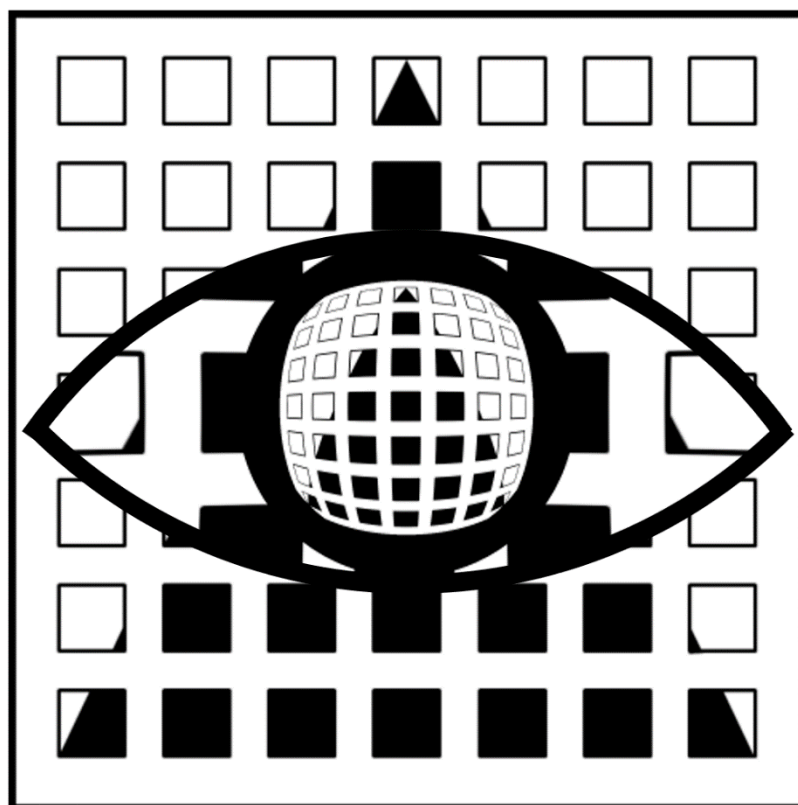


ІТМО

Д.Д. Жданов, И.С. Потемин, А.Д. Жданов

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ОПТИКИ



Санкт-Петербург
2023

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Д.Д. Жданов, И.С. Потемин, А.Д. Жданов
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКИ
И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ОПТИКИ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ
ИТМО

по направлению подготовки 09.04.04 "Системное и прикладное
программное обеспечение"

в качестве Учебно-методического пособия для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования
магистратуры

ИТМО

Санкт-Петербург
2023

Жданов Д.Д., Потемин И.С., Жданов А.Д., Теоретические основы компьютерной графики и вычислительной оптики – СПб: Университет ИТМО, 2023. – 190 с.

Рецензент(ы):

Сорокин Максим Игоревич, кандидат технических наук, , заведующий лабораторией факультета программной инженерии и компьютерной техники, Университета ИТМО.

Учебно-методическое пособие посвящено решению ряда задач синтеза изображений моделей трехмерных объектов. Представлены пять основных разделов, касающиеся определения основных радиометрических и фотометрических величин и соотношений между ними, расчета излучения точки поверхности на базе различных моделей освещения, методов описания и коррекции цвета в компьютере, методов получения, хранения и визуализации изображений с широким динамическим диапазоном, а также расчета цвета пиксела цифрового изображения. Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки магистрантов 09.04.04 "Системное и прикладное программное обеспечение".

The logo of ITMO University, consisting of the letters 'ITMO' in a bold, black, sans-serif font. The 'I' and 'T' are connected, and the 'O' is a solid circle.

Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2023
© Жданов Д.Д., Потемин И.С., Жданов А.Д., 2023

Содержание

1.	Введение.....	6
2.	Свет как энергия. Радиометрия и фотометрия.....	10
2.1.	Свет и цвет.....	10
2.2.	Свет и его спектральное распределение.....	10
2.2.1.	Спектральное распределение.....	11
2.3.	Геометрическая оптика.....	13
2.4.	Распространение света.....	15
2.5.	Радиометрия.....	17
2.5.1.	Основные термины и определения.....	18
2.5.2.	Поток лучистой энергии (Radiant flux).....	18
2.5.3.	Сила излучения (Radiant Intensity).....	21
2.5.4.	Освещённость и светимость.....	24
2.5.5.	Яркость (Radiance).....	26
2.5.6.	Связь яркости с другими радиометрическими величинами.....	30
2.5.7.	Свойства ламбертовских источников.....	32
2.6.	Фотометрия.....	34
2.7.	Вопросы для самоконтроля усвоенных знаний.....	36
3.	Взаимодействие света и материала.....	37
3.1.	Типы взаимодействия света и материала.....	37
3.2.	ДФО, ДФП, ДФР.....	38
3.3.	Расчет излучения точки поверхности: уравнение рендеринга.....	40
3.4.	Модели освещения.....	42
3.4.1.	Требования к моделям освещения.....	42
3.4.2.	Физически обоснованные и эмпирические модели.....	45
3.4.3.	Прямое и вторичное освещение.....	45
3.4.4.	Локальные и глобальные модели освещения.....	46
3.4.5.	Примеры моделей освещения.....	47
3.5.	Вопросы для самоконтроля усвоенных знаний.....	56
4.	Цвет. Цветовые пространства. Гамма-коррекция.....	57
4.1.	Цвет.....	57
4.1.1.	Цветность и яркость. Задача описания цвета в компьютере.....	57
4.1.2.	Структура и функционирование человеческого глаза.....	57

4.1.3.	Трихроматическая теория	60
4.1.4.	Эксперименты по воспринимаемому соответствию цветов.....	61
4.2.	Закон аддитивности Грассмана.....	64
4.3.	Цветовые пространства.....	67
4.3.1.	Цветовое пространство CIE RGB	67
4.3.2.	Переход между цветовыми пространствами.....	67
4.3.3.	Цветовое пространство CIE XYZ 1931. Диаграмма цветности.....	68
4.3.4.	Спецификация цветовых пространств. Точка белого.	73
4.3.5.	Цветовые профили RGB.....	76
4.3.6.	Отображение передаваемого диапазона (gamut mapping)	80
4.3.7.	Однородные цветовые пространства	81
4.3.8.	Интуитивные цветовые пространства.....	84
4.3.9.	Цветовое пространство CIECAM02. Хроматическая адаптация.	86
4.3.10.	Ограничения трихроматических пространств	88
4.4.	Гамма-коррекция	89
4.4.1.	Вспомогательные определения.....	90
4.4.2.	Линейность кодирования яркости в изображениях.....	92
4.4.3.	Тракт передачи изображений.....	94
4.4.4.	Передающая функция	95
4.4.5.	Нелинейность передающей функции дисплея.....	96
4.4.6.	Кодирование яркости.....	99
4.4.7.	Использование гаммы для моделирования процессов адаптации ...	104
4.4.8.	Использование гамма-коррекции в приложениях	105
4.4.9.	Калибровка монитора	110
4.5.	Вопросы для самоконтроля усвоенных знаний.....	112
5.	Изображения широкого динамического диапазона.....	113
5.1.	Введение	113
5.1.1.	Геометрическое разрешение дисплея.....	114
5.1.2.	Цветовое разрешение дисплея	115
5.1.3.	Статический и динамический диапазон устройств	116
5.1.4.	LDR и HDR	118
5.2.	Получение изображений широкого динамического диапазона	120
5.2.1.	Получение HDR-изображения из набора LDR-изображений	121

5.2.2.	Выбор весовой функции.....	125
5.2.3.	Восстановление кривой отклика камеры.....	127
5.3.	Хранение HDR-изображений	128
5.3.1.	Способы кодирования яркости	129
5.3.2.	Форматы хранения HDR-изображений Radiance.....	132
5.4.	Визуализация HDR-изображений. Алгоритмы тональной компрессии.	137
5.4.1.	Классификация операторов тональной компрессии	139
5.4.2.	Глобальные операторы тональной компрессии.....	142
5.4.3.	Пространственно-зависимые операторы тональной компрессии.....	146
5.4.4.	Отображение на дисплеях с широким динамическим диапазоном ..	162
5.5.	Вопросы для самоконтроля усвоенных знаний.....	163
6.	Расчёт цвета пиксела. Основы фотографической оптики.....	165
6.1.	Введение	165
6.2.	Уравнение измерений и уравнение освещенности	165
6.3.	Модель матрицы камеры	167
6.4.	Формирование изображения	172
6.5.	Камера обскура	173
6.6.	Камера с линзой.....	175
6.7.	Преломление света на сферической поверхности	176
6.8.	Преломление света в линзе.....	179
6.9.	Тонкие линзы	180
6.10.	Фокусное расстояние	181
6.11.	Формула тонкой линзы.....	182
6.12.	Формирование изображения линзой	183
6.13.	Диафрагмирование	184
6.14.	Виртуальный фотоаппарат	185
6.15.	Расчет освещенности матрицы	187
6.16.	Заключение.....	190
6.17.	Вопросы для самоконтроля усвоенных знаний.....	192
	Список использованной литературы	193

1. Введение

Компьютерная графика — совокупность методов создания и редактирования изображений с помощью компьютеров и специального программного обеспечения.

Существуют два основных направления создания цифровых изображений: для их автоматического анализа и для показа человеку. При создании изображения для компьютерного анализа не требуется показывать его на экране, достаточно создать матрицу цветовых значений и передать ее соответствующей программе. Но когда изображение создается для показа человеку, задача становится намного сложнее. Вне зависимости от конкретной цели, которая приводит к созданию изображения, основная задача — это информационная коммуникация с другим человеком. А если требуется передать человеку визуальную информацию, необходимо провести изображение через зрительную систему этого человека.

Зададимся вопросом, что нужно для того, чтобы научиться с помощью компьютера синтезировать изображения, неотличимые от реальности? Для этого необходимо создать набор цифровых моделей, которые с определенным уровнем достоверности позволяют воссоздать те же процессы, что происходят в реальности. Что же это за модели?

На самом деле, часть ответа заключена в самом вопросе, а именно в слове “неотличимые”. Похожа картинка на реальность, или нет, решают наши глаза и наш мозг. Поэтому первым и одним из ключевых элементов синтеза реалистичных изображений является понимание принципов функционирования человеческой зрительной системы. Это позволит создать модель зрительного механизма, генерирующую изображения, аналогичные тем, которые формируют наши глаза и мозг, получая информацию из реального мира. Подавая изображение на вход системы “глаза-мозг”, мы и добьемся желаемой цели — создания ощущения полной реалистичности синтезированного изображения. Заметим, что подобная задача решается в фотоаппаратах, поэтому часто удобно рассматривать процесс синтеза изображения через создание модели виртуального фотоаппарата, а не глаза.

Любая зрительная система состоит из двух частей: оптической (формирование изображения) и чувствительной (реакция на

различные уровни светового излучения). Разрабатываемая модель должна описывать эти части с необходимым уровнем достоверности.

Но это еще не все. Глаз человека реагирует на свет, пришедший из сцены. И кроме знания того, как поступающий свет преобразуется в осмысленную информацию, необходимо понять законы распространения света, его взаимодействия с материалами. Очевидно, что невозможно передать всю полноту физических законов, по которым происходит перенос световой энергии в мире, однако вместе с пониманием принципов функционирования зрительной системы вполне возможно ранжировать эти законы по важности, моделируя только ключевые и существенные эффекты. Например, зная, что основную роль в формировании ощущения глубины играют перспектива, параллакс и падающие тени, мы в первую очередь обратим внимание на эти эффекты для моделирования объемности объекта.

Модели зрительной системы и принципов распространения света не могут функционировать без приложения к модели интересующей части пространства, которая и содержит информацию о форме и материалах объектов, оптических свойствах среды и т. п. Эту геометрическую информацию невозможно полностью оцифровать, поэтому тип модели подбирается под конкретную задачу. Например, некоторые модели описывают объемы объектов (воксельные модели), другие хранят информацию только о поверхности (граничные модели). Поэтому к нашим знаниям необходимо добавить знания о различных типах моделей, их свойствах, методах получения, обработки и синтеза изображений этих моделей.

Методы синтеза изображений моделей трехмерных объектов (также называемые методами экранизации) представляют собой отдельный широкий раздел науки. Их основная цель – рассчитать цвет каждой точки финального изображения в условиях ограниченных вычислительных мощностей.

К процессу экранизации предъявляются достаточно противоречивые требования: в одних приложениях требуется максимальная точность получаемого изображения, в других можно пожертвовать качеством ради интерактивности. Поэтому решение

задачи реалистичного синтеза невозможно без знания алгоритмов экранизации. Все алгоритмы экранизации сильно зависят от используемых геометрических моделей и особенно от моделей освещения.

Итак, для того, чтобы научиться с помощью компьютера синтезировать реалистичные изображения, необходимо иметь следующие модели и алгоритмы:

- модель переноса световой энергии;
- модель функционирования зрительной системы;
- геометрическая модель сцены;
- алгоритм синтеза изображения.

Как получить реалистичное изображение заданной сцены?

Четыре шага:

- 1) Построить модель сцены (геометрия, модели источников света и материалов) и модель принимающего устройства (оптику и чувствительный элемент).
- 2) Выбрать алгоритм расчета цвета пикселей экрана (может быть сильно связан с моделью сцены, либо вообще неотделим от нее) и проделать этот расчет. На выходе – спектральное распределение энергии в каждом пикселе.
- 3) Чтобы мы могли увидеть изображение на экране монитора, необходимо уметь преобразовывать значение спектра энергий в трехканальное значение цвета от 0 до 255.
- 4) Вывести цвет на устройство вывода (может быть связано с преобразованием цветовых пространств).

Каждой из этих задач посвящена солидная часть компьютерной графики и вычислительной оптики [1 – 5].

Данное методическое пособие включает переработанные материалы из курсов научного общества GraphiCon [6], материалы по радиометрии и фотометрии из известной монографии МакКлуни [7], а также материалы по цвету и свету в компьютерной графике [8], [9].

Настоящее учебное пособие имеет теоретически характер, и для усвоения теоретических знаний каждый раздел содержит вопросы для самоконтроля, имеющие как теоретический, так и практический характер, ориентированный на применение теоретических знаний для решения практических задач.

Цель авторов – предложить читателям изложение основных концепций и методов компьютерной визуализации в расчете на самостоятельное изучение пособия в течение двух-трех месяцев. При использовании пособия в технических вузах рекомендуется приведенный материал использовать в качестве односеместрового учебного курса в рамках подготовки студентов по направлению «Программная инженерия», образовательной программе «Системное и прикладное программное обеспечение» и блоку дисциплин «Технологии компьютерной визуализации» («Теоретические основы компьютерной графики и вычислительной оптики», «Методы расчета глобальной освещенности», «Фотореалистичная визуализация трехмерных сцен»). Кроме того, настоящее пособие будет полезно при изучении дисциплин не только в областях, смежных с направлением подготовки «Программная инженерия», но и по направлениям, связанным со светотехникой, светодизайном и прикладной оптикой.

2. Свет как энергия. Радиометрия и фотометрия

2.1. Свет и цвет

Основная задача реалистичной компьютерной графики – воспроизвести на мониторе изображение модели (объекта), неотличимое от наблюдаемого глазом. В случае виртуального мира можно говорить о задаче создания изображения объекта, неотличимого от реальности (если бы объект существовал в реальности, рисунок 2.1).

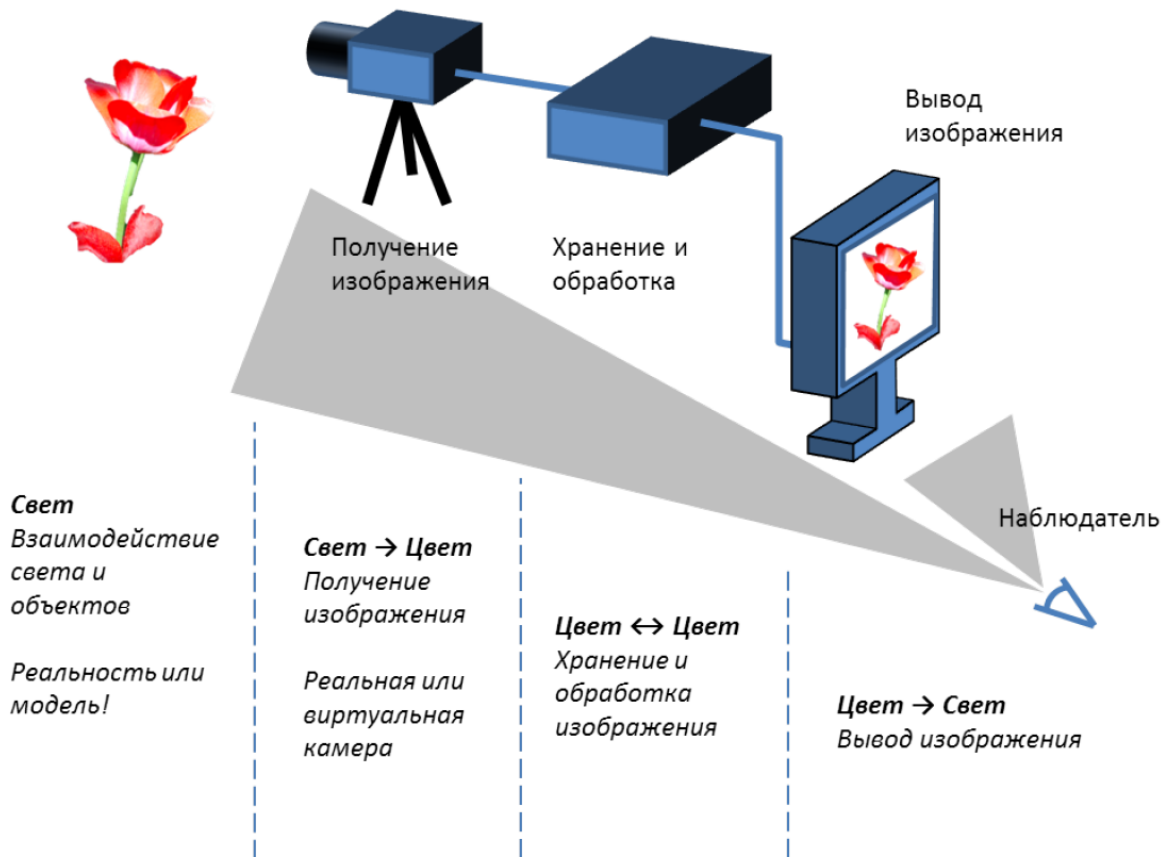


Рис. 2.1. Типичная графическая система и операции со светом и цветом

2.2. Свет и его спектральное распределение

Для определения света воспользуемся Большой Советской Энциклопедией [10]:

“

- 1) В узком смысле то же, что и видимое излучение, т. е.

