочке глаза — сетчатке — имеются светочувствительные рецепторы — палочки и колбочки. В них энергия света преобразуется в сигнал, который передается по зрительному нерву в мозг. Колбочки сосредоточены в центре сетчатки, в желтом теле напротив зрачка. Они обеспечивают дневное зрение, воспринимая цвет, форму и детали предметов. На периферии сетчатки расположены только палочки, которые раздражаются слабым сумеречным светом, но не чувствительны к цвету.

Колбочки и палочки содержат зрительные пигменты, которые очень похожи на любые другие пигменты в том, что они поглощают свет и степень поглощения зависит от длины волны. Важное свойство зрительных пигментов состоит в том, что когда зрительный пигмент поглощает фотон света, то изменяется форма молекулы и в то же время происходит переизлучение света. Пигмент при этом изменяется, преобразованная молекула поглощает свет хуже, чем прежде, т. е. как часто говорят, «отбеливается». Изменение формы молекулы и переизлучение энергии некоторым образом иницируют светочувствительную клетку к выдаче сигнала.

Информация от светочувствительных рецепторов (колбочек и палочек) поступает к другим типам клеток, соединенным между собой. Специальные клетки передают информацию в зрительный нерв. Волокно зрительного нерва обслуживает несколько светочувствительных рецепторов, т. е. некоторая предварительная обработка изображения выполняется непосредственно в глазу.

Область сетчатки, в которой волокна зрительного нерва соединены, лишена светочувствительных рецепторов и называется слепым пятном.

Внутреннее ядро глазного яблока вместе с роговицей образует оптическую систему глаза, которая состоит из хрусталика, стекловидного тела и водянистой влаги камер глаза. Прозрачный и эластичный хрусталик расположен за зрачком и имеет форму двояковыпуклой линзы. Он вместе с роговицей и внутриглазными жидкостями преломляет входящие в глаз лучи света и фокусирует их на сетчатке.

Рефлекторный механизм, с помощью которого лучи света, исходящие от объекта, фокусируются на сетчатке, называется аккомодацией. Он выполняет две функции:

- рефлекторное изменение диаметра зрачка. При ярком свете кольцевая мускулатура радужки сокращается, а радиальная расслабляется; в результате происходит сужение зрачка и количество света, попадающего на сетчатку, уменьшается, что предотвращает ее повреждение. При слабом свете, наоборот, радиальная мускулатура сокращается, а кольцевая расслабляется. При сужении зрачка увеличивается глубина резкости и поэтому различия в расстоянии от объекта до глаза меньше сказываются на изображении;

- преломление света. От объекта, удаленного на расстояние больше 6 см, в глаз поступают практически параллельные лучи света, тогда как лучи, идущие от более близких предметов, заметно расходятся. В обоих случаях для того что-

бы свет сфокусировался на сетчатке, он должен быть преломлен, и для близких предметов преломление должно быть более сильным. Глаз человека способен точно фокусировать свет от объектов, находящихся на расстоянии от 25 см до бесконечности. Форма роговицы не может изменяться, поэтому рефракция здесь зависит только от угла падения света на роговицу, который, в свою очередь, зависит от удаленности предмета. В роговице происходит наиболее сильное преломление света, а функция хрусталика состоит в окончательной «наводке на резкость». При сокращении ресничной мышцы хрусталик меняет кривизну, приспособляясь для восприятия дальних или ближних предметов. Преломившиеся лучи света от рассматриваемого предмета, падая на сетчатку, образуют на ней уменьшенное обратное изображение предмета. Однако мы видим предметы в прямом виде благодаря повседневной тренировке зрительного анализатора, что достигается формированием условных рефлексов, показаниями других анализаторов, их взаимодействиями, постоянной проверкой зрительных ощущений, повседневной практикой.

Двигательный аппарат каждого глаза состоит из шести мышц, сокращения которых позволяют изменять направление взгляда. У людей с нормальным зрением на сетчатке возникает четкое изображение предметов, так как оно сфокусировано на центре сетчатки.

1.3.3. Чувствительность глаза

Исследования показали, что многие биологические и технические системы воспринимают цветовую и яркостную информацию раздельно. Это утверждение справедливо и для зрения человека. За цветовое и яркостное восприятие глаза отвечают два различных вида нервных клеток — колбочки регистрируют цветовую компоненту светового потока, а палочки воспринимают его яркостную составляющую.

Палочки образуют однородную популяцию нервных клеток, они демонстрируют высокую чувствительность к световому потоку, но при этом способны реагировать только на суммарную энергию света. Палочки позволяют человеку распознавать предметы в условиях плохой освещенности. Они регистрируют окружающий мир как ахроматическую, лишённую цветовых нюансов среду, наполненную серыми предметами.

Чувствительность палочек к свету неоднородна, при ярком свете она мала, но при низких уровнях освещенности возрастает и обеспечивает способность человека видеть в условиях плохой видимости. Палочки содержат пигмент с максимальной чувствительностью на длине волны около 510 нм (рис. 1.3, точечная линия) в зеленой части спектра. Пигмент палочек из-за его цвета часто называется зрительным пурпуром.

Кривая общей (палочек и колбочек) спектральной чувствительности глаза для яркого освещения показана на рис. 1.3 сплошной линией. Очевидно, что ре-

1.3. Свет и физические основы цветовосприятия

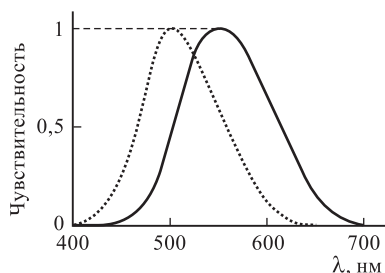


Рис. 1.3. Общая спектральная чувствительность глаза:

- — чувствительность палочек;
- суммарная чувствительность палочек и колбочек

зультирующая чувствительность колбочек и чувствительность палочек имеет максимум на длине волны около 550 нм, что соответствует желто-зеленому свету, но при этом чувствительность палочек почти в 1000 раз выше, чем у колбочек. Таким образом, максимум чувствительности зрения человека лежит в желто-зеленой области спектра.