электромагнитные волны в интервале частот, воспринимаемых человеческим глазом ($7,5 \cdot 10^{14}$ - $4,3 \cdot 10^{14}$ Гц, что соответствует длинам волн в вакууме от 400 до 700 нм). Свет очень высокой интенсивности глаз воспринимает в несколько более широком диапазоне частот. Зависимость чувствительности среднего человеческого глаза к свету от частоты света (спектральная чувствительность глаза) характеризуется функцией спектральной световой эффективности (т. н. кривой видности глаза). Эта функция лежит в основе всех светотехнических расчетов. Различие в частоте (или совокупности частот) световых волн в общем – но не в каждом отдельном – случае воспринимается человеком как различие в цвете...

- 2) В широком смысле – синоним оптического излучения, включающего, кроме видимого, излучение ультрафиолетовой и инфракрасной областей спектра (диапазон частот приблизительно $3 \cdot 10^{11}$ - $3 \cdot 10^{17}$ Гц, длин волн в вакууме – от 1 мм до 1 нм. В этом т. н. оптическом диапазоне физические свойства излучения и методы его исследования характеризуются значительной степенью общности (см. Оптика). В частности, именно в оптическом диапазоне начинают отчетливо проявляться одновременно и волновые и корпускулярные свойства электромагнитного излучения.

“

Как и всем электромагнитным излучениям, свету свойственен корпускулярно-волновой дуализм. Это значит, что свет, согласно классической теории, имеет волновую природу, но в то же время ведет себя подобно потоку частиц. При этом некоторые эффекты невозможно объяснить на основе корпускулярной теории. Таким образом, возможно рассмотрение света с точки зрения двух теорий: корпускулярной теории (этим занимается геометрическая оптика) и волновой теории (этим занимается волновая оптика). Причины двойственности природы света объясняет квантовая оптика.

2.2.1. Спектральное распределение

Мощность излучения распределена по электромагнитному спектру. Такое распределение называется *спектральным*

распределением или просто спектром. На рис. 2.2 показан спектр вместе с именованными зонами, соответствующими различным типам излучения. Также выделена видимая часть спектра.

Монохроматическое излучение – это излучение, имеющее только одну частоту и длину волны. Длина волны записывается как λ и измеряется в метрах или производных от метра единицах (см. таблицу 2.1). Частота записывается греческим символом ν и измеряется в циклах (периодах) в секунду. Один цикл в секунду называется 1 герц (Гц).

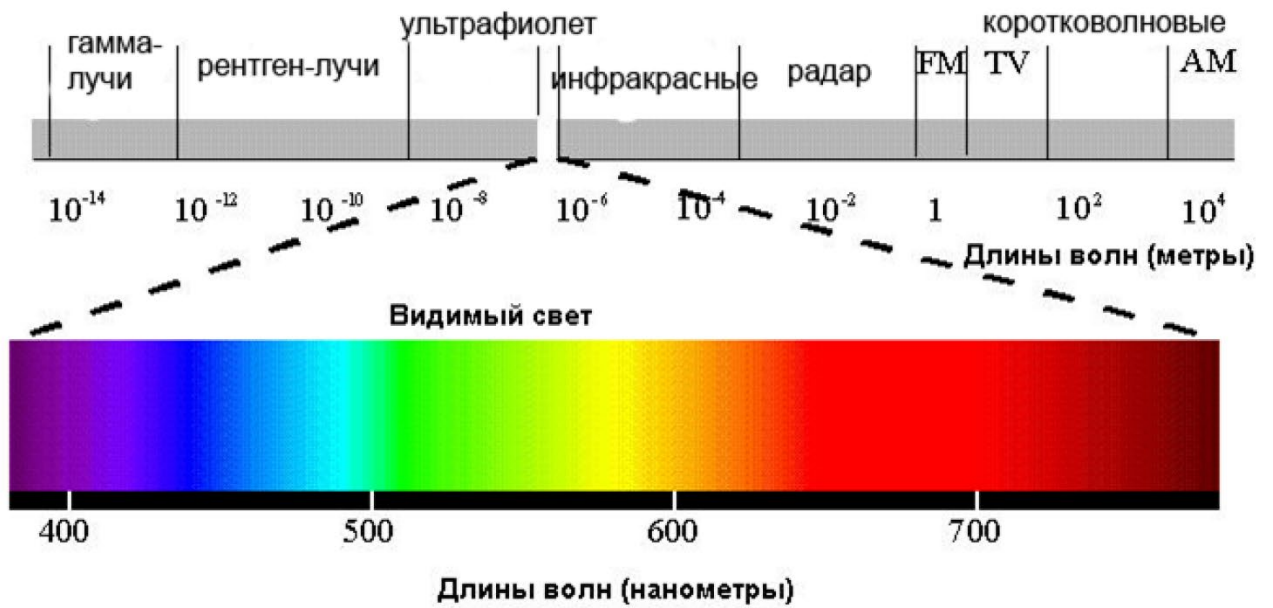


Рис. 2.2. Спектральное распределение

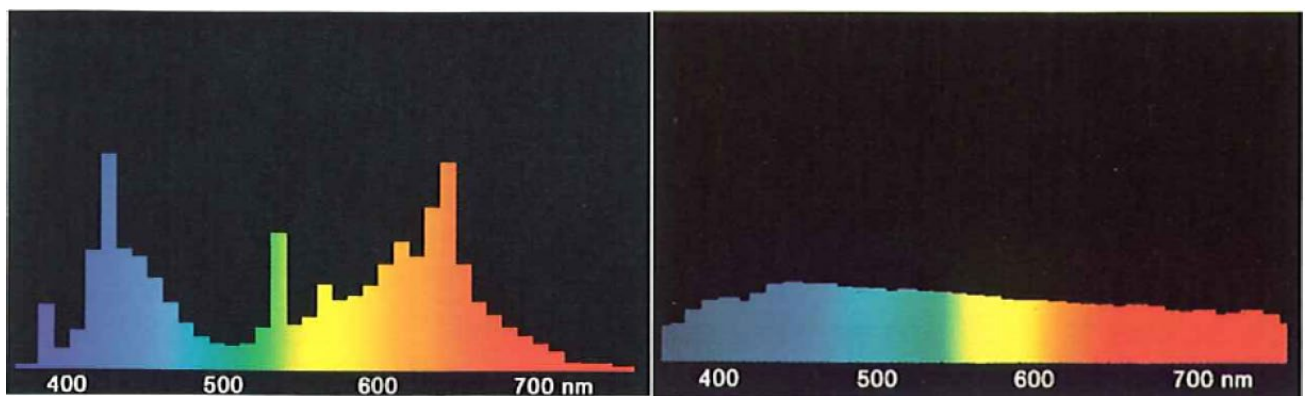


Рис. 2.3. Примеры спектральных распределений для ламп (а) (б)

пикометр	10^{-12} метра = 1 / 1000 нанометра
нанометр	10^{-9} метра = 1 / 1000 микрона

микрометр (микрон)	10^{-6} метра = 1 / 1000 миллиметра
миллиметр	10^{-3} метра = 1 / 1000 метра
метр	1 метр
километр	10^3 метра = 1000 метров

Таблица 2.1. метр и типичные производные единицы

Длина волны и частота связаны следующим выражением:

$$c = \lambda \nu \quad (2.1)$$

где c - скорость света в среде распространения (в вакууме $c = 299\,792\,458$ м/с).

Знание спектрального распределения в потоке энергии очень важно для компьютерной графики. Оптические свойства материалов, такие как отражение, пропускание и поглощение, как правило, зависят от длины волны. Следовательно, эти свойства должны моделироваться также своим спектральным распределением (например, рис. 2.3).

2.3. Геометрическая оптика

Раздел оптики, изучающий законы распространения света в прозрачных средах и принципы построения изображений при прохождении света в оптических системах без учета его волновых свойств, называется геометрической оптикой. Основное понятие геометрической оптики — это световой луч [11]. Поэтому геометрическая оптика также называют лучевой оптикой (в отличие от волновой). В этом определении подразумевается, что направление потока лучистой энергии (ход светового луча) не зависит от поперечных размеров пучка света.

В основе геометрической оптики лежат несколько простых законов:

- Закон прямолинейного распространения света
- Закон независимого распространения лучей
- Закон отражения света
- Закон преломления света (Закон Снеллиуса)
- Закон обратимости. Согласно этому закону, луч света, распространившийся по определенной траектории в

одном направлении, повторит свой ход в точности при распространении и в обратном направлении.

Мы будем в основном рассматривать свет как поток частиц (руководствуясь законами геометрической оптики), поэтому необходимо сразу понять, чего мы лишаемся, т. е. какие волновые эффекты не будут учитываться в рамках представлений геометрической оптики.

Геометрическая оптика предполагает, что направление потока энергии (луча) не зависит от поперечных размеров пучка. Однако, в силу волновой природы света имеют место эффекты дифракции и интерференции. Также геометрическая оптика не учитывает поперечного характера световой волны, поэтому в рамках геометрической оптики недоступны эффекты поляризации. Кроме этого, в других разделах науки рассматриваются квантовые эффекты, возникающие при взаимодействии световых полей с веществом (нелинейная оптика).

Ниже представлено краткое описание основных эффектов или явлений, которые не учитываются в рамках геометрической оптики.

Дифракция – явление отклонения от законов геометрической оптики, возникающее при сравнимых размерах длины волны и размерах неоднородностей среды. При размерах неоднородностей, существенно превышающих длину волны (на 3-4 порядка и более), явлением дифракции, как правило, можно пренебречь.

Интерференция – взаимное усиление или ослабление амплитуды двух или нескольких когерентных волн, одновременно распространяющихся в пространстве, сопровождается чередованием максимумов и минимумов интенсивности.

Поляризация – явление нарушения симметрии распределения возмущений в поперечной волне (например, напряженностей электрического и магнитного полей в электромагнитных волнах) относительно направления ее распространения.

Флюоресценция и фосфоресценция являются частным случаем люминесценции – нетеплового свечения вещества, происходящего после поглощения им энергии. Разница между ними

в интенсивности и времени излучения энергии. Флюоресцирующие материалы излучают в течение крайне короткого времени, тогда как фосфоресцирующие – более низкой интенсивностью и в течение длительного времени (до нескольких часов).

2.4. Распространение света

Рассмотрим типичный пример распространения света от источника к приемнику (Рис.2.4) в рамках геометрической оптики. В качестве приемника выступает элемент матрицы цифровой камеры или чувствительная клетка сетчатки глаза.

Источник света излучает движущиеся частицы, причём мы будем считать, что каждая частица представляет собой излучение на некоторой длине волны. Причины излучения могут быть разными. При тепловом нагреве излучение происходит из-за ускорения колебаний частиц в источнике света, и его температура прямо влияет на спектр излучения. Если температура достаточно высока для излучения в видимом диапазоне, мы видим источник света. Есть и другие причины излучения в видимом диапазоне. Источник света создает *поток излучения*.

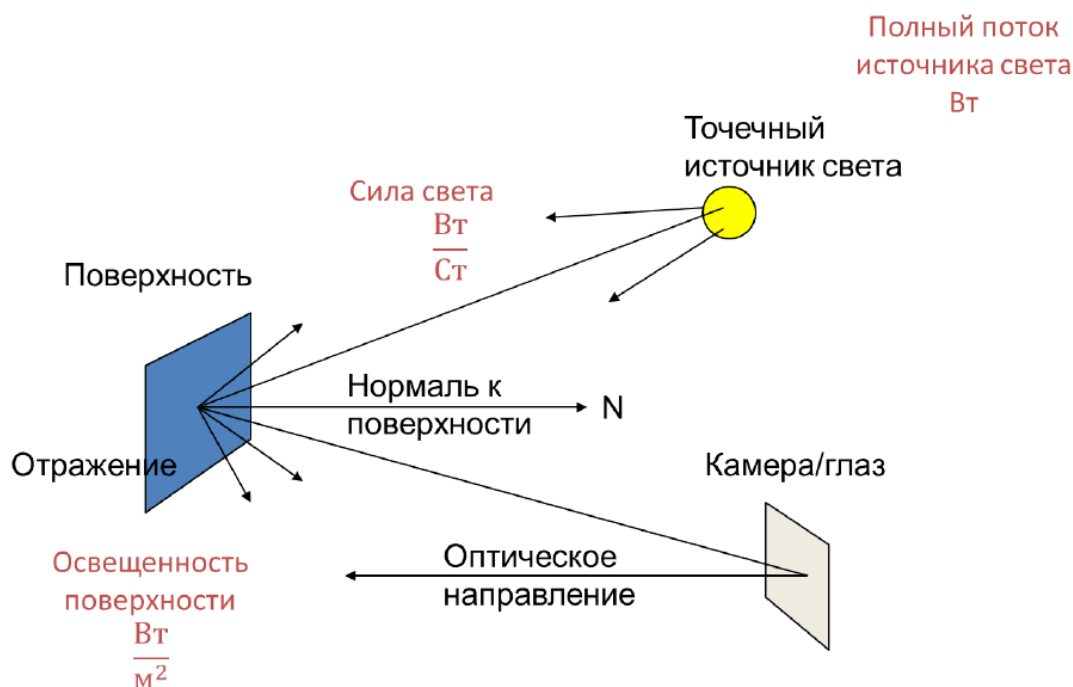


Рис. 2.4. Пример распространения света

Поток, попадая на поверхность, взаимодействует с ней.

Некоторые частицы поглощаются объектом, вызывая его нагрев, другие отражаются, третьи проходят через поверхность и продолжают свое движение (в случае прозрачного объекта). Характеристики поверхности объекта задают распределение отраженных частиц в пространстве. Например, для зеркальных объектов подавляющая часть частиц отражается под углом, равным углу падения и в плоскости, задаваемой вектором нормали поверхности и направлением на источник света. Кроме этого, для разных длин волн характеристики поглощения, преломления и отражения могут быть разными. Поэтому объект может казаться цветным при освещении белым светом. Причина в том, что одна часть спектра поглощается сильнее, чем другая.

Взаимодействие потока и поверхности можно охарактеризовать *освещённостью поверхности*, создаваемой потоком. Освещённость равна плотности потока, проходящего через малую площадку поверхности.

Оптическая система камеры отвечает за фокусировку потока излучения на приемнике (матрице камеры или сетчатке глаза). Приемник фиксирует попадание частиц на него. При идеальной фокусировке можно считать, что каждой точке приемника соответствует точка поверхности объекта, свет которой достиг приемника. Таким образом, как бы глядя из приемника можно каждой точке объекта сопоставить ее *яркость*, которая зависит как от плотности излучения, так и от ориентации участка поверхности. Точечный источник, площадь которого равна нулю, можно описать с помощью *силы света*, которая зависит только от угла распространения энергии.

Для того, чтобы перейти от качественного описания к количественному, необходимо ввести соответствующие единицы и связи величин. Этим занимается радиометрия.

2.5. Радиометрия

Радиометрия — система понятий, терминологии, математических соотношений, средств измерения и единиц измерения, предназначенных для описания и измерения излучения и его взаимодействия с веществом. Нам необходимы основные термины, понятия и законы радиометрии для расчета количества света, передающегося по сцене и попадающего на сенсор виртуальной камеры. Радиометрия не учитывает особенностей человеческого восприятия цвета и интенсивности (см. фотометрия, колориметрия).

Радиометрия основана на принципах геометрической оптики. Основные предположения:

Линейность Суммарный эффект двух входных лучей всегда равен сумме эффектов каждого луча, по отдельности

Сохранение энергии Рассеянный свет не может иметь большую энергию, чем падающий свет.

Отсутствие поляризации Единственное свойство света — распределение по длинам волн (частоте)

Отсутствие флюоресценции и фосфоресценции Поведение света на одной частоте не зависит от поведения на другой

Устойчивость состояния Распределение световой энергии не зависит от времени. То есть мы рассматриваем достаточно большой интервал времени, в котором система находится в энергетическом равновесии. Таким образом, мы пренебрегаем тем фактом, что свет распространяется в пространстве за конечное время и рассматриваем «мгновенное» решение.

Недостатки радиометрии наследуются от геометрической оптики — нельзя учесть квантовые эффекты, также поляризацию, флюоресценцию, фосфоресценцию. Впрочем, последние три эффекта можно сравнительно легко добавить в общую теорию.

2.5.1. Основные термины и определения

Воздействие света на глаз или другой регистрирующий аппарат определяется прежде всего энергией, переносимой световой волной. Поэтому необходимо рассмотреть понятия и единицы измерения, позволяющие количественно оперировать с такого рода воздействиями.

Радиометрия оперирует четырьмя основными понятиями, которые перечислены ниже вместе с их типичными обозначениями и размерностью.

- Поток излучения Φ , Вт (п. 2.5.2).
- Сила излучения I , Вт · Ст⁻¹ (п. 2.5.3).
- Освещённость E , Вт · м⁻² (п. 2.5.4).
- Яркость L , Вт · Ст⁻¹ · м⁻² (п. 2.5.5).

Набор различных понятий необходим для измерений, так как разные приборы реагируют на разные световые величины. Например, свет звезды можно оценить через силу излучения, отклик сенсора цифровой камеры пропорционален его освещенности, а человеческий глаз реагирует на уровень яркости источника.

2.5.2. Поток лучистой энергии (Radiant flux)

Лучистая энергия (radiant energy) характеризует энергию некоторого объекта и измеряется в джоулях (Дж). Обычно имеет обозначение Q . Спектральная плотность энергии излучения Q_λ — это энергия излучения на единицу интервала длин волн на определенной длине волны (единицы: джоуль/нм).

$$Q_\lambda = \frac{dQ}{d\lambda}$$

Сама по себе энергия нас не интересует — в рамках радиометрии рассматривается перенос энергии и способы ее измерения. Мы рассматриваем энергию в тот момент, когда она по каким-то причинам (например, при нагреве) начинает излучаться некоторым телом и создаёт *поток лучистой энергии*.

Поток лучистой энергии или поток излучения — наиболее «интегральная», обобщающая характеристика излучения энергии

телом (или, что эквивалентно — получения энергии телом). Он задаётся как количество энергии dQ , протекающей или используемой за определенный период времени dt , разделенной на временной интервал dt .