Графики, показанные на рис. 1.3, подтверждают, что в условиях слабой освещенности цветное зрение практически отсутствует. Например, отклик на красный цвет ($\lambda = 700$ нм) при низких уровнях освещения (см. точечную кривую на рис. 1.3) практически равен нулю.

Поэтому красный цвет ночью будет выглядеть черным.

Физиологами и оптиками давно установлен факт избирательной чувствительности зрения человека к волнам различной длины. Человек хорошо видит зеленый цвет, несколько хуже — красный, и хуже всего — синий цвет. Как объяснить этот цветовой феномен? Существует три типа колбочек, отличающихся фоточувствительным пигментом. Колбочки обычно называют синими, зелеными и красными в соответствии с наименованием цвета, для которого они имеют максимальную чувствительность. Упомянутые три пигмента имеют максимум поглощения приблизительно на 430, 530 и 560 нм.

На рис. 1.4 представлены графики функций чувствительности для всех трех типов колбочек. Точнее, этим длинам волн соответствует не синий, зеленый и красный цвета, а фиолетовый, сине-зеленый и желто-зеленый. Поэтому более корректным будет использование названий коротко-, средне- и длинноволновые колбочки.

Как видно на рис. 1.4, области чувствительности колбочек значительно перекрываются. Поэтому, как правило, в процессе цветового восприятия возбуждаются все три вида колбочек. Почему, несмотря на это, мы так хорошо различаем цвета? Это проблема пока не получила исчерпывающего решения в физиологии зрения.

Итак, эффективности поглощения световых волн существенно различаются. Особенно хорошо человек воспринимает зеленый свет, красный свет — уже несколько хуже, а синий — плохо. Это приводит к тому, что цветовые составляющие цветного изображения вносят разные вклады в ощущение яркости. Наименьший вклад в общую яркость вносит синяя составляющая.

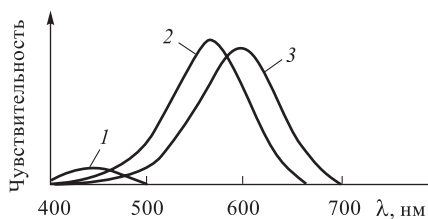


Рис. 1.4. Функции чувствительности трех типов колбочек:

- 1 — синих; 2 — зеленых; 3 — красных

Низкая чувствительность зрения человека к синим цветовым тонам является также причиной того, что синяя окраска фона хорошо подходит для цветных диапозитивов. Если черный шрифт напечатан на белом фоне, то шрифт и фон воспринимаются одинаково четко. Если же, например, белый шрифт напечатан на синем фоне, то значение фона как бы теряется, и в ощущении изображения доминирует шрифт или остальные элементы изображения с другой окраской.

Избирательная чувствительность зрения человека — экспериментально подтвержденный факт. Более того, исследователи в области психологии зрительно-го восприятия провели многочисленные тесты для получения количественных оценок вкладов отдельных цветовых составляющих. Установлено, что для большинства людей доли цветовых координат распределяются следующим образом: 59 % — зеленый, 30 % — красный и 11 % — синий цвет. Иными словами, если известны яркости зеленой, красной и синей составляющих, то суммарную яркость нельзя получить простым суммированием. Ее следует вычислять по примерной формуле:

$$\text{Яркость} = 0,59 \times \text{зеленый} + 0,3 \times \text{красный} + 0,11 \times \text{синий}.$$

В силу того, что коэффициент преломления в радужке и хрусталике глаза растет с увеличением частоты света, глаз не избавлен от хроматической аберрации, т. е. если изображение сфокусировано для одной из длин волн, то для других длин волн изображение будет расфокусировано. Хрусталик оптимально фокусирует на сетчатке свет с длиной волны около 560 нм. Поскольку пики чувствительности средне- и длинноволновых колбочек (530 и 560 нм соответственно) близки друг к другу, изображения для этих колбочек могут быть сфокусированы одновременно. Изображение же для коротковолновых палочек будет размытым. Поскольку степень фокусировки разная для различных длин волн, то не требуется одинаковой разрешающей способности глаза для разных типов колбочек. В глазу человека на одну коротковолновую колбочку приходится 20 средне- и 40 длинноволновых колбочек. В этой связи понятно, почему ширина полосы пропускания для холодных, коротковолновых цветов в телевидении может быть выбрана существенно меньшей без субъективно заметной потери верности воспроизведения.

1.3.4. Дефекты цветового восприятия

Всем известны такие дефекты зрения, как близорукость, дальнозоркость, астигматизм. Существуют правовые нормы, которые ограничивают дееспособность людей с этими дефектами зрения. Недостатки цветового восприятия встречаются гораздо реже. Исключением является дальтонизм, про который, видимо, знают все. Известность этого явления в немалой степени объясняется его высокой цитируемостью в кроссвордах и сканвордах, но объективные исследования показали, что число людей, страдающих дальтонизмом, оказалось не-

ожиданно велико. Почти каждый десятый человек на планете не способен различать цветовые оттенки в большей или меньшей степени! Дальтонизм — не единственная аномалия цветового зрения человека. Можно привести обширную выборку медицинских диагнозов, относящихся к нарушениям цветового аппарата. Трудно оспорить тот факт, что должны существовать профессиональные ограничения для людей с аномалиями цветового восприятия. Индивидуум с большими диоптриями не может работать часовщиком или претендовать на профессию нейрохирурга. Наличие дихроматопсии или протаномалии у дизайнера делает сомнительными все его заключения и рекомендации в области доредакционной подготовки цветных публикаций высокого качества.

Физиологи и специалисты в области психологии разработали несколько тестовых испытаний, предназначенных для проверки зрения человека на наличие дефектов цветовосприятия. Наиболее распространенный в сфере графического дизайна тест Farnsworth-Munsell 100 позволяет обнаружить отклонения испытуемого от нормы цветовосприятия средствами простых проверок. Известны различные реализации этого теста, чаще всего он предлагается испытуемому в форме некоторого набора, напоминающего настольную игру. Тест состоит из цветных образцов, которые разбиты на четыре группы, в каждую из них входит по 21 цветовому экземпляру. Цветовые образцы представляют собой цилиндры, которые по своим размерам близки к обычным шашкам. Верхние части цилиндров окрашены различными цветовыми оттенками, нижние части пронумерованы. Задача испытуемого — расставить цилиндрики по критерию цветового подобия. После того, как все фишки отсортированы, требуется сравнить номера серий с образцами, которые хранятся в таблицах, или ввести данные в обрабатывающую программу. По расхождениям с эталонной последовательностью можно судить о наличии аномалий цветовосприятия испытуемого.