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (2.2)$$

Другими словами, поток Φ описывает скорость излучения, т. е. количество энергии, передаваемой через поверхность или область пространства в единицу времени.

Мы рассматриваем стационарный процесс, т. е. считаем, что с течением измеряемого времени dt поток не меняется. Поток измеряется в ваттах (Вт) — джоулях в секунду. Он также называется мощностью излучения (radiant power) источника.

При рассмотрении источника лучистой энергии необходимо укатывать пространственные характеристики объекта или области пространства, где мы измеряем поток (Рис.2.5).

Поток можно измерить следующим образом: поставить источник энергии и замерить изменение температуры интересующего объекта за заданное время ($Q = mc\Delta t$), где m - масса объекта, а c - удельная теплоёмкость его материала.

Спектральный поток. Поток лучистой энергии (или просто - «Поток») задает суммарную характеристику излучения по всем длинам волн. Часто необходимо рассматривать спектральный поток Φ_λ , т. е. поток на заданной длине волны. Математически его можно определить следующим образом:

$$\Phi_\lambda = \frac{dQ_\lambda}{dt} = \frac{d\Phi}{d\lambda} \quad (2.3)$$

Спектральное распределение потока энергии важно, например, для вычисления отклика сенсоров на излучение, попадающее на их чувствительную поверхность.

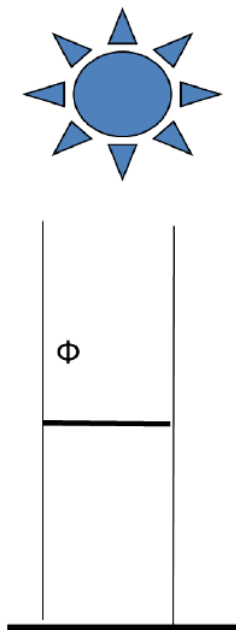


Рис. 2.5. Поток через площадку S

Полный поток. Очень часто применяется понятие *полного потока* (total radiant flux) источника, который можно вычислить как поток через сферу (или другую замкнутую поверхность), охватывающую объект (рис. 2.6).

Таким образом, полный поток характеризует всю энергию, излучаемую телом за промежуток времени. Величина полного светового потока характеризует излучающий источник и ее нельзя увеличить никакими оптическими системами (только перераспределить, сконцентрировать).

Поток позволяет охарактеризовать источник «в общем», с точки зрения мощности излучения. При измерении потока не учитывается ни направление потока, ни площадь излучения.

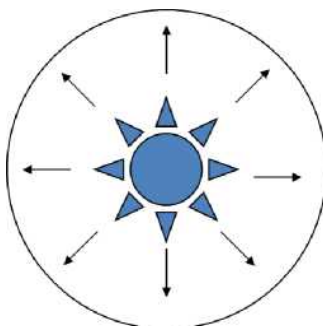


Рис. 2.6. Полный поток

Для некоторых измерений, однако, требуются более детальные величины, позволяющие оценить степень сконцентрированности излучения энергии в интересующем направлении или на конкретном участке поверхности.

2.5.3. Сила излучения (Radiant Intensity)

Для определения концентрации потока энергии в заданном направлении используется понятие *силы излучения*. Она равна величине плотности потока излучения, распространяющегося в единице телесного угла в заданном направлении и математически может быть выражена как.

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (2.4)$$

где $d\Phi$ - поток, излучаемый в заданном направлении
 $d\Omega$ - телесный угол, содержащий это направление.

Измеряется сила излучения в ваттах на стерадиан $\left(\frac{\text{Вт}}{\text{Ст}}\right)$.

Телесный угол Ω есть часть пространства, заключенная внутри одной полости некоторой конической поверхности (с замкнутой направляющей). За меру телесного угла принимают отношение площади S , вырезаемой телесным углом на сфере (с центром в вершине телесного угла), к квадрату радиуса сферы R :

$$\Omega = \frac{S}{R^2}$$

Рисунок 2.7. иллюстрирует определение телесного угла.

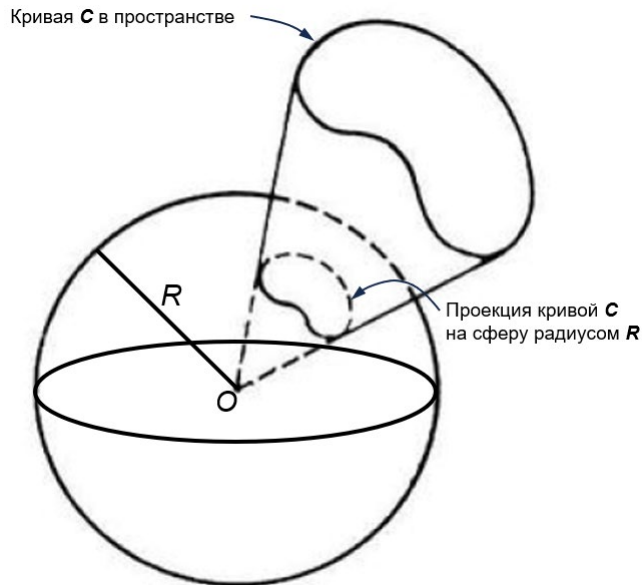


Рис. 2.7. Телесный угол Ω , стягивающий кривую C в пространстве в точку O , являющуюся вершиной телесного угла.

Сила излучения используется для измерения потока в заданном направлении для точечного источника. При рассмотрении силы излучения игнорируется площадь поверхности светящегося объекта и рассматривается только суммарный поток, посылаемый в телесный угол со всей поверхности объекта. Таким образом, понятие силы излучения применимо либо к объектам, которые можно считать бесконечно малыми (удаленные точечные источники, звезды и т. п.), либо к объектам, формой которых мы пренебрегаем и рассматриваем только полное излучение со всей поверхности (в этом смысле применяется редко). Для большинства реальных источников сила излучения сильно меняется для разных направлений. На практике сила излучения крайне редко используется для чего-либо, кроме описания излучения точечных источников света.

Спектральная сила излучения. Спектральная сила излучения I_λ это сила излучения в единичном интервале длин волн на заданной длине волны λ . Математически определяется следующим выражением:

$$I_\lambda = \frac{dI}{d\lambda} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega d\lambda} \quad (2.5)$$

Единица измерения $\left(\frac{\text{Вт}}{\text{Ст}\cdot\text{нм}}\right)$.

Связь силы излучения и полного потока. Если сила излучения для данного источника одинакова во всех направлениях, то её можно выразить через полный поток Φ как:

$$I = \frac{\Phi}{4\pi} \quad (2.6)$$

где 4π - площадь сферы единичного радиуса.

Если сила света неравномерна по направлениям, то такое значение определяет среднюю силу света. Средняя сила света может использоваться как характеристика концентрирующей способности оптических систем — чем больше отношение силы света источника в заданном направлении к средней силе света, тем эффективнее оптическая система.

В полярной системе координат телесный угол можно выразить следующим образом:

$$d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi \quad (2.7.1)$$

Подставив (2.7.1) в (2.4), получим выражение для потока, излучаемого в заданном направлении в виде:

$$d\Phi = I(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi \quad (2.7.2)$$

где $I(\theta, \varphi)$ - сила излучения в направлении, определяемом парой углов: θ и φ , которые условно можно назвать широтой и долготой, подобно географической системе координат.

Полный поток получаем путем интегрирования силы излучения по всем направлениям:

$$\Phi = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi I(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta \quad (2.7.3)$$

Если $I(\theta, \varphi)$ одинакова для всех направлений, то из общего соотношения (2.7.3) следует, что

$$\Phi = 4\pi I \quad (2.7.4)$$

в согласии с (2.6).

2.5.4. Освещённость и светимость

Освещённость (Irradiance) E определяется как плотность падающего лучистого потока на единицу площади заданной поверхности, падающего на точку этой поверхности. Освещённость определяется выражением:

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (2.8)$$

где Φ - поток излучения, а S – площадь, на которую падает этот поток.

Измеряется в ваттах на квадратный метр поверхности $\left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}\right)$.

Из определения освещённости можно видеть, что для набора описывающих сфер и точечного источника в центре, полный поток через них будет одинаковым, а освещённость — разной:

$$E = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{4\pi R^2} \quad (2.9)$$

Аналогично освещённости можно ввести термин светимость, который характеризует плотность потока, исходящего с поверхности. Освещённость же характеризует освещение поверхности, т. е. плотность приходящего потока. Размерность у светимости та же, что и у освещённости ($\text{Вт}/\text{м}^2$), типичное обозначение — M .

Освещённость является функцией положения на заданной поверхности и наиболее часто используется, когда необходимо вычислить энергию, падающую на заданную площадку, а распределение энергии по направлениям не важно. Должны быть включены все направления полусферического телесного угла выше или ниже точки поверхности.

Спектральная освещённость задается как поток через малую площадку в заданном диапазоне длин волн:

$$E_{\lambda} = \frac{dE}{d\lambda} = \frac{d^2\Phi}{dsd\lambda} \quad (2.10)$$

Освещённость параллельным пучком света Горизонтальный прямоугольник размером $W \times H$ освещается параллельным потоком излучения Φ_0 под углом θ к нормали. Какой будет освещённость прямоугольника в зависимости от угла (рис. 2.8)?

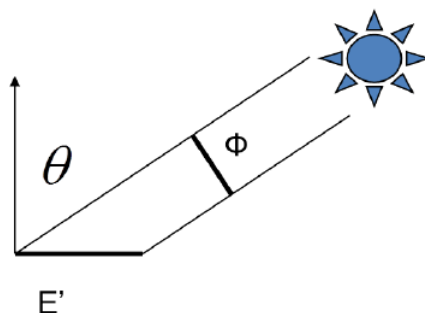


Рис. 2.8. Освещённость и косинус.

Пусть $\Phi_0 = E_0 S_0$, где E_0 – освещённость площадки, расположенной перпендикулярно потоку, а S_0 – ее площадь. Тот же самый поток будет падать и на площадку $S = WH$, создавая освещённость $E = \frac{\Phi_0}{S}$. Поток через обе площадки будет одинаковый. Следовательно, получаем: $ES = E_0 S_0$. Из геометрических соображений $S_0 = S \cos \theta$, поэтому $E = E_0 \frac{S_0}{S} = E_0 \cos \theta$.

По этой причине отклик идеального детектора освещенности будет пропорционален косинусу угла падения параллельного пучка.

Связь силы света и освещенности. Рассмотрим освещённость площадки площадью S , расположенную на расстоянии R от точечного источника с силой света I (рис. 2.9).

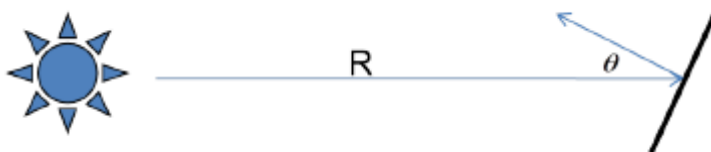


Рис. 2.9. К выводу формулы связи силы света и освещенности.

Запишем выражение для освещенности (2.8) и выразим поток из (2.4):

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I d\Omega}{dS} \quad (2.11)$$

Учитывая, что $d\Omega = \frac{dS \cos \theta}{R^2}$, где θ — угол между нормалью к поверхности площадки S и направлением на источник, получаем:

$$E = \frac{I d\Omega}{dS} = \frac{I \cos \theta}{R^2} \quad (2.12)$$

Полученное выражение представляет собой основной закон освещенности, создаваемой точечным источником (закон обратных квадратов): освещённость поверхности обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника до поверхности и прямо пропорциональна косинусу угла между нормалью к поверхности и направлением на источник. Для протяженных источников света (размерами и неравномерностью потока которых нельзя пренебречь) зависимость сложнее, хотя на больших расстояниях можно пользоваться и законом для точечных источников

2.5.5. Яркость (Radiance)

Рассмотрим некоторый источник видимой площади, который нельзя считать точечным, но точная форма которого нам не важна (рис. 2.10).

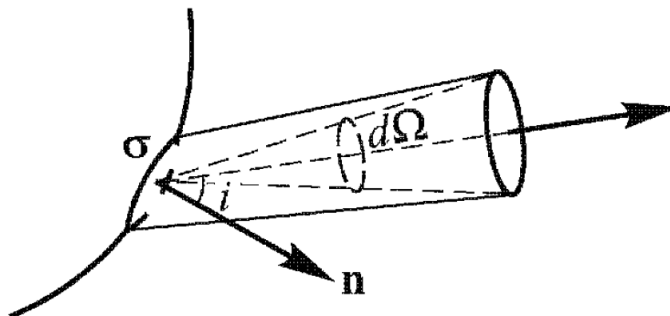


Рис. 2.10. Иллюстрация к определению поверхностной яркости.

Для описания его свойств мы можем использовать следующие единицы (из ранее введенных):

- Поток Φ будет характеризовать излучаемую энергию для этого источника. Это никак не характеризует ни плотность излучения с единицы поверхности, ни распределение направлений излучения, но позволит охарактеризовать полную мощность излучения для данного источника.
- Сила света I для этого источника по заданному направлению позволит вычислить распределение излучения энергии по углам, однако никак не характеризует яркость каждой точки поверхности. Например, если при данной силе света поверхность наблюдается под углом, то такой источник для регистрирующих устройств будет ярче, чем обладающий аналогичной силой света в перпендикулярном направлении, за счет повышения плотности потока в данном направлении, так как аналогичный поток будет излучаться с меньшей видимой площади
- Светимость M для данного источника задает полную исходящую энергию с единицы поверхности, однако не учитывает распределение излучения по углам.

Таким образом, для источников, которые нельзя считать точечными, имеет смысл определение понятия поверхностной яркости, или просто яркости. Яркость — это поток, посылаемый в единичном телесном угле с единичной площади источника в заданном направлении. Единица измерения $\left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{ст}}\right)$. Посылаемый в телесный угол поток с участка поверхности пропорционален видимой площади поверхности dS и величине телесного угла $d\Omega$. Коэффициент пропорциональности и называется яркостью источника:

$$L = \frac{d^2\Phi}{dSd\Omega} = \frac{d^2\Phi}{\cos\theta dS_0 d\Omega} \quad (2.13)$$

где $dS = dS_0 \cos\theta$ величина, называемая видимой площадью поверхности. Это площадь проекции элементарной площадки dS_0 на плоскость перпендикулярную направлению распространения или наблюдения.

В приведенном определении (и везде далее) угол θ отсчитывается от нормали к поверхности. Яркость — это функция как поверхности и точки на ней, так и направления. Например, можно говорить о яркости точки на земле в направлении объектива фотоаппарата и т. п.

Из приведенного определения (2.13) видно, что в общем случае яркость зависит от угла наблюдения поверхности. Существуют, однако, источники, для которых поверхностная яркость константна для всех направлений. Такие источники называются ламбертовскими и их свойства подробно рассмотрены в разделе 2.5.7.

Спектральная яркость задается как яркость на единицу длины волны, аналогично другим величинам:

$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} = \frac{d^3\Phi}{\cos\theta dS d\Omega d\lambda} \quad (2.14)$$

Закон сохранения яркости. Понятие яркости источника очень важно в силу закона сохранения яркости, который говорит о том, что при передаче энергии между двумя точками (более точно — дифференциальными площадками) исходящая яркость L_s равна приходящей яркости L_d в случае отсутствия эффекта поглощения энергии средой передачи.

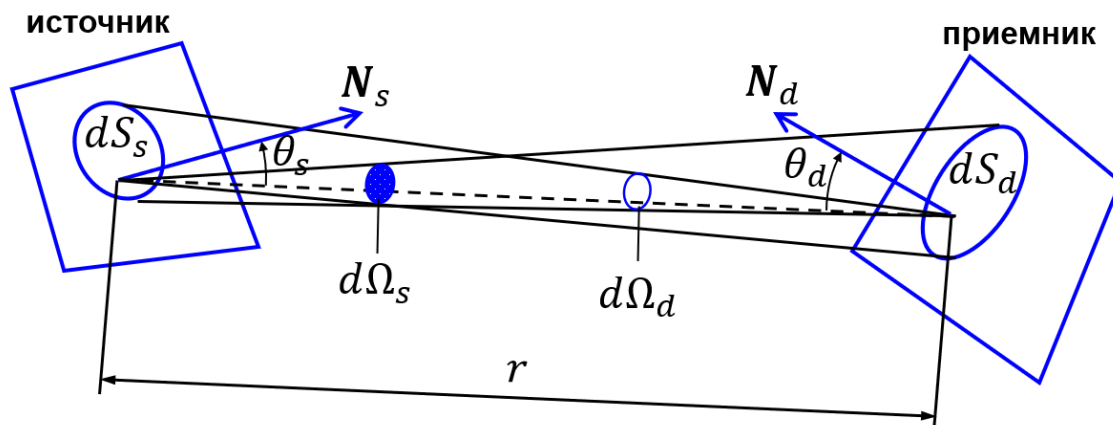


Рис. 2.11. Дифференциальный форм-фактор.

Для доказательства этого определим понятие дифференциального форм-фактора для двух малых площадок dS_s и dS_d , расположенных на рас стоянии r под углами θ_d и θ_s к отрезку между площадками (см. рис. 2.11). Телесный угол, который образует площадка dS_d для наблюдателя в точке dS_s составляет:

$$d\Omega_s = \frac{dS_d \cos \theta_d}{r^2} \quad (2.15)$$

Аналогично для наблюдателя на площадке-приемнике:

$$d\Omega_d = \frac{dS_s \cos \theta_s}{r^2} \quad (2.16)$$

Определим *форм-фактор* как

$$d^2G = dS_s \cos \theta_s d\Omega_s = \frac{dS_s \cos \theta_s dS_d \cos \theta_d}{r^2} = dS_d \cos \theta_d d\Omega_s \quad (2.17)$$

При переходе к протяженным площадкам, форм-факторы можно считать, представляя их как набор дифференциальных форм-факторов (где S_s и S_d - площади соответствующих площадок конечного размера):

$$G = \int_{S_s} \int_{S_d} \frac{\cos \theta_s \cos \theta_d}{r^2} dS_s dS_d \quad (2.18)$$

Далее подставим определение d^2G в определение яркости источника s :

$$L_s = \frac{d^2\Phi_s}{\cos \theta_s d\Omega_s dS_s} = \frac{d^2\Phi_s}{d^2G} \quad (2.19)$$

Аналогично,

$$L_d = \frac{d^2\Phi_d}{\cos \theta_d d\Omega_d dS_d} = \frac{d^2\Phi_d}{d^2G} \quad (2.20)$$

Если при передаче поток не теряется (т. е. не происходит поглощения, рассеивания в среде), то $\Phi_d = \Phi_s$. Следовательно, $L_s = L_d$. Зная это, можно рассчитывать освещённость поверхностей, представляя входящий поток через набор параллельных потоков под

разными углами и вычисляя яркость источников по соответствующему направлению. На этом принципе, в частности, построены многие алгоритмы синтеза реалистичных изображений.