Тест Ishihara состоит из набора специально разработанных изображений, в которых на хаотичном фоне нарисована простая фигура или нанесен некоторый регулярный узор. Эти изображения предлагаются для просмотра испытуемому, который должен распознать узор или рисунок. По результатам испытания можно диагностировать большую часть хроматических аномалий человека.

1.3.5. Цветовые иллюзии

Цветовые иллюзии — частный случай более общего явления, известного под названием оптические иллюзии. Академические словари объясняют этот феномен обманом зрения или ошибками в оценке геометрических характеристик и физических параметров объектов окружающей среды. Ошибки эти весьма многочисленны, разнообразны и с трудом поддаются объяснению.

Трудно поверить, глядя на рис. 1.5, что все горизонтальные линии являются параллельными прямыми. Этот поразительный пример производит впечатление ловко проделанного фокуса.

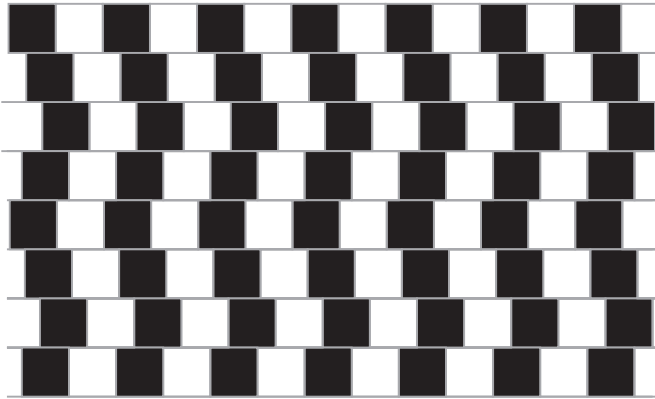


Рис. 1.5. Пример оптической иллюзии

На рис. 1.6 показана регулярная сетка, в узлах которой расположены круги небольшого размера. Это классический пример, демонстрирующий оптическую иллюзию в самой простой форме. Испытуемому предлагается подсчитать количество кружков разного цвета. Обычно уже после обработки первого ряда начинают путаться люди с самой устойчивой психикой и идеальным зрением.

На рис. 1 цветной вклейки приведен пример иллюзии цветового восприятия. Прямоугольное поле заполнено в шахматном порядке клетками светло-зеленого цвета, на диагоналях этой фигуры размещены прямоугольники отличного цвета. Требуется оценить сходство цветов клеточек, заполняющих диагонали. Кажется, что диагонали этой фигуры покрашены разным цветом, но инструментальная проверка или осмотр изображения при большом увеличении свидетельствуют о полной хроматической тождественности. Можно выиграть любое пари, что

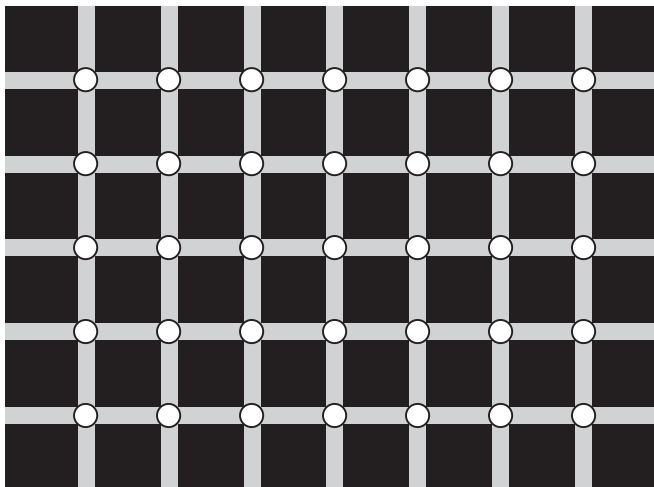


Рис. 1.6. Пример иллюзии восприятия тонов

десять из десяти опрошенных, не знакомых с этим тестом, зафиксируют отличие цветов прямоугольников, расположенных на диагоналях. Объективная инструментальная проверка дает совершенно иной результат — все клеточки диагоналей имеют одинаковый цвет (R234, G35, B120).

Можно продолжать ряд примеров, но даже на основе приведенных данных позволительно сделать вывод о релятивизме цветового восприятия человека. Мозг человека обрабатывает цветовые данные не как объективный феномен, достоверность которого никак не связана с внешними условиями, а относительно в тесной связи с окружающими объектами, средой и предысторией.

1.3.6. Хроматическая адаптация

Проведем мысленный эксперимент, последствия которого, впрочем, легко предсказать заранее. Пусть имеется некоторая сцена или цветное изображение, которые наблюдаются при фиксированных условиях освещения, например при дневном свете. Что произойдет, если резко изменить условия освещения, например заменить естественный свет искусственным флуоресцентным источником с заметным сдвигом в сторону зеленой части спектра. Спустя некоторое время наблюдатель будет видеть сцену в тех же красках, что и прежде. Голубое платье останется голубым, а шляпка красного цвета сохранит свой первоначальный цвет, несмотря на явное противоречие объективным физическим законам. Явление, которое иллюстрирует этот мысленный эксперимент, называется хроматической адаптацией — способностью системы зрения человека приспосабливаться к изменившимся условиям освещения и сохранять неизменными исходные цвета объектов сцены или элементов изображения. Дарвинисты утверждают, что эволюция — это накопление полезных признаков, наверное, этим качеством обладает и свойство хроматической адаптации. Но в области предпечатной подготовки цветных изданий она создает немало проблем для дизайнеров и полиграфистов.

Человек не в силах приказать своему мозгу остановить процесс адаптации, но можно, по крайней мере, исключить основные источники ошибок при принятии ответственных решений по управлению цветом. Вся предпечатная подготовка цветных публикаций должна проходить в условиях освещения, основные параметры которого соответствуют стандартам. Неслучайно многие препресс-бюро и художественные мастерские имеют специально созданные условия освещения. Это значит, что работа ведется на высококачественных и тщательно откалиброванных мониторах в специально подготовленных помещениях с равномерным неярким освещением и без доступа прямых солнечных лучей. Стены и потолок таких помещений должны быть светло-серые. По тем же причинам следует избегать использования картин, репродукций или любых ярких декоративных элементов, которые могут быть источником искажений цветового восприятия.

Если по каким-то причинам невозможно обеспечить нейтральный фон во всем рабочем помещении, то цветные оттиски исследуют и оценивают в специально подготовленных кабинках, на ограниченных площадях которых намного проще обеспечить стандартные условия освещения. Получили распространение и портативные установки, позволяющие выполнить всю необходимую работу по оценке цветового пространства изображения или печатной страницы.

Сходными с хроматической адаптацией причинами объясняется еще один цветовой феномен — метамеризм, который проявляется в том, что два цвета выглядят одинаково при одних условиях освещения и представляются наблюдателю совершенно различными в иной световой среде. Сила проявления этого эффекта зависит от множества причин: технологии производства страницы, преобладающего цвета, типа композиции и пр. Известно, что в наибольшей степени метамеризму подвержены полноцветные полиграфические оттиски, в меньшей степени — фотографии. Изображения, отпечатанные на современных струйных принтерах пигментными чернилами, обладают самой большой устойчивостью в этом отношении.

1.4. Формирование цветных изображений

Описания цвета в терминах выбранного цветового пространства называют цветовой моделью. С помощью модели каждый хроматический тон и оттенок можно представить в виде совокупности чисел — цветовых координат, это позволяет обмениваться цветовой информацией между компьютерами, программами и периферийными устройствами.

1.4.1. Базовые принципы описания цвета

Все распространенные цветовые модели в зависимости от их особенностей и области применения можно разделить на три группы:

- *аппаратно-зависимые* — модели, используемые в технических средствах ввода-вывода графической информации;
- *аппаратно-независимые* — модели, не связанные с конкретным воспроизводящим устройством, они описывают цвет в абстрактных колориметрических терминах. Эти модели предложены международной комиссией по освещению CIE (Commission Internationale d'Éclairage), их широко применяют в теоретических исследованиях и системах управления цветом;
- *интуитивные* — модели, построенные на основе субъективного восприятия цвета человеком.

В технических средствах КГ используются два типа цветных объектов — самосветящиеся, излучающие объекты (экраны электронно-лучевых трубок, плазменные панели, матрицы светодиодов) и несамосветящиеся объекты, отра-

жающие или преломляющие падающий на них свет (бумажные оттиски, светофильтры и т. п.).

Для излучающих объектов используется аддитивное формирование оттенков, когда требуемый цвет формируется за счет смешения трех основных оттенков цветов. В этом случае целесообразно использовать модель, основанную на принципе сложения цветов. Самой известной моделью такого типа является модель RGB. Ее название образовано по первым буквам базовых цветовых координат Red (красный), Green (зеленый), Blue (синий).

Цвет несамосветящихся объектов получается в результате отражения светового потока некоторого внешнего источника или источников. Он формируется как сумма непоглощенных составляющих потока. Корректное описание этого цветового феномена дает так называемая субтрактивная цветовая модель CMY. Ее название образовано по первым буквам цветовых координат Cyan (голубой), Magenta (пурпурный), Yellow (желтый).

На рис. 2, а цветной вклейки показаны результаты смешения цветов в аддитивной модели для трех самосветящихся площадок чистых цветов (красного, зеленого и синего). На рис. 2, б представлены результаты смешения цветов в субтрактивной модели для трех несамосветящихся площадок чистых цветов (голубого, пурпурного и желтого).

Приведем основные правила сложения цветовых координат, которые описывается восемью простыми формулами:

- 1) желтый = красный + зеленый;
- 2) белый = красный + зеленый + синий;
- 3) пурпурный = красный + синий;
- 4) голубой = синий + зеленый;
- 5) красный = желтый + пурпурный;
- 6) зеленый = желтый + голубой;
- 7) черный = желтый + пурпурный + голубой;
- 8) синий = пурпурный + голубой.

Цвета одной модели являются дополнительными к цветам другой модели. Дополнительным называется цвет, который в сумме с данным дает чистый белый. Дополнительным для красного служит голубой, поскольку голубой получается смешением зеленого и синего. Дополнительным для зеленого является пурпурный (пурпурный = красный + синий), для синего — желтый (желтый = красный + зеленый).

Примеры формирования основных оттенков в субтрактивной модели показаны на рис. 3 цветной вклейки. Так, при освещении падающим белым светом в слое голубой краски из спектра белого цвета поглощается красная часть, затем из оставшегося света в слое пурпурной краски поглощается зеленая часть спектра. Отраженный от поверхности бумаги свет еще раз подвергается поглощению, и в результате мы видим синий цвет.

1.4.2. Модель RGB

Модель RGB (Red, Green, Blue — красный, зеленый, синий) — аддитивная аппаратно-зависимая модель, применяемая для описания цвета компьютерных мониторов, телевизионных экранов, дисплеев портативных цифровых устройств и телефонов.

Модель RGB — одна из первых цветовых моделей, ее появление датируется началом прошлого века — временем рождения первых устройств цветного телевидения. Можно привести множество аргументов в защиту ее состоятельности. Достаточно упомянуть классические опыты физиков XVIII в., которые доказали разложимость любого видимого света на три цветовые составляющие.

Цветовое пространство модели RGB можно представить в виде куба в декартовой системе координат (рис. 1.7). Каждый цвет в этом кубе задается точкой и определяется как сумма трех цветовых координат (основных цветов) красного, зеленого и синего. Главная диагональ куба с равными количествами каждого основного цвета представляет ахроматические (серые) цвета: черному цвету соответствует точка $(0, 0, 0)$, а белому — точка $(1, 1, 1)$. Нулевое значение соответствует отсутствию светимости цветовой координаты, единичное значение описывает ее максимальную интенсивность. Так, белый цвет дает смешение трех цветовых координат предельной силы.