Яркость и человеческий глаз. Как и многие другие детекторы, глаз реагирует на плотность потока через чувствительные элементы сетчатки, т. е. фактически на освещённость. $E = \frac{d\Phi}{dA} = \int L \cos \theta d\omega$. Особенности строения глаза позволяют предположить, что свет падает на элементы сетчатки почти перпендикулярно ($\cos \theta \approx 1$), а для достаточно удаленных источников, на которых глаз сфокусирован, угловым размером можно пренебречь. В этом случае $E = L$, то есть освещённость равна яркости численно.

Некоторые значения радиометрических величин приведены в таблице 2.2.

Описание	Значение
Полный поток 100 Вт газонаполненной лампы накаливания со спиральной вольфрамовой нитью	82 Вт
Поток типичного гелий-неонового лазера средней мощности, на частоте 632,8 нм	5 мВт
Поток 40 Вт лампы дневного света	23,2 Вт
Заатмосферная освещённость на средней земной орбите	1367 Вт/м ²
Земная прямая солнечная освещённость, чистое небо, зима, юго-восток США, полдень	852 Вт/м ²
Земная полная (полусферическая) освещённость, чистое небо, зима, юго-восток США, полдень	686 Вт/м ²
Яркость Солнца на его поверхности	2,3x10 ⁷ Вт/м ² /ст
Видимая яркость Солнца с Земли	1,4x10 ⁷ Вт/м ² /ст

Таблица 2.2. Некоторые значения радиометрических величин.

2.5.6. Связь яркости с другими радиометрическими величинами

Большое число понятий, связанных с переносимой светом энергией, обусловлено законом прямолинейного распространения

света, в силу которого световая энергия может переноситься по-разному в разных точках поверхности и в различных направлениях. Наиболее дифференциальной характеристикой светового поля служит яркость, определяющая мощность излучения, распространяющегося в заданном направлении вблизи заданной точки пространства. Сила света описывает мощность излучения, также распространяющегося в заданном направлении, но от всей поверхности протяжённого источника. Освещённость и светимость характеризуют мощность, которая распространяется вблизи какой-либо точки поверхности во всех направлениях. Наконец, наиболее интегральной характеристикой является поток - мощность, переносимая через всю поверхность во всех направлениях

Соотношения между яркостью, силой излучения, освещённостью и светимостью определяются следующими выражениями:

$$L = \frac{dI}{dS \cos \theta} = \frac{dE}{d\Omega \cos \theta} = \frac{dM}{d\Omega \cos \theta} \quad (2.21)$$

$$E = \int_{\Omega} L \cos \theta d\Omega \quad (2.22)$$

$$I = \int_S L \cos \theta dS \quad (2.23)$$

$$\Phi = \int_S \int_{\Omega} L \cos \theta d\Omega dS \quad (2.24)$$

При наблюдении, например, звёзд, глаз реагирует на свет, испущенный в направлении наблюдателя всей поверхностью звезды, поэтому уместно говорить о силе света звезды (обратите внимание, что для точечных источников, как звёзды, $L = I$). В фотографических приборах неважно, откуда пришел свет на пленку или чувствительный элемент матрицы. Осуществляется интегрирование по направлениям, а значит здесь регистрируется освещённость

Сводная информация о рассмотренных радиометрических величинах, их единицах измерения и связывающих их соотношениях представлена в таблице 2.3:

Наименование	Англ. эквивалент	Ед. изм.	Обозн.	Определение
Поток энергии излучения	Radiant flux	Вт	Φ	$\Phi = \frac{dQ}{dt} = \iint L \cos \theta d\Omega dS$ $= \int I d\Omega$ $= \int E dS$
Сила излучения	Radiant intensity	$\frac{\text{Вт}}{\text{ст}}$	I	$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} = \int L \cos \theta dS$
Освещенность	Irradiance	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	E	$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I d\Omega}{dS} = \frac{I \cos \theta}{R^2}$ $= \int L \cos \theta d\Omega$
Яркость	Radiance	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ ст}}$	L	$L = \frac{d^2\Phi}{\cos \theta dS d\Omega} = \frac{dE}{\cos \theta d\Omega}$ $= \frac{dI}{\cos \theta dS}$

Таблица 2.3. Основные радиометрические величины и их единицы.

2.5.7. Свойства ламбертовских источников

Ламбертовский источник — это источник константной поверхностной яркости, для которого поверхностная яркость одинакова для всех направлений ($L = \text{const}$). Ламбертовскими они называется потому, что их сила света прямо пропорциональна косинусу угла между нормалью к поверхности и направлением на наблюдателя ($I = I_0 \cos \theta$). Такая зависимость называется законом излучения Ламберта. В этом случае $L = \frac{dI_0 \cos \theta}{\cos \theta dS} = \frac{dI_0}{dS} = \text{const}$.

Строго говоря, в природе таких источников не существует. Однако матированное тело или мутная среда, каждая точка которой рассеивает свет одинаково во все стороны, является достаточно хорошей аппроксимацией ламбертовского источника. Такие среды

или материалы можно называть *идеально рассеивающими* (или диффузными, diffuse), если они подчиняются закону Ламберта.

Связь светимости и яркости для ламбертовского источника

Для ламбертовского источника существует простая зависимость между светимостью и яркостью:

$$M_{diffuse} = \pi L_{diffuse} \quad (2.25)$$

Доказывается путем вычисления интеграла в определении светимости через яркость (где S - площадь полусферы вокруг некой точки поверхности):

$$M = \int_S L \cos \theta d\Omega = L \int_S \cos \theta d\Omega = L \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi = \pi L \quad (2.26)$$

Аналогично показывается, что освещённость E равномерно освещенной точки составляет πL .

Яркость светящейся полусферы и диска

Рассмотрим светящийся плоский диск S и светящуюся полусферу S' . Предположим, что обе поверхности подчиняются закону Ламберта. В этом случае для наблюдателя диск S будет неотличим от полусферы S' , так как видимые площади их будут одинаковы, а яркости не зависят от угла с поверхностью. В частности, поэтому сферические источники типа Солнца и Луны воспринимаются как плоские диски.

2.6. Фотометрия

Человеческий глаз чувствителен в ограниченном диапазоне спектра — от 380 до 780 нм. Более того, внутри этого диапазона чувствительность неравномерна. Например, воспринимаемая яркость монохроматического излучения на длине волны 550 нм намного больше, чем у излучения такой же мощности на длине волны 650 нм. В связи с этим под эгидой Международной Комиссии по Освещению (МКО) были проведены эксперименты, результатом которых стала кривая спектральной световой эффективности $V(\lambda)$. Эта кривая (показана на рис. 2.12) задает усреднённую чувствительность человеческого зрения по отношению к длине волны излучения.

Фотометрические величины могут быть получены из радиометрических с помощью взвешивания спектральных величин функцией $V(\lambda)$:

$$Q_v = 683 \int_{380}^{780} Q_e V(\lambda) d\lambda \quad (2.22)$$

где Q_e одна из величин Φ , I , E , M или L . Такие величины очень полезны на практике, т. к. их значение соответствует воспринимаемому человеком. Индекс v , обозначающий видимый (*visible*) или визуальный (*visual*) ставится к фотометрическим величинам, чтобы отличить их от радиометрических величин, которым присвоен индекс e , обозначающий энергию (*energy*). Эти индексы можно опустить, если смысл ясен и не возникает двусмысленности.

Основные фотометрические величины и их соответствие радиометрическим приведены в таблице 2.4). Световой поток, выражаемый в люменах (Лм) - фотометрический эквивалент потока излучения. Отсюда можно заметить, что функция $V(\lambda)$ не безразмерна. Ее единицы - люмен/Вт. Другие фотометрические единицы выражаются из люмена так же, как радиометрические из ватт. Сила света измеряется в канделах (Люмен/ст), причем одна кандела равна силе света свечи. Для световой фотометрической освещенности существует специальная единица - люкс (Люмен/м²). Яркость выражается в канделах на квадратный метр, иногда можно встретить и специальную единицу - нит.

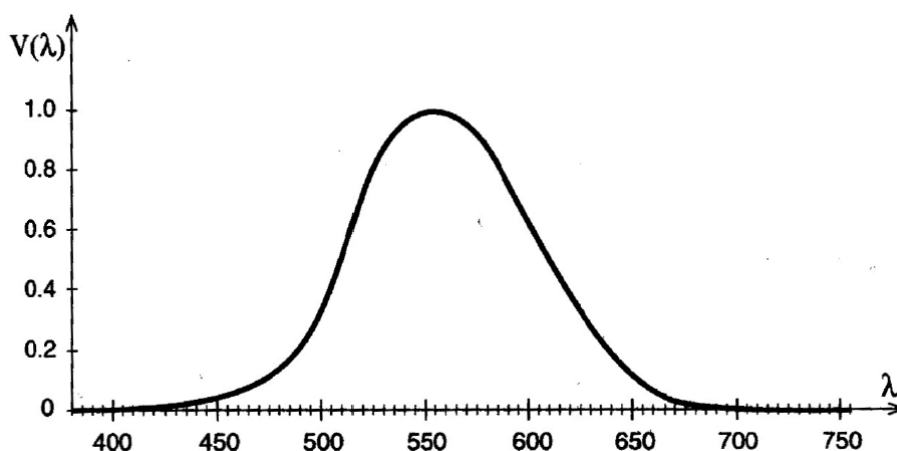


Рис. 2.12. Кривая спектральной световой эффективности

Радиометрические величины	Единицы измерения	Фотометрические величины	Единицы измерения
Энергетический поток (radiant flux)	Вт	Световой поток (luminous flux)	Люмен
Энергетическая сила света (radiant intensity)	$\frac{\text{Вт}}{\text{ст}}$	Сила света (luminous intensity)	Кандела = Люмен/ст
Энергетическая освещённость (irradiance)	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$	Световая освещённость (illuminance)	Люкс = Люмен/м ²
Энергетическая яркость (radiance)	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ ст}}$	Световая яркость (luminance)	Нит = Кандел/м ²

Таблица 2.4. Связь радиометрических и фотометрических величин.

2.7. Вопросы для самоконтроля усвоенных знаний

Следующие вопросы позволят оценить степень усвоения знаний по разделу радиометрия.

1. Что такое свет? Какова природа светового излучения?
2. Дайте краткое описание спектрального распределения светового излучения. Почему знание спектрального распределения потока световой энергии очень важно для компьютерной графики?
3. Перечислите основные законы геометрической оптики. Кратко опишите основные эффекты или явления, которые не учитываются в рамках геометрической оптики.
4. Что такое радиометрия? Перечислите четыре основные понятия радиометрии.
5. Дайте определение потока излучения. Как можно измерить поток излучения?
6. Какой радиометрической величиной определяется концентрация потока излучения в заданном направлении? Что такое телесный угол и какова его мера?
7. Как освещенность поверхности в точке связана с силой излучения и расстоянием до источника?
8. Сформулируйте закон сохранения яркости при передаче светового излучения в непоглощающей среде с постоянным показателем преломления.
9. Определите связь светового потока и яркости.
10. Какими свойствами обладает ламбертовский источник излучения? Можно ли визуально отличить светящуюся полусферу от светящегося диска?
11. Определите яркость поверхности в точке, освещенной точечным источником света.
12. Какова связь между фотометрическими и радиометрическими величинами?

3. Взаимодействие света и материала

3.1. Типы взаимодействия света и материала

Как правило, мы видим не источники света, а результат взаимодействия излученного источниками света с поверхностями окружающих нас объектов. Но рисунке 3.1 представлены несколько таких результатов взаимодействия, на примере слоя светопропускающего материала.

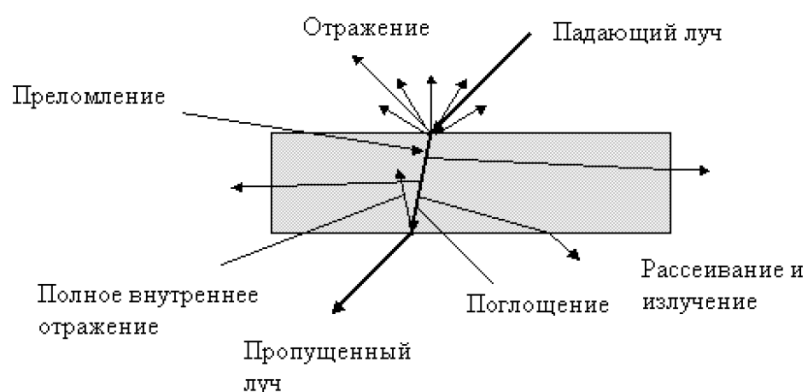


Рис. 3.1. Взаимодействие света и материала: отражение, поглощение, пропускание

Падающий на поверхность объекта световой поток может либо отражаться от нее, либо преломляться на этой поверхности и продолжить распространение в среде другого материала, находящегося за поверхностью, либо поглощаться средой материала, из которого состоит объект.

Отражение от поверхности может быть либо зеркальным (направленным по закону отражения), если поверхность идеально гладкая, либо диффузным, если поверхность шероховатая. Аналогично, преломление коллимированного пучка света может быть либо направленным (по закону преломления), если поверхность идеально гладкая, либо диффузным, если поверхность шероховатая. Диффузное отражение или преломление также называют рассеиванием света. Кроме рассеяния света на поверхности, разделяющей две различные среды, может происходить рассеяние света на частицах материала, из которого состоит объект. Такое рассеяние (рассеяние в среде) обычно называют объемным в отличие от поверхностного рассеяния.

3.2. ДФО, ДФП, ДФР

Поскольку мы занимаемся реалистичной визуализацией, наша задача - определить, что увидит наблюдатель после преобразования светового излучения объектами моделируемой сцены. В радиометрии есть несколько концепций, которые дают формализм для описания различных типов преобразования излучения при взаимодействии с объектом. Одной из наиболее общих можно считать способ описания светорассеивающих свойств поверхности путем задания двунаправленных функций рассеяния (ДФР) или BSDF – Bidirectional Scattering Distribution Function в англоязычной литературе [12, 13, 14]. В случае описания отражающих свойств такая функция называется двунаправленной функцией отражения (ДФО) или BRDF – Bidirectional Reflectance Distribution Function, а в случае пропускания - двунаправленной функцией пропускания (ДФП) или BTDF – Bidirectional Transmittance Distribution Function.

Рассмотрим схему на рис. 3.2.1: мы хотели бы знать, сколько излучения покидает поверхность в направлении ω_o к наблюдателю, $L_o(p, \omega_o)$ в результате падающего излучения в направлении ω_i , $L_i(p, \omega_i)$. Следует заметить, что векторы ω_o и ω_i не всегда лежат в одной плоскости с нормалью к поверхности N .

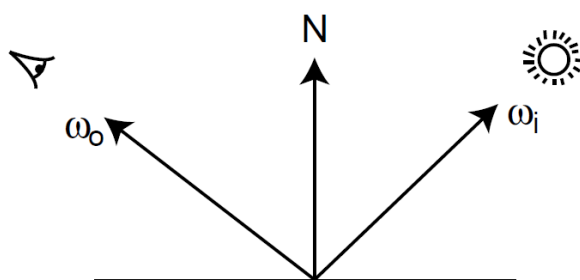


Рис. 3.2.1. Двунаправленная функция отражения (ДФО) представляет собой четырехмерную функцию по парам направлений ω_i и ω_o , которая описывает, сколько света, падающего вдоль ω_i , рассеивается от поверхности в направлении ω_o .

Если направление ω_i считается дифференциальным конусом направлений, мы можем вычислить результирующую дифференциальную освещенность в точке p по формуле

$$dE(p, \omega_i) = L(p, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i \quad (3.2.1)$$

Различное количество излучения будет отражаться в направлении ω_o . Важное допущение, сделанное в радиометрии, состоит в том, что система является линейной: удвоение количества поступающей в нее энергии приведет к удвоению количества исходящей из нее энергии. Это разумное предположение, поскольку длинные энергетические уровни не являются экстремальными.

Следовательно, отраженная дифференциальная яркость равна

$$dL_o(p, \omega_o) \propto dE(p, \omega_i)$$

Коэффициент пропорциональности f_r для конкретной пары направлений ω_i и ω_o определяется как ДФО поверхности:

$$f_r(p, \omega_o, \omega_i) = \frac{dL(p, \omega_o)}{dE(p, \omega_i)} = \frac{dL(p, \omega_o)}{L(p, \omega_i) \cos \theta_i d\omega_i} \quad (3.2.2)$$

При расчетах ДФР следует иметь в виду, что для ДФО должны быть соблюдены два важных принципа:

- Принцип обратимости
- Закон сохранения энергии

Принцип обратимости заключается в том, что ДФО поверхности в точке P не изменится если направления ω_i падения и ω_o наблюдения поменять местами.

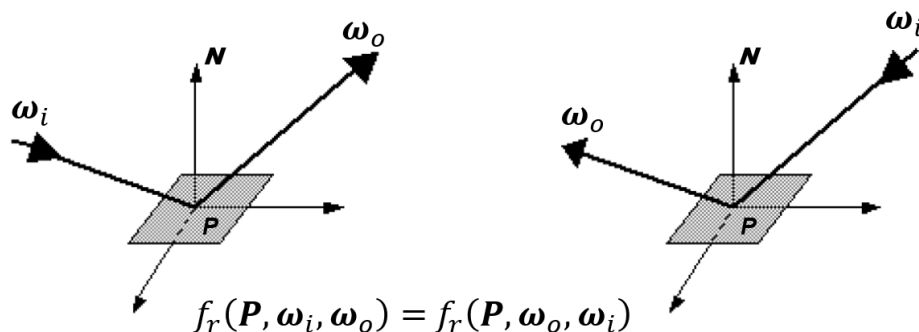


Рис. 3.2.2. Принцип обратимости.

Закон сохранения энергии для ДФО состоит в том, что величина отраженного потока излучения не должна превышать величину потока падающего излучения.

$$\int_{\Omega_o} f_r(p, \omega_o, \omega_i) \cos \theta_i d\Omega_o \leq 1 \quad (3.2.2)$$

3.3. Расчет излучения точки поверхности: уравнение рендеринга

Поскольку в осветительных системах используется некогерентное освещение и размеры элементов рассеивающих структур, как правило, значительно больше длины волны видимого излучения, то такие явления как интерференция и дифракция не оказывают практического эффекта на результирующее распределение яркости. Поэтому, для вычисления яркости в точке \vec{p} (Рис. 3.3.1) можно применить уравнение рендеринга [15], имеющее следующий вид:

$$L(\vec{p}, \vec{v}, c) = \tau(\vec{p}, \vec{v}, c) \left(L_0(\vec{p}, \vec{v}, c) + \frac{1}{\pi} \int_{4\pi} f(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', c) L'(\vec{p}, \vec{v}', c) (\vec{n} \cdot \vec{v}') d\Omega \right) \quad (3.3.1)$$

где:

$L_0(\vec{p}, \vec{v}, c)$ – собственная яркость объекта в точке наблюдения \vec{p} , направлении наблюдения \vec{v} и для компоненты цвета c ;

$\tau(\vec{p}, \vec{v}, c)$ – пропускание (прозрачность) среды между наблюдателем и точкой наблюдения;

$f(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', c)$ – двунаправленная функция рассеивания (ДФР) поверхности от источника освещения по направлению \vec{v}' и в направлении \vec{v} на наблюдателя, определяемая как $f(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', c) = \frac{dL(\vec{p}, \vec{v}, c)}{dE(\vec{p}, \vec{v}', c)}$;

$L'(\vec{p}, \vec{v}', c)$ – яркость внешнего освещения в телесном угле $d\Omega$, направленная в точку наблюдения;

\vec{n} – локальная нормаль в точке наблюдения.

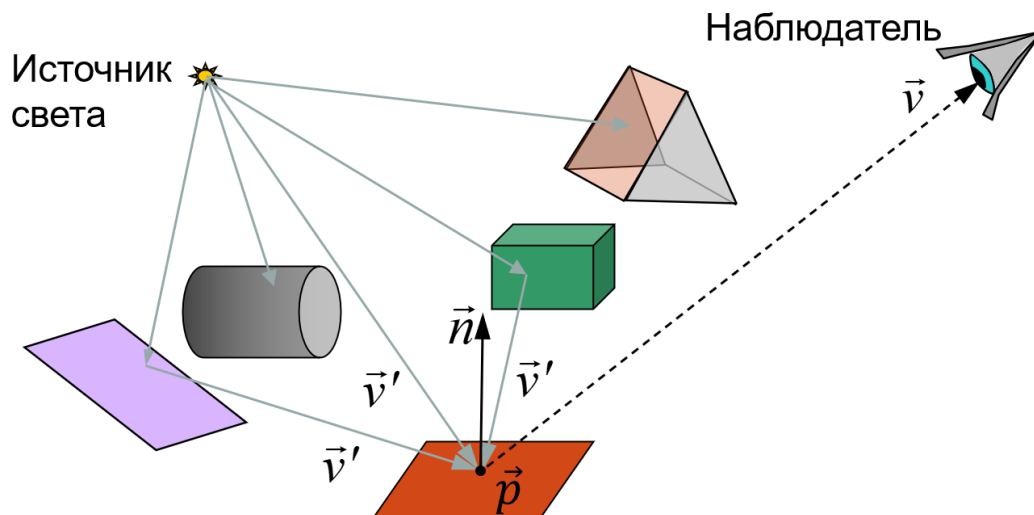


Рис. 3.3.1. Пояснение к параметрам уравнения рендеринга

Если результатом моделирования является не яркость, а освещенность, интенсивность или световой поток, то вычисленное распределение яркости должно быть проинтегрировано по телесному углу, площади и дважды по телесному углу и площади соответственно:

$$E(\vec{p}, c) = \int_{2\pi} L(\vec{p}, \vec{v}, c) d\Omega \quad (3.3.2)$$

$$I(\vec{v}, c) = \int_S L(\vec{p}, \vec{v}, c) dS \quad (3.3.3)$$

$$\Phi(c) = \int_S \int_{2\pi} L(\vec{p}, \vec{v}, c) dS d\Omega \quad (3.3.4)$$

где:

S – область вычисления силы излучения или потока излучения.

Основным и физически корректным методом решения уравнения рендеринга является метод трассировки лучей. В лучевом подходе интегрирование по сфере выполняется посредством трассировки лучей в направлении всех возможных источников излучения, и уравнение рендеринга принимает следующий вид:

$$L(\vec{p}, \vec{v}, c) = \tau(\vec{p}, \vec{v}, c) \left(L_0(\vec{p}, \vec{v}, c) + \frac{1}{\pi N} \sum_{i=1}^N f(\vec{p}, \vec{v}, \vec{v}', c) E_i(\vec{p}, \vec{v}', c) \right) \quad (3.3.5)$$

где:

$E_i(\vec{p}, \vec{v}', c)$ – локальная освещенность объекта в точке наблюдения по направлению \vec{v}' , созданная i -м лучом;

N – количество лучей, участвующих в интегрировании;

В сцене, предполагающей диффузные переотражения световых лучей, уравнение (3.3.1) перерастает в бесконечную рекурсивную сумму интегралов яркости по полной сфере. Причина такого усложнения заключается в том, что яркость, стоящая в подынтегральном выражении, сама вычисляется с помощью интеграла (3.3.1). Естественно, в общем случае, детерминистические методы не позволяют решить данное уравнение с бесконечной рекурсией. Поэтому для трассировки лучей в сложных осветительных устройствах используются методы Монте-Карло, а именно метод «русской рулетки». Особенность метода «русской рулетки» заключается в том, что он позволяет вероятностным образом корректно прервать бесконечное рекурсивное суммирование (3.3.5). Детали метода будут рассмотрены в курсе “Методы расчета глобального освещения”.

3.4. Модели освещения

В компьютерной графике под моделью освещения понимается функция, задающая исходящую энергию в зависимости от входящей. В англоязычной литературе модель освещения называют моделью тонирования (shading model). А под термином тонирование (shading) понимают процесс вычисления исходящего излучения для точки поверхности.

3.4.1. Требования к моделям освещения

К моделям освещения предъявляются три основных требования: точность, выразительность и скорость. Очевидно, что данные требования довольно противоречивы. Точность вычислений и их скорость – очень несовместимые понятия.

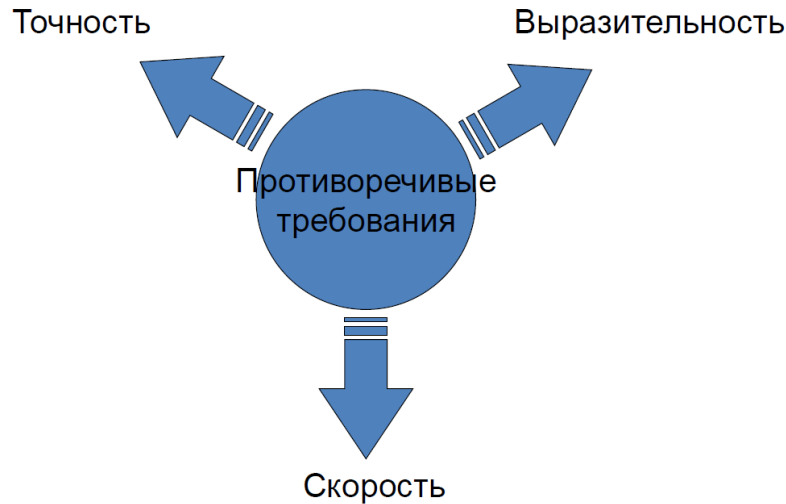


Рис. 3.4.1. Основные требования к моделям освещения

Под точностью понимается физическая корректность моделирования освещения трехмерных сцен. Например, у нас имеется образец реального объекта. Мы строим его компьютерную модель и хотим, чтобы результат моделирования совпадал с результатом физического эксперимента. Это может выражаться, например, в виде сравнения рассчитанной с помощью нашей модели яркости со значением яркости, полученным в результате измерения в реальных условиях с помощью специального прибора, называемого яркомером.

Сравнивать результат физического моделирования следует не только с вычисленным значением, но также и с тем, что мы видим на экране в результате компьютерного моделирования. Следует иметь в виду, что, во-первых, монитор не может отобразить все видимые цвета, а во-вторых, человеческий глаз не может различать световое излучение, выходящее за пределы видимого спектрального диапазона. Но есть приборы, позволяющие отобразить такое излучение на дисплее в псевдоцветах, воспринимаемых глазом. Примером может служить тепловизор, который позволяет визуализировать инфракрасное излучение. Таким образом точность компьютерной модели освещения подразумевает две составляющие. Первая – это корректно рассчитать физическую величину излучения (или сигнала), а вторая – корректно отобразить рассчитанную величину на дисплее.

Выразительность – очень субъективное понятие, выражающееся в том, чтобы результат компьютерного моделирования выглядел красиво. Для этого, как правило,

параметры сцены настраиваются не на то, как сцена выглядит в действительности, а на то, как это представляет себе дизайнер. Такой подход хорошо работает в том случае, когда у нас в реальном мире нет аналога того объекта, который мы хотим отобразить. Например, в последнее время появляется все больше фильмов, в которых реальные актеры заменяются компьютерными моделями. Но как бы ни старались разработчики модели, всегда, при хорошем качестве изображения, модель можно визуально отличить от реального актера, поскольку зритель хорошо понимает, как должен выглядеть реальный человек. С другой стороны, если модель визуализирует что-то неизвестное зрителю, например, инопланетные формы жизни, с которыми вы никогда ранее не сталкивались, то такая модель, как правило, воспринимается зрителем как естественный объект. Это и называется выразительностью. Хорошим примером выразительности может служить фильм Аватар. В этом фильме хорошо сочетается компьютерная графика с игрой реальных актеров. Все инопланетные формы жизни в этом фильме были представлены в виде компьютерных моделей, а реальных людей играли реальные актеры. В фильме это все очень хорошо сочеталось и для зрителя это выглядело довольно естественно и выразительно.

Третье основное требование к моделям освещения – скорость. Модель должна достаточно быстро осуществлять расчет взаимодействия луча с поверхностью, поскольку даже при построении изображения простых сцена такое взаимодействие выполняется миллионы раз. То есть, если свет падает на поверхность, то преобразование светового луча этой поверхностью должно осуществляться быстро и продолжить распространение луча дальше, чтобы построить изображение моделируемой сцены без видимой задержки по времени. В большинстве случаев скорость рендеринга зависит от двух основных характеристик:

- Скорость трассировки лучей;
- Применение двунаправленной функции рассеяния.

Конечно, остается вопрос сложных явлений, таких как дифракция, интерференция, поляризация, флуоресценция. Такие модели существуют, но они довольно тяжеловесны и их реализация достаточно трудоемкая. Поэтому, как правило, в традиционной компьютерной графике эти модели не используются, и их пытаются заменить моделями,

обеспечивающими выразительность, т. е. дают в результате некий аналог похожий на теоретический.

3.4.2. Физически обоснованные и эмпирические модели

Физически обоснованными называют модели, в основе которых лежит конкретный физический закон. Основной физически обоснованной моделью освещения является преобразование светового излучения на гладкой границе раздела сред воздух-диэлектрик. Такая модель основана на законах Френеля, позволяющих, зная свойства материала, определять сколько света отражается и сколько преломляется, и какое состояние поляризации будет у отраженного и преломленного света.

Если мы имеем дело с рассеивающей средой или с шероховатой поверхностью, то в этом случае также можно рассчитать ее поведение, т. е. построить некую физически обоснованную модель, например дифракционную, затем по ней рассчитать ДФР. После этого, используя полученную ДФР в виде таблицы с аппроксимацией между табличными значениями можно применить для рендеринга.

Эмпирические модели позволяют подбором ряда параметров осуществить “подгонку” под ожидаемый внешний вид материала. Эмпирическую модель можно представить следующим образом. Такая модель имеет некий набор внешних ручек, вращая которые можно влиять на результат моделирования, и таким образом получать требуемый результат.

Таким методом можно получить хороший результат. Но главным недостатком такого метода является его ненадежность, которая выражается в том, что, построив внешнюю модель и настроив ее параметры под результат измерений или фотографии при определенных условиях освещения, мы можем получить совершенно неподходящий результат в случае других условий освещения или изменения геометрии визуализируемого объекта.

3.4.3. Прямое и вторичное освещение

В компьютерной графике выделяют два типа освещения: прямое, также называемое первичным, и вторичное. Под прямым освещением понимают такое освещение, при котором свет от источника излучения, распространяясь в сцене, попадает на освещаемый объект непосредственно, без взаимодействия с

каким-либо другими объектами сцены или, другими словами, напрямую, как показано на рисунке 3.4.3.

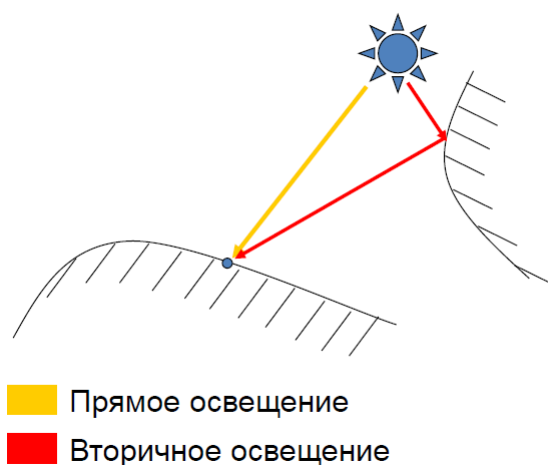


Рис. 3.4.3. Прямое и вторичное освещение

Под вторичным освещением понимают такое освещение, при котором свет попадает на освещаемый объект не напрямую от источника излучения, а после отражения или преломления другим объектом сцены (красный луч на рис.2.4.3).

В случае прямого освещения результат моделирования, например освещенность или яркость в точке на объекте сцены, рассчитать довольно просто, воспользовавшись радиометрическими формулами. В случае же вторичного освещения расчет радиометрических величин существенно усложняется необходимостью решения уравнения рендеринга (3.3.1).

3.4.4. Локальные и глобальные модели освещения

В зависимости от того какое освещение, первичное или вторичное, учитывается в модели освещения, модели подразделяются на локальные и глобальные. Локальные модели ограничиваются сбором только прямого освещения, в то время как в глобальной модели собирается вторичное освещение.

К локальному освещению относят и, так называемое рассеянное освещение (или в англоязычной литературе *ambient illumination*). Это такое освещение, которое вводится специально для подсветки (усиления яркости) резких теневых областей, вызванных прямым освещением. Процедура добавления такого

равномерно рассеянного по всей сцене освещения носит искусственный, не совсем физически корректный характер, но позволяет визуализировать все области сцены.

3.4.5. Примеры моделей освещения

Рассмотрим далее примеры конкретных моделей освещения, широко используемых в компьютерной графике. Начнем с эмпирических моделей освещения. Первая и наиболее часто используемая из них это ламбертовская модель освещения.

Ламбертовская модель освещения построена таким образом, что яркость освещаемой поверхности, формируемая отраженным от этой поверхности световым потоком, будет одинаковой для любых направлений освещения и наблюдения. Выражение для расчета яркости в такой модели выглядит следующим образом

$$L = \frac{1}{\pi} K_d E \quad (3.4.5.1)$$

где:

K_d – коэффициент диффузного отражения;

E – освещенность

В случае точечного источника света, расположенного на конечном расстоянии, освещенность определяется выражением (2.12). В случае бесконечно удаленного точечного источника или, другими словами, параллельного света освещенность будет определяться поверхностной плотностью светового потока.

Ламбертовская модель считается самой простой моделью освещения. Она позволяет описывать отражение идеально диффузных поверхностей. И, если сцена не содержит зеркальных поверхностей, то использование ламбертовской модели позволяет получить довольно реалистичные изображения. Кроме того, ламбертовская модель очень удобна для расчета глобального освещения поскольку яркость поверхности не зависит от направления освещения и, таким образом, позволяет избавиться от двух размерностей направления освещения при расчете яркости. Нам достаточно накапливать в точке поверхности освещенность, чтобы потом, после трассировки большого количества лучей, преобразовать ее в яркость.

Примерами реальных материалов, очень близких по свойствам к идеальным диффузорам или, другими словами,

ламбертовским отражателям, можно считать молочное стекло и сажу.

Модель освещения Фонга. Особенностью этой модели является то, что для реалистичного моделирования изображения объектов, свойства которых близки к зеркальным, в выражение для расчета яркости освещаемого объекта к яркости ламбертовского отражателя добавляется эмпирическая составляющая

$$L = L_i(K_d(\vec{s} \cdot \vec{n}) + cK_s(\vec{r} \cdot \vec{v})^{k_e}) \quad (3.4.5.2)$$

где:

- L_i – яркость источника света;
- K_d – коэффициент диффузного отражения;
- K_s – коэффициент зеркального отражения;
- \vec{s} – направление на источник света;
- \vec{n} – нормаль к поверхности;
- \vec{r} – направление зеркального отражения;
- \vec{v} – направление наблюдения;
- k_e – степень убывания яркости;
- c – масштабный множитель (коэффициент блеска).

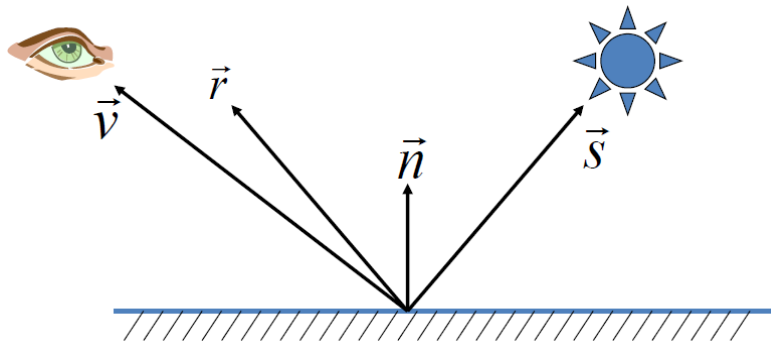


Рис. 3.4.5.1. К вычислению отражения по Фонгу

Следует иметь в виду, что угол между направлением наблюдения и направлением зеркального отражения не должен быть больше 90 градусов. В противном случае скалярное произведение $\vec{r} \cdot \vec{v}$ будет меньше нуля, что приведет к отрицательному значению яркости.

На рис.3.4.5.2 представлена серия изображений полученных

с использованием различных моделей освещения.