Модель RGB — простая цветовая система, правила синтеза которой полностью согласуются с интуицией человека. Она отличается широким цветовым охватом и корректно описывает механизмы генерации цвета в приборах, излучающих свет. Эта модель имеет ряд недостатков, ограничивающих ее применение. Она не способна воспроизводить весь видимый человеком спектр. Сочетание цветов синий + зеленый дает только приближение для чистого голубого, а комбинация зеленый + красный продуцирует приблизительный аналог чистого желтого. На рис. 1.8 представлены зависимости интенсивностей цветовых координат R, G, B от длины волны света видимой части спектра. Как видно на приведенных графиках, некоторые из цветовых координат могут быть меньше нуля. Это означает, что в модели представлены не все цвета, которые способен воспринять глаз человека. Однако во многих случаях цветовая модель RGB дает

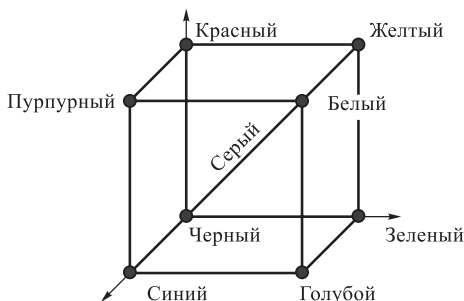


Рис. 1.7. Цветовой куб модели RGB

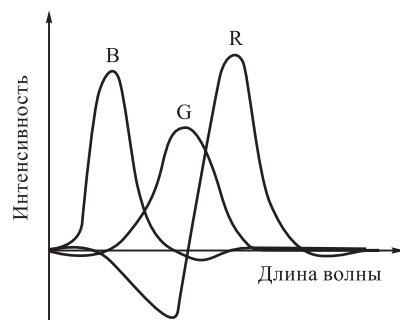


Рис. 1.8. Спектральные кривые для модели RGB

вполне удовлетворительные объяснения цветовых феноменов, что и объясняет ее широкое распространение в системах автоматизированного проектирования и графических пакетах.

1.4.3. Модели СМУ и СМУК

При обсуждении модели RGB речь шла в основном об источниках света. Большинство окружающих нас объектов источниками не являются. Они не излучают, а поглощают и отражают падающий свет в разных пропорциях.

Как возникает цветность подобных объектов? Все пассивные объекты мы видим в отраженном цвете. Если яблоко имеет красный цвет, то это значит, что оно отражает длинные волны и поглощает короткие. Почему некоторый предмет окрашен в синий цвет? Это происходит потому, что он поглощает красную и зеленую составляющие и отражает только синюю. Как при отражении получается голубой цвет? Голубой представляет собой смешение синего и зеленого цветов. Следовательно, поверхность голубого цвета отражает синий и зеленый цвета, а значит, поглощает красную составляющую. Пурпурный краситель поглощает зеленый и отражает красный и синий. Если смешать голубой краситель и пурпурный, то цвет такой краски уже можно предсказать. Пурпурная составляющая поглотит зеленую, голубая — красную, остается только синяя компонента, поэтому результирующий цвет будет синим.

Для описания таких явлений используется цветовая модель, которая объясняет порождение цветов не как результат сложения, а как результат вычитания базовых цветов. Схемы, показанные на рис. 3 цветной вклейки, демонстрируют поведение световых волн различной длины на примере бумажного листа с нанесенными красителями. Смешивая попарно пурпурный, желтый и голубой красители, можно получить в отраженном свете оттенки основных цветов красного, зеленого и синего. Сочетания основных цветов позволяют синтезировать множество производных цветов, поэтому пурпурный, желтый и голубой могут быть приняты в качестве базиса субтрактивной (вычитательной) цветовой модели.

Модель СМУ (Cyan, Magenta, Yellow — голубой, пурпурный, желтый) — аппаратно-ориентированная модель, используемая в полиграфии для субтрактивного формирования оттенков, основанного на поглощении слоем краски части падающего светового потока. Цветовые координаты модели СМУ являются дополнительными к координатам RGB, т. е. сложение каждой дополнительной пары дает чистый белый. Поэтому модель СМУ можно представить в виде куба, начало отсчета которого находится в точке с координатами RGB, равными (1, 1, 1). Эта точка соответствует белому цвету. Цветовой куб модели СМУ показан на рис. 1.9.

Координаты одного цвета в моделях RGB и СМУ — взаимно зависящие величины, соотношение между ними задается простой формулой

$$[R, G, B] = [1, 1, 1] - [C, M, Y],$$

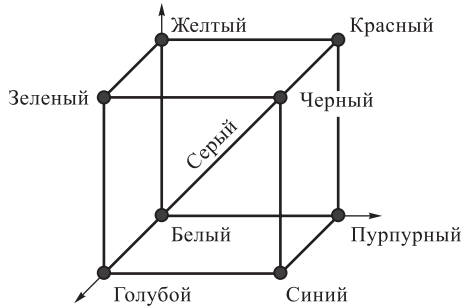


Рис. 1.9. Цветовой куб модели CMY

где единичный вектор $[1, 1, 1]$ в модели RGB — это представление белого цвета, а в модели CMY — черного.

Описанное соответствие координат справедливо только для нормализованных пространств, где значения RGB и CMY задаются в безразмерных величинах. В графических пакетах и CAD-системах эти значения могут рассчитываться по разным шкалам. Например, во многих программах растровой графики координаты CMY задаются в процентах, а RGB — в числах (от 0 до 255). В подобных случаях формулы пересчета принимают более сложный вид.

Таким образом, модель CMY представляет собой некоторое дополнение модели RGB, при нулевых значениях составляющих (отсутствии краски) образуется белый цвет. Смешение равных значений трех компонентов дает оттенки серого. При смешении максимальных значений трех составляющих (Cyan + Magenta + Yellow) должен получиться черный цвет.

Если нанести на белый лист бумаги красители пурпурного, желтого и голубого цветов, то они поглотят все три составляющие падающего света и такой лист должен выглядеть черным. В это теоретически правильное заключение практика вносит свои поправки. Существующие красители по своим химическим свойствам далеки от идеала и часто содержат примеси. Смешение таких красителей дает не черный цвет, а грязно-коричневый темного оттенка. Свой вклад вносит и бумага, поверхность и цвет которой никогда не бывают идеальными. Для повышения качества печати применяется специальный черный краситель, позволяющий получить ровный и глубокий черный цвет. Большинство современных репродуцирующих устройств (принтеров и типографских машин) печатают в четыре краски, и только самые дешевые струйные принтеры, сегодня практически вышедшие из употребления, используют только три краски.