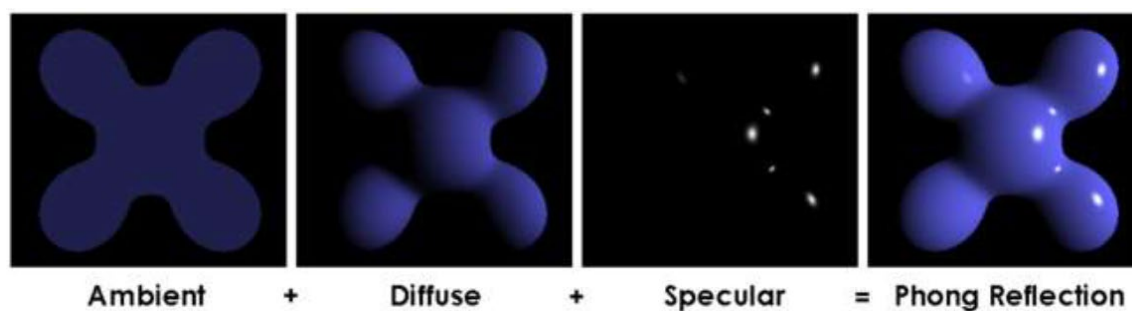


Рис. 3.4.5.2. Пример изображения, полученного с использованием модели освещения Фонга

Слева изображение объекта с постоянным альбедо по всей поверхности, освещенного равномерным рассеянным освещением. Фигура в этом случае выглядит плоской. Во втором случае к свойствам поверхности объекта была добавлена диффузность (свойство ламбертовского отражателя), что привело к появлению полутеней, подчеркивающих объемность фигуры объекта. На третьем изображении представлены зеркальные блики вызванные добавочным членом модели Фонга. И, наконец, крайнее правое изображение демонстрирует финальный результат применения модели Фонга, т. е. результат суммарного влияния ламбертовского и зеркального отражения.

К сожалению, модель Фонга не поддерживает закон обратимости. Поэтому ее можно применять только при обратной трассировке лучей.

Модель освещения Блинн-Фонга. Особенностью модели, по сравнению с моделью Фонга, является то, что в модели Блинн-Фонга соблюдается закон обратимости. Выражение для расчета яркости в модели Блинн-Фонга выглядит следующим образом

$$L = L_i(K_d(\vec{s} \cdot \vec{n}) + cK_s(\vec{h} \cdot \vec{n})^{k_e}) \quad (3.4.5.3)$$

где:

- L_i – яркость источника света;
- K_d – коэффициент диффузного отражения;
- K_s – коэффициент зеркального отражения;
- \vec{s} – направление на источник света;
- \vec{n} – нормаль к поверхности;

\vec{v} – направление наблюдения;
 $\vec{h} = \frac{(\vec{v} + \vec{s})}{2}$ – среднее направление между направлениями
 освещения и наблюдения;
 k_e – степень убывания яркости;
 c – масштабный множитель (коэффициент блеска).

Данная модель работает несколько быстрее модели Фонга, поскольку не необходимости вычислять зеркальное отражение.

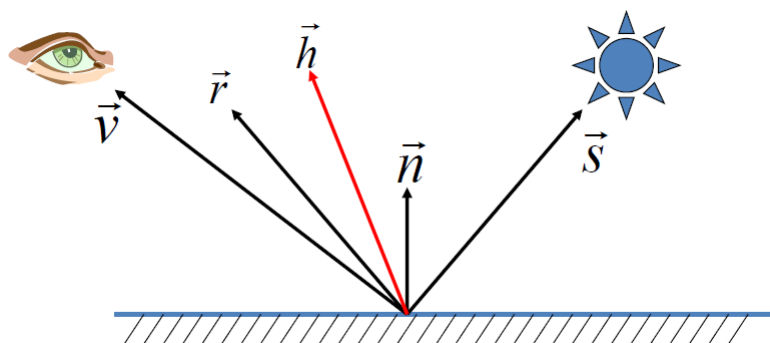


Рис. 3.4.5.3. К вычислению отражения по Блинн-Фонгу

На рисунке представлены изображения полученные с использованием модели освещения Блинн-Фонга. Очень похоже на результат, полученный по модели Фонга, но имеет более широкий блик.

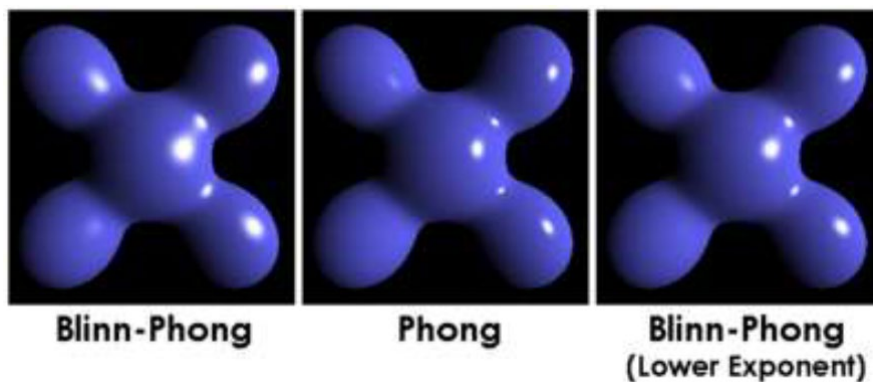


Рис. 3.4.5.4. Пример изображения, полученного с использованием модели освещения Блинн-Фонга

С точки зрения визуального восприятия модели Фонга и Блинн-Фонга дают выразительный результат. При этом, без каких-

либо трудоемких вычислений.

Модель освещения Лафортюна. Это параметрическая модель, основанная на модели Фонга. Специально разработана для подгонки измеренных ДФО под модели с небольшим числом параметров. Данная модель представляет из себя сочетание трех Фонгов, которыми можно управлять по разным осям координат.

$$f_r(p, \omega_o, \omega_i) = \frac{K_d}{\pi} (\omega_o \cdot R(\omega_i, n))^e \quad (3.4.5.4)$$

$$f_r(p, \omega_o, \omega_i) = \frac{K_d}{\pi} (\omega_o \cdot (-\omega_{ix}, -\omega_{iy}, -\omega_{iz}))^e \quad (3.4.5.5)$$

$$f_r(p, \omega_o, \omega_i) = \frac{K_d}{\pi} (\omega_o \cdot (o_{ix}\omega_{ix}, o_{iy}\omega_{iy}, o_{iz}\omega_{iz}))^e \quad (3.4.5.6)$$

где:

$f_r(p, \omega_o, \omega_i)$ – ДФР;

o_{ix}, o_{iy}, o_{iz} – параметры модели;

ω_i – направление освещения;

ω_o – направление наблюдения;

K_d – коэффициент диффузного отражения;

Управляя параметрами модели Лафортюна можно получить более корректный и выразительный результат, чем при использовании модели Фонга [18]. Но, как и для всех эмпирических моделей, назначение параметров, дающих реалистичный результат, требует определенного опыта.

Перейдем далее к физически обоснованным моделям.

Френелевская модель определяет отношение отраженного или преломленного потока светового излучения к падающему на поверхность раздела двух сред потоку излучения. Выражения для определения отношения отраженного потока к падающему выглядят следующим образом:

$$R_s = \left[\frac{\sin(\theta_t - \theta_i)}{\sin(\theta_t + \theta_i)} \right]^2 = \left[\frac{n_1 \cos(\theta_i) - n_2 \cos(\theta_t)}{n_1 \cos(\theta_i) + n_2 \cos(\theta_t)} \right]^2 \quad (3.4.5.7)$$

$$R_p = \left[\frac{\tan \theta_t - \theta_i}{\tan \theta_t + \theta_i} \right]^2 = \left[\frac{n_1 \cos(\theta_t) - n_2 \cos(\theta_i)}{n_1 \cos(\theta_t) + n_2 \cos(\theta_i)} \right]^2 \quad (3.4.5.8)$$

где:

R_s и R_p – коэффициент отражения по энергии для s и p поляризации соответственно;

θ_i – угол падения;
 θ_t – угол преломления;
 n_1 – показатель преломления среды распространения падающего потока излучения;
 n_2 – показатель преломления среды распространения преломленного потока излучения.

Данная модель справедлива в случае, когда граница раздела двух сред гладкая, среды изотропны, угол отражения равняется углу падения, а угол преломления определяется законом Снеллиуса.

На рисунке 3.4.5.5 представлена зависимость коэффициентов пропускания и отражения от угла падения света для случая а) падение светового излучения на поверхность раздела сред со стороны менее оптически плотной среды (воздуха) и случая б) падение светового излучения на поверхность раздела сред со стороны более оптически плотной среды (стекла).

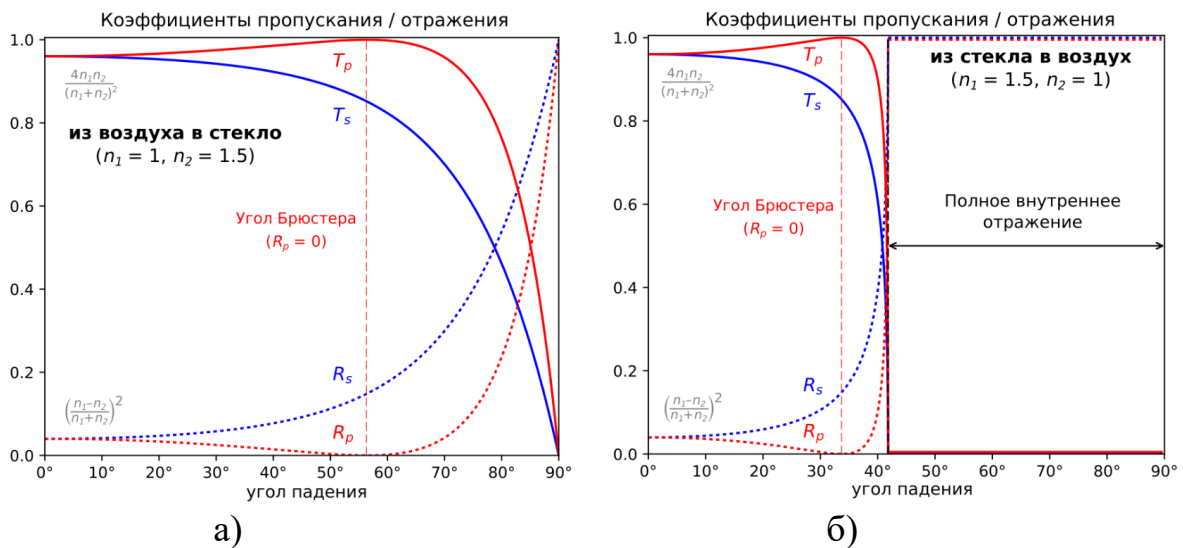


Рис. 3.4.5.5. Зависимость коэффициентов пропускания и отражения от угла падения света

Из графика видно, что при величине угла падения равной углу Брюстера, коэффициент отражения для p поляризации становится равным нулю и, таким образом, весь отраженный свет будет линейно поляризован в плоскости перпендикулярной плоскости падения. Также хорошо видно, что с ростом угла падения более угла Брюстера, коэффициент отражения резко

возрастает и, таким образом, при скользящих углах падения падающий световой поток практически полностью отражается от границы раздела сред.

Микрофасетные модели представляют поверхность в виде набора плоских микрофасет или микрограней. Отражение от поверхности микрофасеты может быть задано либо постоянной величиной, либо рассчитываться по формуле Френеля, либо задаваться по результатам измерений коэффициента отражения на специально изготовленном плоском образце.

Существует несколько типов микрофасетных моделей:

1. Геометрическая модель
2. Статистическое распределение микрограней
3. ДФО каждой микрограней

В случае использования первой модели мы работаем напрямую с геометрией каждой микрограней. То есть луч при трассировке взаимодействует с конкретной микрогранью моделируемой поверхности, отражается от нее и, возможно, претерпевает переотражение от соседних микрограней. Такая модель будет физически корректной в случае, если размер микрограней существенно превышает длину волны. Недостаток такой модели заключается в невозможности расчета яркости на заданной таким образом поверхности. Когда мы смотрим на освещенную шероховатую поверхность мы не видим отдельных микрограней, поскольку их размер очень мал, по сравнению с расстоянием на котором мы их наблюдаем. Отражение от каждой микрограней сливается в одно целое, и мы видим яркость, формируемую этой шероховатой поверхностью. Если при моделировании используется метод трассировки лучей, то мы не можем на такой поверхности рассчитать яркость, поскольку в данном случае поверхность не диффузная, а представляет собой сложное зеркало. Таким образом, приходится переносить расчет яркости на диффузные поверхности, находящиеся дальше по ходу луча.

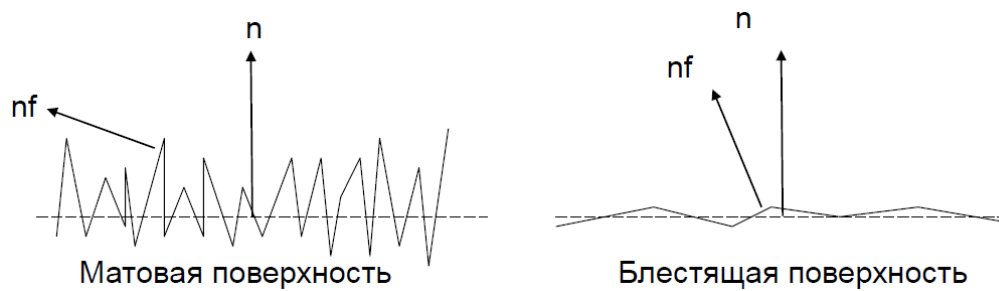


Рис. 3.4.5.6. Статистическое распределение микрофасет (микрораней)

Если микрораней очень маленькие (существенно меньше длины волны), как на рисунке 3.4.5.6 слева то в случае лучевого подхода мы получим картину расходящихся во все стороны отраженных лучей. В реальности же, если длина волны света значительно больше размера микрораней, то отдельные микрораней практически не повлияют на падающую на поверхность световую волну, и после падения на поверхность световая волна претерпит зеркальное отражение.

Одной из наиболее простых моделей, имеющих в своей основе микрофасетную модель шероховатой поверхности, является модель Кука-Торренса.

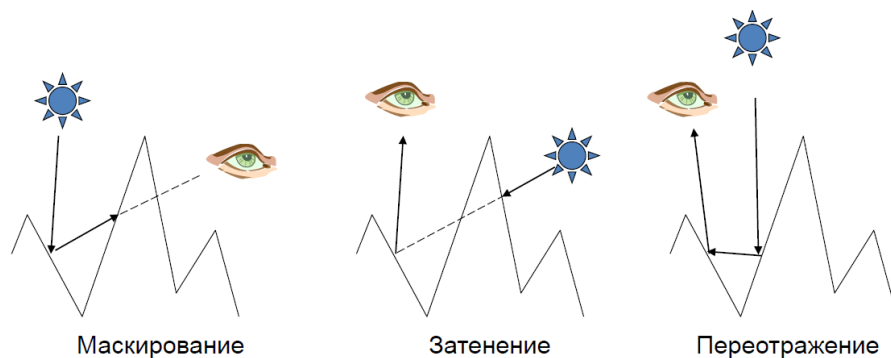


Рис. 3.4.5.7. Основные эффекты микрофасетной модели

Модель Кука-Торренса [19], [20] учитывает вероятность того, что какая-то часть света будет маскироваться, затеняться или переотражаться (см. Рис. 3.4.5.7). Кроме того, учитывается плотность вероятности распределения нормалей ω_n микрофасет. Каждая микрораней предполагается идеально зеркальной (Рис.3.4.5.8). ДФО всей шероховатой поверхности в модели Кука-

Торренса определяется следующим выражением:

$$f_r(p, \omega_o, \omega_i) = \frac{D(\omega_n)G(\omega_o, \omega_i)F_r(\omega_o)}{4 \cos \theta_o \cos \theta_i} \quad (3.4.5.9)$$

где:

$D(\omega_n)$ - плотность распределения нормалей к микрограням;

$G(\omega_o, \omega_i)$ - вероятность маскирования или затенения;

$F_r(\omega_o)$ - коэффициент френелевского отражения.

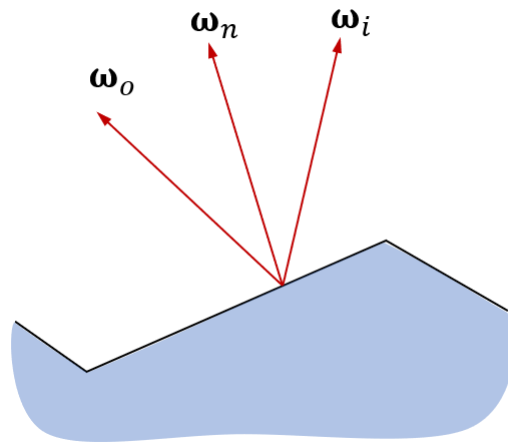


Рис. 3.4.5.8. Зеркальное отражение от микрограней шероховатой поверхности.

3.5. Вопросы для самоконтроля усвоенных знаний

Следующие вопросы позволят оценить степень усвоения знаний по разделу взаимодействие света и материала.

1. Какие типы взаимодействия света и материала вы знаете? Какими характеристиками они определяются?
2. В чем физический смысл ДФО? Как связать ДФО с двунаправленным коэффициентом яркости поверхности, если последний есть отношение яркости в направлении наблюдения к яркости идеального ламбертовского отражателя при тех же условиях освещения?
3. Какие два основных принципа присущи ДФО. Как на основании этих физических принципов можно проверить физическую корректность модели ДФО.
4. В чем физический смысл уравнения рендеринга? Какие основные проблемы возникают при его решении? Что такое яркость прямого видения и яркость прямого освещения, как их можно вычислить?
5. Сформулируйте основные требования к моделям освещения в компьютерной графике.
6. Приведите примеры физически обоснованных и эмпирических моделей освещения.
7. В чем принципиальное различие между локальными и глобальными моделями освещения?
8. Охарактеризуйте ламбертовскую модель освещения.
9. Какие модели освещения позволяют реалистично визуализировать объекты, свойства которых близки к зеркальным?
10. Какие модели позволяют корректно учитывать эффекты затенения, маскирования и переотражения на шероховатой поверхности?

4. Цвет. Цветовые пространства. Гамма-коррекция

4.1. Цвет

4.1.1. Цветность и яркость. Задача описания цвета в компьютере

Восприятие человека позволяет различать следующие свойства света: яркость (brightness, luminance), оттенок (hue), насыщенность (saturation) и цвет (color). В этой главе мы рассмотрим аспекты, связанные с восприятием цвета, а именно оттенок и насыщенность. Их нельзя целиком отделить от вопросов восприятия яркости, но подробное рассмотрение этих вопросов мы проведём в разделе “Гамма-коррекция”.

Теорию цвета [21], [22] необходимо изучить для разработки алгоритмов, позволяющих добиться точной передачи цвета. Зададимся вопросом, как соответствуют друг другу: цвет, который мы видим в реальности, цвет этого же объекта на экране монитора или проектора, цвет на распечатке фотографии, в графическом редакторе, при использовании OpenGL?.. Ответ будет разъяснён в этой главе.

Итак, наша задача - описать цвет в машинном представлении. При этом возникает 2 основные проблемы:

- 1) Ограниченность дискретными конечными числами.
- 2) Сама возможность представления цвета в виде чисел.

Обе проблемы решаются простым квантованием спектра. Если квантовать энергетический спектр с некоторым шагом (обычно берется шаг 10 нм) и использовать такое представление, то при дискретизации спектра 380-780нм по 10 нм на один пиксель потребуется 40 вещественных чисел. Для цветного изображения размером 1024x1024 пикселей это будет означать, что оно займёт в памяти 160 Мб! Однако это простое решение проблемы представления цвета оказывается избыточным.

4.1.2. Структура и функционирование человеческого глаза

Первичный орган зрительной системы - глаз (рис. 4.1). Это

сенсорный орган зрения, преобразующий энергию видимого света в биоэлектрические сигналы нервной системы. Человеческий глаз состоит из светопреломляющего, аккомодационного, адаптационного и рецепторного аппарата.

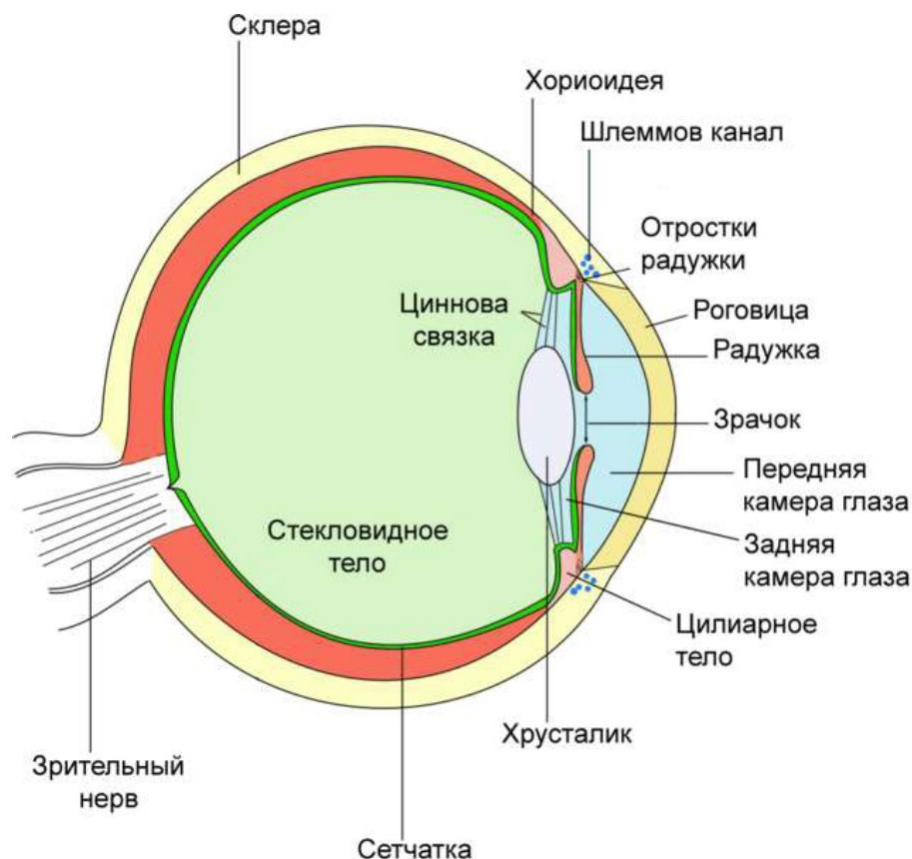


Рис. 4.1. Устройство человеческого глаза

Светопреломляющий аппарат глаза устроен несколько сложнее, чем может показаться на первый взгляд. Свет поступает на поверхность роговицы глаза, где испытывает первое и второе преломление (на входе в переднюю камеру глаза), затем достигает зрачка, где за счёт малого размера может произойти дифракция. Сильное преломление луча происходит на входе и выходе из хрусталика. В дальнейшем луч аберрирует, проходя через все слои сетчатки. И только после этого он достигает окончаний фоторецепторных клеток.

Механизм аккомодации помогает хрусталику (преломляющей биологической линзе) изменять радиус кривизны, за счет чего регулируется расстояние фокусировки. Благодаря этому человек с

нормальным зрением способен четко различать как близкие, так и удаленные объекты.

Зрачок человека также способен менять размер благодаря радужке, это позволяет адаптироваться к изменяющемуся уровню яркости. В темноте зрачки расширяются, при ярком свете сужаются. Это лишь один из уровней адаптации в зрительной системе, регулирующий объем светового потока.

Сетчатка состоит из нескольких слоев, последний из них (ганглиозные клетки) формирует нейронную сеть для передачи сигнала зрительному нерву. В дальнейшем из всех слоев сетчатки нас будет интересовать только устройство рецепторного слоя. Фоторецепторные клетки бывают двух типов: светочувствительные палочки и цветочувствительные колбочки. Они работают при разных уровнях освещенности. Палочки срабатывают даже от нескольких фотонов, поэтому работают у человека в условиях ночи. Колбочки дают более детализированное изображение, но требуют больше энергии для срабатывания. Они обеспечивают дневное зрение.

Палочки и колбочки по-разному распределены на сетчатке. В центральной области желтого пятна (области наилучшего зрения) преобладают колбочки, на периферии палочки. Колбочки с разной интенсивностью реагируют на свет определенных длин волн. Всего есть 3 типа колбочек, каждая из которых реагирует на свой диапазон спектра: длинноволновые красные колбочки (Д), средневолновые зеленые колбочки (С) и коротковолновые синие колбочки (К). На рисунке 4.2 приведен график относительной чувствительности палочек к монохроматическому излучению разных длин волн.

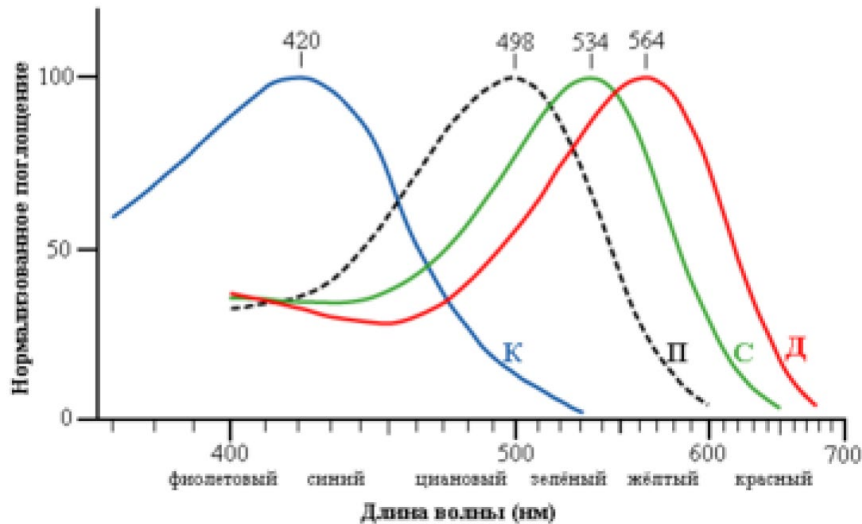


Рис. 4.2. Относительные отклики фоторецепторных клеток сетчатки глаза человека

4.1.3. Трихроматическая теория

Экспериментальные данные о цветовом восприятии человека позволили выдвинуть так называемую трихроматическую теорию. Идея высказывалась давно (в том числе М. В. Ломоносовым), но развилась и стала известна в 19 веке благодаря Юнгу, а затем Гельмгольцу. В дальнейшем в 20 веке она подтвердилась более тщательными нейрофизиологическими исследованиями.

Два основных постулата трихроматической теории цветового восприятия таковы:

- 1) Трихроматия (trichomasy) или трихроматизм (trichromatism). Весь спектр может быть сведен в точности к трем числам без потери информации для визуальной системы человека.
- 2) Метамеризм. Все спектры, создающие одинаковые отклики, неразличимы человеком. Такие спектры называются метамерами. На рисунке 4.3 приведен пример двух метамеров, дающих фиолетовый цвет.

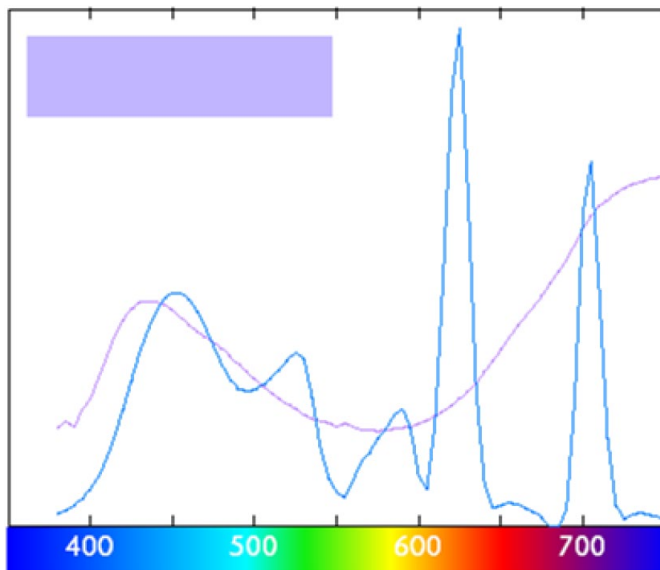


Рис. 4.3. Метамеры. По оси x отложена длина волны. Спектр, обозначенный голубой линией и спектр, обозначенный фиолетовой, с точки зрения человека дают одинаковый фиолетовый цвет.

Из этих двух постулатов можно сделать главный вывод: не нужно моделировать весь спектр. Для тех частей спектра, которые различает человек, достаточно трех чисел. Осталось понять, что это за числа. Это было выяснено с помощью оригинальных экспериментов по соответствию цветов, проведенных в 30-е годы 20-го века международной комиссией по освещению (CIE - Commission Internationale de l'Éclairage).

4.1.4. Эксперименты по воспринимаемому соответствию цветов

Три источника света были направлены на левую часть белого экрана (угловой размер экрана - 2 градуса) таким образом, что их цвет смешивался. Экспериментатор сидел перед экраном, ему давался пульт управления, состоящий из трех ручек, позволяющих управлять яркостью каждого из трех источников света. Затем на правой стороне экрана показывалась точка некоторого заданного цвета. Задача состояла в том, чтобы настроить ручки таким образом, до совпадения цветов двух точек (рис. 4.4). Лампы были настроены таким образом, чтобы интенсивность каждой контролировалась числом от -1 до 1. При 1 лампа включалась на полную мощность. Если ручка стояла на нуле, лампа была выключена. В положении меньше нуля свет лампы «вычитался» из результирующего. Это

достигалось путем увеличения соответствующей компоненты яркости правой точки.

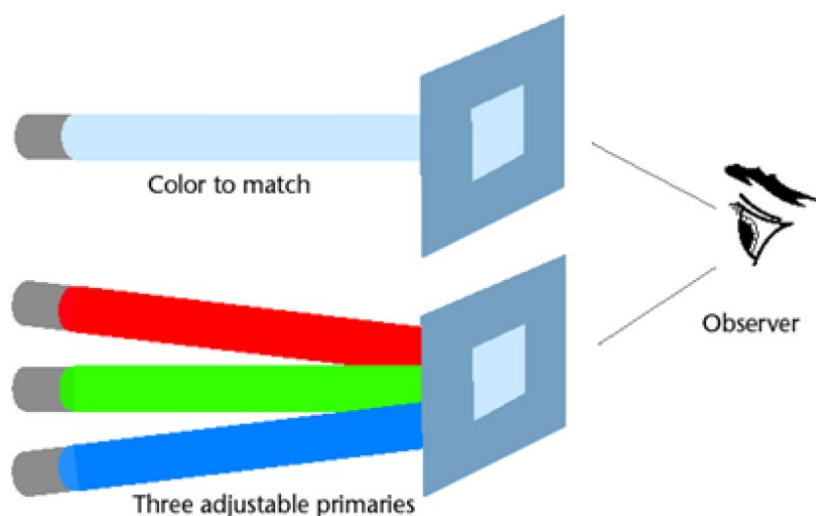


Рис. 4.4. Эксперименты по соответствию цветов

Заданные цвета пробежали спектр 380-780нм с шагом 5нм. Хотя можно пытаться найти соответствие любых цветов, чтобы уменьшить количество, работа велась с монохроматическими цветами. При этом источники света могут быть любые, но такие, чтобы третий нельзя было получить сложением первых двух с некоторыми коэффициентами.

Остановимся подробнее на том, зачем эксперимент был усложнен «вычитанием» цветов из результирующих. Если результирующий цвет может быть получен смешением трех других, то такое соответствие называется аддитивным (additive). Если же невозможно найти соответствие путем сложения цветов заданных базовых источников света, и необходимо для совпадения один из цветов прибавить к результирующему цвету, то такое соответствие называют субтрактивным (subtractive).

Аддитивное соответствие выражается формулой:

$$C = rR + gG + bB \quad (3.1)$$

где C - заданный цвет, R, G, B - цвета базовых источников света, а r, g, b - коэффициенты модулирования яркости источников.

Здесь равенство нужно понимать как воспринимаемое человеком соответствие цветов.

Субтрактивное соответствие можно задать как

$$C + rR = gG + bB \quad (3.2)$$

т. е. условная «красная» лампа прибавляется к заданному цвету вместо подбираемого.

Итак, в результате проведенных экспериментов положения рукояток можно использовать как хранимые коэффициенты для получения цвета любого монохроматического излучения. Однако есть проблемы - результаты верны только для конкретного наблюдателя, для заданных основных цветов (ламп) и только для монохроматических целевых цветов. Для практического использования необходимо расширить их на более широкий класс наблюдателей, на более широкий класс базовых цветов и на как можно более широкий класс целевых цветов.

Для решения первой проблемы обратимся к экспериментам по соответствию цветов, проведенных авторитетной организацией CIE в 1931 году. Эти эксперименты были проведены на достаточно большом количестве человек. Хотя результаты разных людей были разными, усредненный результат при заданных длинах волн для каждой из трех монохроматических ламп (эти длины волн примерно соответствовали пикам чувствительности разных типов колбочек) был принят за гипотетического стандартного наблюдателя. Поэтому можно считать, что результаты экспериментов могут быть применены к любому человеку с нормальным зрением. Построенные кривые называют кривыми стандартного наблюдателя (рис. 4.5).

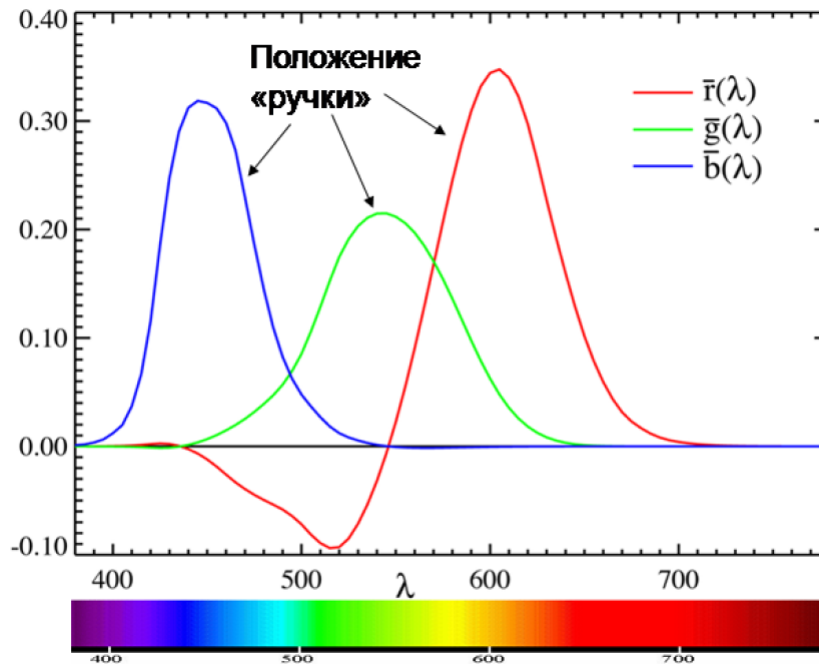


Рис. 4.5. Кривые стандартного наблюдателя

4.2. Закон аддитивности Грассмана

Мы знаем:

- что любое излучение можно представить как сумму монохроматических излучений разной интенсивности (амплитуды волны), т. е. $C = \int_{380}^{780} C(\lambda) d\lambda$
- что любой цвет может быть описан тройкой чисел (трихроматия);
- как представить монохроматические цвета с помощью тройки чисел (из экспериментов CIE) для данных базовых цветов

Возможно ли на основе этой информации найти тройки чисел любого (не обязательно монохроматического) цвета? Ответ - да. Нам на помощь приходит так называемый закон аддитивности Грассмана - эмпирический закон о линейности хроматического человеческого зрения:

- Если наблюдатель задаст цвета лучей 1 и 2 как (R_1, G_1, B_1) и (R_2, G_2, B_2) (где R, G, B - коэффициенты для заданных базовых источников света), и мы сложим эти

источники света, то результирующий цвет может быть получен из базовых источников света как $(R_1 + R_2, G_1 + G_2, B_1 + B_2)$.

- Вторая часть закона говорит о том, что соответствие цветов выполняется на всех уровнях интенсивности, т.е. если $C_1 = C_2$, то $kC_1 = kC_2$ (за исключением очень низких и очень высоких уровней интенсивности источников).

Неоднозначность при переводе из RGB/XYZ в спектр

Следствием из закона аддитивности Грассмана является то, что мы можем получить бесконечный набор соответствующих цветов, зная коэффициенты только конечного набора. Любое спектральное распределение может быть получена как взвешенная сумма монохроматических источников. То есть если задать соответствия этих цветов для некоторых базовых источников света, то цвет любого спектрального света будет взвешенной суммой коэффициентов монохроматических цветов.