Модель CMY с дополнительной черной составляющей называется моделью CMYK. Черный цвет (Black) представлен в названии последней буквой для того, чтобы не путать его в сокращениях с синим (Blue). Эта система служит теоретической основой цифровой печати. Во многих графических пакетах цветовые координаты рассматриваются как красители, которые наносятся на поверхность

бумаги, поэтому интенсивность каждой координаты измеряется в процентах от 0 (отсутствие краски) до 100 (максимальная интенсивность краски).

В системе RGB световые потоки суммируются и результирующие цвета получаются яркими. В субтрактивной системе световые потоки вычитаются, производя более темные и менее насыщенные оттенки. Этим объясняется тот эффект, когда яркие и живые цвета картинки, представленной на экране монитора, часто становятся выцветшими и тусклыми после вывода на печать.

Если учитывать только номенклатуру технических устройств, то окажется, что модель CMYK менее распространена, чем модель RGB. Только печатные машины и некоторые типы принтеров высокого класса используют эту модель напрямую. Традиционно в этом ряду упоминают еще и барабанные сканеры, но внутренние сенсоры подобных устройств работают в системе RGB, а считанная с оригинала информация потом преобразуется в CMYK программным или аппаратным способом.

1.4.4. Модели YUV и YIQ

YUV и YIQ — аппаратно-ориентированные модели, используемые в телевидении и позволяющие сократить передаваемую полосу частот за счет использования психофизиологических особенностей зрения в коротковолновой области. Это модифицированные системы RGB, приспособленные для нужд телевидения.

В моделях YUV и YIQ телевизионный сигнал кодируется посредством трех координат: Y — сигнал яркости, одинаковый во всех моделях, и два сигнала, определяющих цвет пикселя — (U и V) или (I и Q), являющиеся цветоразностными сигналами. При этом зеленый цвет (G), принятый за базовый, отсутствует в составе телевизионного сигнала и восстанавливается в телевизионном приемнике вместе с красным (R) и синим (B) цветом на основе принятых сигналов. Эти модели позволяют принимать сигналы не только цветного, но и черно-белого телевидения.

В Европе телевидение основывается на модели YUV и использует два способа кодирования сигналов модели — системы PAL и SECAM. Приведем простые правила расчета координат этой модели по значениям RGB:

- модель YUV системы SECAM

$$\begin{aligned} Y &= 0,299 \times R + 0,587 \times G + 0,114 \times B, \\ U &= 1,5(B - Y), \\ V &= -1,9(R - Y); \end{aligned}$$

- модель YUV системы PAL

$$\begin{aligned} Y &= 0,299 \times R + 0,587 \times G + 0,114 \times B, \\ U &= 1,493(B - Y), \\ V &= -1,877(R - Y). \end{aligned}$$

В США, Канаде и Японии для передачи цветного телевидения используется система NTSC. Модель описания цветов в этой системе называется YIQ.

Координаты модели YIQ в системе NTSC рассчитываются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} Y &= 0,299 \times R + 0,587 \times G + 0,114 \times B; \\ I &= -1,74(R - Y) - 0,27(B - Y); \\ Q &= 1,48(R - Y) + 0,41(B - Y). \end{aligned}$$

Для полноцветного изображения компонент Y, называемый сигналом яркости (luminance), принимает значения между минимальным и максимальным уровнями сигналов R, G, B.

1.4.5. Модель CIE XYZ

В 1931 г. Международный комитет CIE утвердил несколько стандартных цветовых пространств, описывающих видимый спектр. При помощи этих моделей можно сравнивать между собой цветовые пространства отдельных наблюдателей и устройств на основе единых стандартов.

В предложенных Комитетом трехкомпонентных моделях для определения цвета используются три независимые цветовые координаты. Модели CIE обладают свойством аппаратной независимости и широким цветовым охватом. Диапазон цветов, которые можно определить в этих системах, не ограничивается изобразительными возможностями технического устройства или визуальным опытом определенного наблюдателя.

За основное цветовое пространство, разработанное в CIE, принято пространство XYZ. Оно построено на основе восприятия цвета некоторым стандартным наблюдателем. Это гипотетический персонаж с усредненными зрительными характеристиками, созданными по результатам многочисленных экспериментов с реальными наблюдателями. Приведем упрощенную схему испытаний.

Три монохроматических источника света направляются на белый экран таким образом, что их цвет смешивается. Испытуемые с пультом в руках располагаются перед экраном. В их распоряжении предоставляются три ручки, управляющие яркостью этих источников света. На другой стороне экрана воспроизводится эталонная точка некоторого заданного цвета. Задача испытуемых состоит в том, чтобы меняя яркости управляемых источников света, сделать цвет контрольной точки совпадающим с эталонной.

Интенсивность источников света принимает значения в диапазоне от -1 до 1. При интенсивности источника света, равном 1, лампа источника работала на полную мощность. Нулевое значение соответствовало выключению источника. В положении меньше нуля свет источника «вычитался» из результирующего. Это достигалось путем увеличения соответствующего компонента яркости эталонной точки. Результаты разных испытаний немного отличались друг от друга, но усредненные показатели на удивление точно совпали с пиками чувствительности разных типов колбочек. Они и были приняты за показатели гипотетического стандартного наблюдателя.

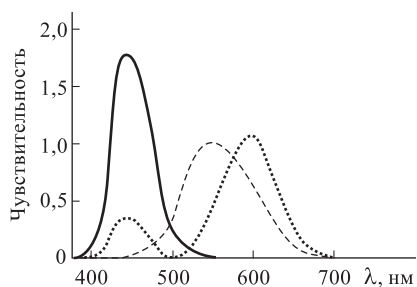


Рис. 1.10. Функции чувствительности системы CIE XYZ:
 — — Z; - - - - Y; ····· X

По результатам проведенных испытаний были синтезированы три искусственные функции реакции глаза, зависящие от длины волны света и построенные таким образом, чтобы упростить ручные расчеты (рис. 1.10). Эти зависимости представляют собой математические абстракции, поскольку не существует естественных источников света с подобными характеристиками излучения. Отметим три особенности этих зависимостей. Во-первых, все они принимают только положительные значения; во-вторых, функция z равна нулю для большей части волн видимого спектра; в-третьих, по значениям функции y можно рассчитать яркость измеряемого цвета.

На основе функций чувствительности по простым зависимостям рассчитываются абстрактные цвета CIE, обозначаемые X, Y, Z . Пространство, задаваемое этими цветами, достаточно мощное — оно включает в себя весь спектр видимых глазом цветов. Координаты цветности CIE (x, y, z) задаются следующими соотношениями:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}; \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}; \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z}; \quad x + y + z = 1.$$

Работать с трехмерным цветовым пространством часто бывает неудобно, кроме того, во многих случаях целесообразно разделить хроматические и яркостные значения. При проецировании пространства XYZ на плоскость (x, y) получаем фигуру, которая называется хроматической диаграммой CIE (рис. 4 цветной вклейки). У этой диаграммы координаты x и y — относительные количества трех основных цветов XYZ, требуемых для составления нужного цвета. Яркость определяется величиной Y , а x и y задают цветность элемента цветового пространства. Таким образом, триада (x, y, Y) полностью определяет цвет. Обратное преобразование можно выполнить по формулам

$$X = x \frac{Y}{y}; \quad Y = Y; \quad Z = (1 - x - y) \frac{Y}{y}.$$

Хроматическая диаграмма весьма содержательна и заслуживает более подробного обсуждения. Каждый цветовой оттенок видимого спектра независимо от яркости изображается на диаграмме точкой. Метамерам — цветам, выглядящим одинаково, но имеющим разные описания, — соответствует одна точка диаграммы. Диаграмма наглядно показывает результаты сложения двух цветов. Для этого надо найти точки, соответствующие слагаемым цветам, и соединить

их прямой линией. Любая смесь выбранных компонентов лежит на этой прямой. Смесь трех цветов располагается внутри треугольника, построенного на хроматических координатах этих цветов.

Геометрическим местом чистых хроматических тонов служит линия, которая называется спектральной кривой (спектральным годографом). Все видимые цвета располагаются внутри фигуры, ограниченной спектральной кривой и линией пурпурных цветов. Чем ближе цвет к спектральной кривой, тем он чище и насыщеннее.

Точка, расположенная почти в самой середине диаграммы, описывает эталонный белый цвет. Если соединить эту точку с точкой на спектральной кривой, то получим геометрическое место точек, задающее цвета с одинаковым оттенком. Чем ближе цвет к спектральной кривой, тем большей чистотой он обладает. Хроматическая диаграмма дает точное описание колориметрического термина «чистота» — длина радиус-вектора с центром в белой точке. Светло-серые тона лежат в окрестности центра диаграммы, который представляет эталонный белый цвет.

В диапазоне между пурпурными и красными тонами зрение человека более чувствительно к небольшим изменениям цвета, чем в диапазоне между зелеными и желтыми тонами. Диаграмма отражает этот световой феномен. Ее часть, окрашенная преимущественно в желтые и зеленые тона, отличается более вытянутой формой. В белой, красной и пурпурной областях она более плотная.

1.4.6. Модели CIE Luv и CIE Lab

Несмотря на информативность и наглядность, хроматическая диаграмма CIE XYZ не может претендовать на статус универсальной цветовой модели. Она не обладает свойством перцепционной равномерности — расстояние между некоторыми ее точками непропорционально разности зрительного восприятия соответствующих цветов. Например, две точки в красной (нижней правой) части диаграммы, удаленные друг от друга на 0,1, воспринимаются наблюдателем как значительно различающиеся цвета. Тогда как две такие точки в зеленой (верхняя левая) части диаграммы представляют очень похожие цвета.

Предпринимались многочисленные попытки исправления этого недостатка, самые известные из них – модели CIE Luv и CIE Lab. Первая была предпринята в 1976 г. — модификация системы CIE XYZ, приспособленная к более равномерному восприятию цвета. Она строится на координатах u и v , которые рассчитываются по формулам

$$u = \frac{4x}{x+15y+3z}, \quad v = \frac{9x}{x+15y+3z}.$$

Хроматическая диаграмма модели CIE Luv, показанная на рис. 5 цветной вклейки, сохраняет структурные особенности диаграммы CIE XYZ: спектральную кривую, распределение ахроматических тонов и линию пурпурных цветов.

Модель CIE Lab (LAB) представляет собой нелинейное преобразование цветового пространства XYZ. Любой цвет в модели определяется значением яркости L (Lightness) и двумя хроматическими координатами a и b , которые рассчитываются на основе аргументов XYZ по громоздким иррациональным зависимостям. Проще говоря, L — это яркость, координата a принимает значения цветового круга от зеленого до красного, координата b — от голубого до желтого (рис. 6 цветной вклейки).

В природе не существует излучателей, которые могли бы воспроизвести диапазон цветовых значений хроматических координат a и b , поэтому модель применяется в теоретических исследованиях при обмене информацией о цвете и для синтеза цвета в компьютерных программах. Внутреннее описание цветов в Photoshop и в некоторых других программах обработки графики выполняется в системе Lab. Основным достоинством модели CIE Lab следует считать широкий цветовой диапазон. Ее хроматическая диаграмма позволяет определить цветовой охват любого устройства или модели, работающей по принципу сложения цветов. Внутри диаграммы Lab располагаются графики охватов любых моделей и устройств, основанных на принципе вычитания цветов: печатающих машин, принтеров и др. Система позволяет описать такие цвета и оттенки, которые недоступны ни для одной из прочих моделей. Например, яркий оранжевый, металлический блеск или даже ультранасыщенные тона, которые не способны дать природные красители и излучатели.

Для пользователей графических пакетов система Lab может показаться поначалу неудобной, поскольку она не согласуется с интуитивными представлениями о правилах синтеза цвета, существующих у каждого пользователя. Сильно упрощая ситуацию, ее можно сравнить с двухканальной моделью RGB с перевернутым каналом яркости. Смещение координат a и b дает новый цвет высокой интенсивности, для настройки его яркости следует воспользоваться третьей координатой L .

Обе модели (Lab и Luv) отличаются высокой перцептивной равномерностью. Их метрики различаются способами расчета, но в обеих системах близкие точки соответствуют сходным хроматическим оттенкам. Модель Lab доминирует в области промышленной печати и при генерации цвета в различных отраслях промышленности. Модель Luv преобладает в телевидении и киноиндустрии.

1.4.7. Интуитивные цветовые модели

Интуитивные цветовые модели базируются на предположении, что цвет может быть описан единственной монохроматической волной — цветовым тоном с заданием насыщенности и светлоты.

Набор из трех параметров — цветовой тон, насыщенность и светлота, или интенсивность (освещенность), — наглядно показывает, что видимый цвет трехмерен. Эти параметры можно интерпретировать как три координаты, с помощью которых можно графически представлять положение видимого цвета в

цветовом пространстве. В начале XX в. художник Мансел (A.H. Munsell), создатель цветковых таблиц, впервые дал интуитивное описание трехмерного цветового пространства. Сегодня на базе идей Мансела построено достаточно много цветковых пространств различных типов. Самой распространенной из них является модель HSB (рис. 7 цветной вклейки). Она была разработана как попытка преодолеть аппаратную зависимость модели RGB. В модели HSB все цвета определяются тремя координатами: оттенком (Hue), насыщенностью (Saturation) и яркостью (Brightness). Название модели образовано по первым буквам английских названий цветковых координат.

Цветовым тоном, или оттенком (Hue), называется спектрально-чистый цвет определенной длины волны, например чистый красный или чистый зеленый. Цветовой тон — объективная характеристика, поскольку ее можно измерить по длинам преобладающих в световом пучке волн.

Яркость характеризует интенсивность, энергию цвета. Изменение яркости можно представить как смешение чистого тона и черного цвета. Большое содержание черного делает цвет затененным, неинтенсивным. С уменьшением процента черного освещенность увеличивается. Солнечный луч обладает высокой яркостью света, свечение, исходящее от светлячка — очень низкой яркостью. Черный цвет имеет нулевую яркость, а белый — предельную.

Насыщенность (Saturation) описывает чистоту цвета. Один и тот же тон может быть тусклым или насыщенным. Изменение насыщенности можно представить как разбавление чистого цвета белым или серым. Чем больше содержание белого, тем более блеклым становится цвет. Все цвета естественного происхождения имеют низкую насыщенность, поэтому чистые тона выглядят слишком яркими, ненатуральными.

Кроме модели HSB существует несколько моделей, в которых яркостная и цветовая характеристики рассматриваются отдельно, например HSI, HLS. Во всех этих моделях цвет задается не как смешение трех цветов, а по значениям цветового тона, насыщенности и интенсивности. В модели HSI используется тон (Hue), насыщенность (Saturation) и интенсивность (Intensity), в модели HLS — тон (Hue), насыщенность (Saturation) и светлота (Lightness).

Для описания модели HSB удобно воспользоваться геометрической аналогией. Пусть цвета видимого спектра располагаются по кругу, как цифры на циферблате часов. Каждому оттенку соответствует точка на окружности. Чтобы указать положение спектрального цвета, достаточно задать угол поворота радиуса-вектора. В большинстве графических программ принято начинать отсчет от красного цвета и располагать основные и дополнительные цвета с приращением в 60° (см. рис. 7 цветной вклейки). Величина насыщенности описывается как длина радиуса-вектора. Чем менее насыщенным является цвет, тем ближе к центру окружности располагается представляющая его точка. Центр круга соответствует черному цвету. Обычно насыщенность измеряется в процентах: минимальная насыщенность равна 0, максимальная — 100. Чтобы учесть в модели яркость, надо добавить третью координату. Все цветовое пространство системы HSB можно

представить в виде стопки цветовых кругов, каждый из которых соответствует своему значению яркости. Яркость в большинстве графических программ изменяют в процентах в диапазоне от 0 (минимальная) до 100 (максимальная).

Система HSB очень удобна для пользователя. В ней можно синтезировать новые цвета и получать различные варианты заданного цвета, опираясь на интуицию. Например, известно, что чистый синий цвет лежит на цветовом круге под углом 240° . Если требуется сместить тон в сторону пурпурного оттенка, то для этого достаточно увеличить угол поворота. Цвет кажется слишком насыщенным? Решение известно. Надо сместить точку в радиальном направлении ближе к центру. Велика яркость? Уменьшаем соответствующую координату. Подобную стратегию синтеза цвета невозможно реализовать в системе RGB, поскольку трудно предвидеть последствия даже небольших изменений цветовых координат. Еще одним несомненным достоинством системы HSB является ее независимость от аппаратуры. Примерно такую оценку могли бы дать этой системе пользователи и разработчики компьютерных программ.

Мнения физиков и инженеров-оптиков по поводу этой системы, видимо, будут отличаться от приведенных оценок. Система HSB является абстрактной. Это значит, что нет таких устройств, которые синтезируют цвет в этой системе. Не существует и прямой процедуры измерения цветового тона и насыщенности. В любом методе ввода информации о цвете сначала измеряются красная, синяя и зеленая составляющие, которые потом пересчитываются в координаты HSB. Поскольку при вводе и выводе цвета система HSB привязана к системе RGB, то ее аппаратная независимость является во многом умозрительным тезисом и не имеет большого практического значения.

1.4.8. Цветовой круг

Цветовой круг — описание системы HSB, которое используется как мнемоническая фигура для упрощения ориентации в цветовом пространстве. У полиграфистов и оптиков он играет роль своеобразного навигационного прибора, без которого часто бывает сложно принять верное решение о способе синтеза искомого цвета.

На цветовом круге (рис. 8 цветной вклейки) на равном расстоянии друг от друга расположены первичные и вторичные цвета. Каждый вторичный (первичный) цвет находится между двумя первичными (вторичными). Сложение двух основных цветов дает дополнительный цвет, расположенный между ними. Например, смешивая зеленый и синий, получаем голубой. При смешении двух дополнительных цветов получаем основной цвет, лежащий между ними. Так, смесь желтого и пурпурного образует красный.

Пары цветов, расположенные на круге под углом 180° , называются комплементарными, или дополнительными. Таковыми являются зеленый и пурпурный, голубой и красный, синий и желтый. Добавление любой краски цветового круга компенсирует дополнительную краску, как бы разбавляет ее в результирующем цвете. Например, чтобы изменить цветовое соотношение в сторону зеленых то-