Пусть спектр светового излучения задан функцией $C(\lambda)$, известны кривые стандартного наблюдателя (для заданных базовых источников R, G, B) $x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$, тогда для монохроматического излучения на волне λ_i получить воспринимаемое соответствие можно будет с помощью коэффициентов

$$\begin{aligned} X &= C(\lambda_i)x(\lambda_i) \\ Y &= C(\lambda_i)y(\lambda_i) \\ Z &= C(\lambda_i)z(\lambda_i) \end{aligned}$$

Суммируя по всему спектру, получаем:

$$\begin{aligned} X &= \int_{380}^{780} C(\lambda_i)x(\lambda_i) d\lambda \\ Y &= \int_{380}^{780} C(\lambda_i)y(\lambda_i) d\lambda \\ Z &= \int_{380}^{780} C(\lambda_i)z(\lambda_i) d\lambda \end{aligned}$$

На рисунке 4.6 приведен пример входного спектра (красная линия). Это спектр стандартного источника D65, ему соответствуют координаты $X = 1.0044e+04$, $Y = 1.0567e+04$, $Z = 1.1507e+04$. Зеленой линией показан спектр, полученный путем умножения коэффициентов на кривые стандартного наблюдателя. Как мы видим, полученный спектр не совпадает с исходным. Из трихроматического пространства мы не можем однозначно получить исходный спектр.

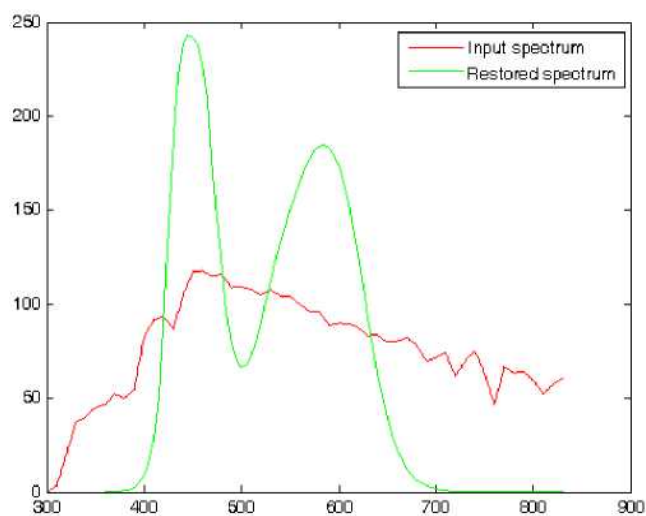


Рис. 4.6. Спектр источника D65 и результат его восстановления по базисным функциям

4.3. Цветовые пространства

4.3.1. Цветовое пространство CIE RGB

Кривые стандартного наблюдателя и спецификация базовых источников света задают трехмерное цветовое пространство CIE RGB.

Для любого спектра возможно получение координат в этом пространстве. Процедура их получения была описана в предыдущем пункте. В результате проведенных экспериментов кривые базовых источников были зафиксированы и названы кривыми стандартного наблюдателя $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ (рис. 4.5).

Поскольку часть кривой $\bar{r}(\lambda)$ лежит в отрицательной области, то не все спектры, порождаемые этим пространством, являются видимыми.

4.3.2. Переход между цветовыми пространствами

Предположим, что мы хотим создать другое цветовое пространство с источниками $X(\lambda)$, $Y(\lambda)$, $Z(\lambda)$. Например, это могут быть реальные источники света для пикселей в LCD-мониторе, проекторе или цвета красок в принтере. Соответственно, необходимо знать коэффициенты яркости именно этих источников, которые позволят нам задавать цвета, привязанные к физически воспринимаемым человеком цветам.

Пусть мы знаем цветовые координаты каждого из трех наших источников в системе CIE RGB (r_1, g_1, b_1) , (r_2, g_2, b_2) , (r_3, g_3, b_3) , т.е. с точки зрения воспринимаемого соответствия цветов:

$$\begin{aligned} X &= r_1 R + g_1 G + b_1 B \\ Y &= r_2 R + g_2 G + b_2 B \\ Z &= r_3 R + g_3 G + b_3 B \end{aligned}$$

Следовательно:

$$\begin{aligned}
C &= xX + yY + zZ \\
&= x(r_1R + g_1G + b_1B) + y(r_2R + g_2G + b_2B) \\
&\quad + z(r_3R + g_3G + b_3B) \\
&= (xr_1 + yr_2 + zr_3)R + (xg_1 + yg_2 + zg_3)G \\
&\quad + (xb_1 + yb_2 + zb_3)B
\end{aligned}$$

Заметим, что коэффициенты при R , G , B формируют оператор перехода из базиса пространства XYZ к базису пространства CIE RGB:

$$\begin{aligned}
r &= xr_1 + yr_2 + zr_3 \\
g &= xg_1 + yg_2 + zg_3 \\
\mathbf{b} &= \mathbf{x}b_1 + \mathbf{y}b_2 + \mathbf{z}b_3
\end{aligned}$$

и могут быть записаны в матричном виде следующим образом:

$$\begin{pmatrix} r \\ g \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ g_1 & g_2 & g_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

Итак, преобразование между любыми линейными цветовыми пространствами - линейное преобразование. Т.е. если мы хотим определить свою цветовую систему, нам необходимо задать параметры базовых источников света, выраженных в координатах другой цветовой системы, для которой известно преобразование в CIE RGB. Понятно, что создавать «цепочки» преобразований до прихода к одной из CIE-систем не самая лучшая практика, поэтому разумно выбрать одно цветовое пространство и считать его стандартом, матрицы перехода в которое должны задавать все другие пространства.

4.3.3. Цветовое пространство CIE XYZ 1931. Диаграмма цветности

В начале главы мы упоминали, что сетчатка глаза имеет три вида колбочек, отвечающих за цветное зрение. Каждый тип рецептора с разной силой реагирует на видимый свет определённых длин волн. Цветовая модель LMS основана на откликах колбочек человеческого глаза (рис. 4.7). Исторически сложилось, что для измерения цвета используется другое цветовое пространство — XYZ. В 1931 году эта модель была разработана организацией CIE. С

тех пор она используется в качестве эталонной модели, с которой соотносятся все прочие цветовые модели.

Как было рассказано ранее, сначала в результате экспериментов были получены кривые CIE RGB. Члены комиссии решили придумать другое цветовое пространство, связанное с RGB линейным преобразованием. Оно должно было удовлетворять следующим свойствам:

- 1) Спектральные кривые нового цветового пространства должны быть неотрицательны. В то время это было полезно для упрощения вычислений.
- 2) Кривая $\bar{y}(\lambda)$ должна была в точности быть равной кривой спектральной чувствительности стандартного наблюдателя $V(\lambda)$. Эта функция описывает изменение воспринимаемой яркости в зависимости от длины волны. Факт, что можно было получить ее из линейной комбинации кривых RGB не был гарантирован, но ожидался.
- 3) Точка белого (точка на диаграмме цветности, соответствующая белому цвету в данной модели) помещается в точке равной энергии $x = y = z = 1/3$.
- 4) Видимый диапазон цветов в пространстве rg (см. рисунок 4.8) должен оказаться внутри треугольника $[1,0]$, $[0,0]$, $[0,1]$. Требовалось, чтобы он как можно плотнее заполнил этот треугольник.
- 5) Было обнаружено, что можно положить функцию $\bar{z}(\lambda)$ равной нулю ниже 650 нм без превышения ошибки наблюдения.

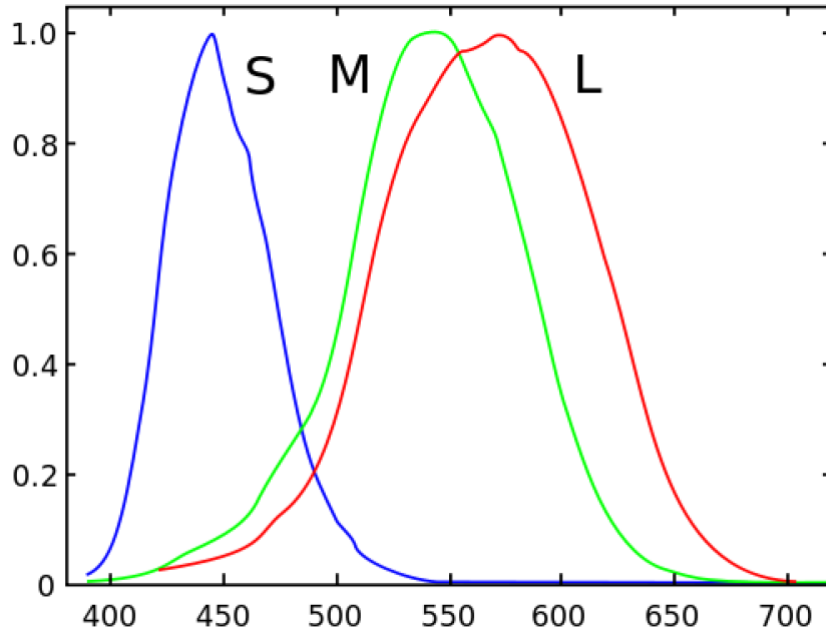


Рис. 4.7. Спектральные кривые в модели LMS

В терминах геометрии выбор нового пространства эквивалентен выбору нового треугольника в хроматическом пространстве. Это должен быть описывающий область видимых цветов треугольник, исходя из требования 1. Линия $C_r C_b$ фиксируется по требованию 2. По требованию 5 линия $C_g C_r$ должна быть касательной к границе цветового охвата. Точка C_r определена. Требование 4 накладывает ограничения на линию $C_b C_g$. Таким образом получилось линейное преобразование:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \frac{1}{g_1} \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ g_1 & g_2 & g_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} 0.49 & 0.31 & 0.20 \\ 0.17697 & 0.81240 & 0.01063 \\ 0.00 & 0.01 & 0.99 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

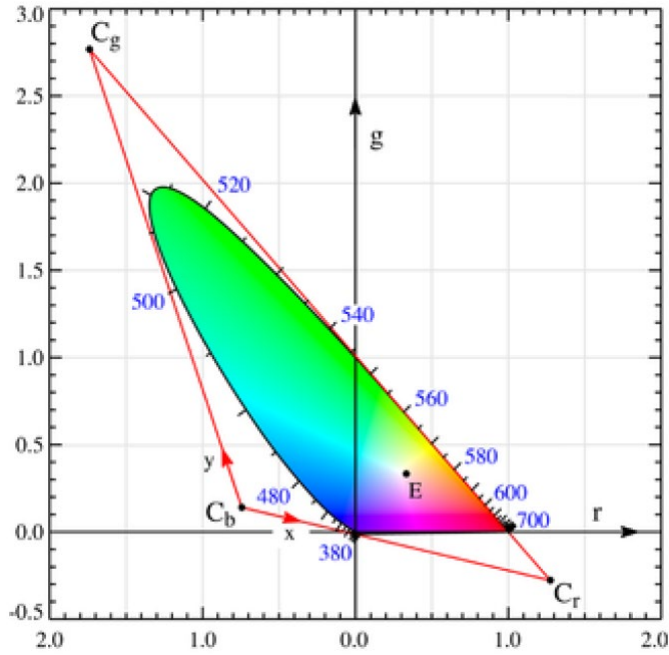


Рис. 4.8. Видимый диапазон цветов в пространстве $rg, r = R/(R + G + B), g = G/(R + G + B)$.

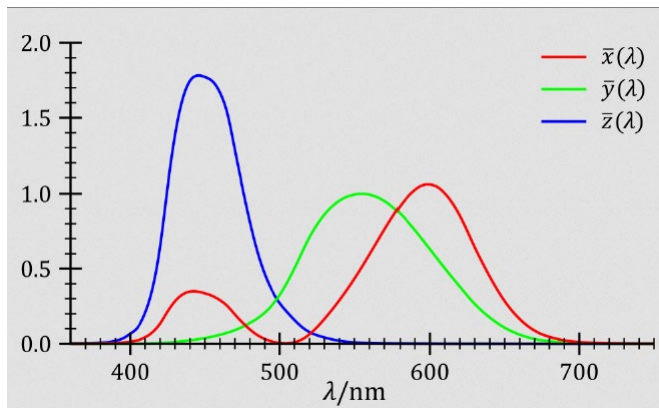


Рис. 4.9. Кривые перехода из пространства RGB в пространство XYZ

С помощью спектральных кривых цвет XYZ задается следующим образом:

$$X = \int_{380}^{780} I(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int_{380}^{780} I(\lambda)\bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \int_{380}^{780} I(\lambda)\bar{z}(\lambda) d\lambda$$

Компонента Y соответствует визуальной светлоте сигнала, координата Z почти соответствует отклику S-колбочек (чувствительных к синему цвету). Координата X определена таким образом, чтобы всегда быть неотрицательной. Кривые нормируются для соответствия площади. Благодаря такому введению координат, координаты в цветовом пространстве XYZ всегда неотрицательны. Однако, не для каждого цвета XYZ существует физический цвет.

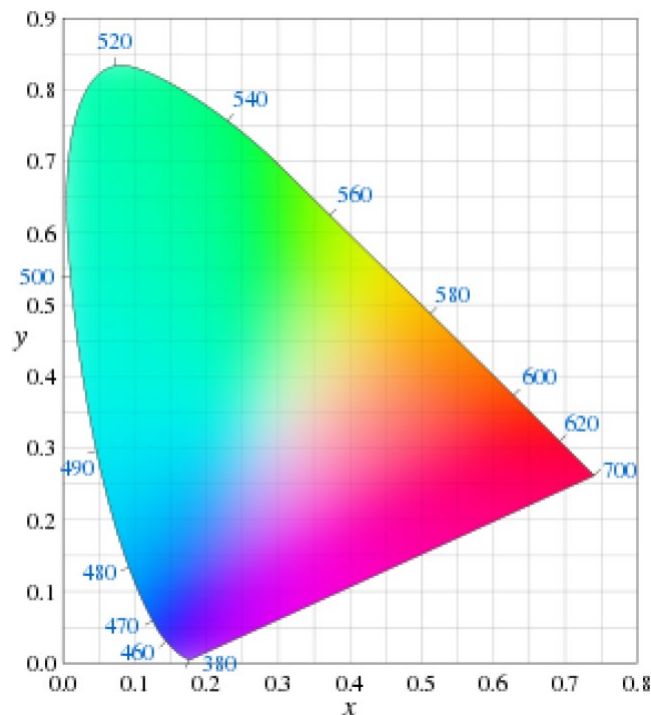


Рис. 4.10. Диаграмма цветности

Наглядную интерпретацию ограниченности физических цветов в пространстве XYZ дает диаграмма цветности. Диаграмма цветности (см. рис. 4.10) задается в специальных неотрицательных хроматических координатах Yx и представляет собой срез в пространстве XYZ по поверхности уровня $X+Y+Z = const.$ Преобразование из XYZ в xyY осуществляется по следующим

формулам:

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

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

На рисунке 4.10 представлена некоторая фигура, заключающая в себе все физически реализуемые цвета. Эти цвета ограничены незамкнутым контуром из монохроматических спектральных цветов. Все цвета за пределами контура существуют только в пространстве xY , но физически не соответствуют никакому реальному спектру. Эти цвета могут использоваться при расчетах.

Другие трихроматические модели отображаются на диаграмме цветности в виде треугольника. Модель способна представлять только те цвета, которые содержатся внутри данной фигуры. Множество таких точек на диаграмме цветности называется цветовым охватом (color gamut) цветовой модели. Иногда в качестве базовых цветов для трихроматического пространства могут выбираться такие физически не реализуемые цвета. В этом случае построенное пространство может заключать в себе все множество возможных цветов.

Поскольку модель XYZ исторически устоялась в качестве эталона, все другие модели сводятся к ней путем соответствующих математических преобразований.

4.3.4. Спецификация цветовых пространств. Точка белого

Вернемся к понятию цветового охвата и базовых (первичных) цветов. Как физические устройства, так и цветовые модели имеют разный цветовой охват. Этот охват в общем случае - некоторая области на диаграмме цветности. В случае не трихроматических моделей (например, для устройств печати) это может другой многогранник, в общем случае — произвольная область. Наибольшее распространение получили именно трихроматические цветовые пространства, наиболее известным из которых является модели RGB .

Дело в том, что RGB — не отдельная конкретная модель, а

целый класс цветовых моделей, использующихся для получения, хранения и обработки изображений. Как и другие цветовые модели, конкретные реализации модели *RGB* связаны с *XYZ* преобразованиями, поэтому возможна конвертация из одной реализации модели в другую. Характеристики *RGB* зависят от устройства. Например, у различных мониторов могут отличаться типы базовых излучающих элементов, у фотокамер могут различаться матрицы. В общем случае *RGB* определяется следующим набором параметров:

- базовыми цветами,
- точкой белого,
- показателем гамма-коррекции.

Базовые цвета соответствуют описанию базовых источников (фосфоров). Как было сказано, они ограничивают цветовой охват устройства. Напомним, что точка белого — это точка на диаграмме цветности, соответствующая белому цвету в данной модели. С понятием точки белого связано понятие цветовой температуры.

В реальном мире мы воспринимаем свет, отраженный от поверхностей окружающих объектов. При этом спектр отраженного света во многом определяется спектром источника в сцене.

Зачастую фотографии, снятые в помещении с лампой накаливания, впоследствии оказываются желтоватыми. В то же время человек этого изменения тона может не заметить. Это происходит потому, что человеческое зрение адаптируется к цветовой температуре источника. Для того чтобы фотография получилась качественной, фотограф корректирует значение цветовой температуры, соответствующее температуре источников. В современных цифровых фотоаппаратах это зачастую выполняется автоматически или полуавтоматически.

По определению цветовая температура — температура абсолютно чёрного тела, при которой оно испускает излучение того же цветового тона, что и рассматриваемое излучение. Характеризует относительный вклад излучения данного цвета в излучение источника, видимый цвет источника.

Ниже приведены значения цветовых температур для наиболее

распространенных источников освещения:

- 1500—2000 К — свет пламени свечи;
- 2680 К — лампа накаливания 60 Вт;
- 3000 К — лампа накаливания 200 Вт, галогенная лампа, люминесцентная лампа тёплого белого света;
- 3400 К — солнце у горизонта;
- 4000 К — люминесцентная лампа холодного белого света;
- 4300—4500 К — утреннее солнце и солнце в обеденное время;
- 5000 К — солнце в полдень;
- 5500 5600 К — фотовспышка;
- 5600—7000 К — люминесцентная лампа дневного света;
- 6500 К — стандартный источник дневного белого света, близкий к полуденному солнечному свету;
- 6500 7500 К — облачность;
- 7500 К — дневной свет, с большой долей рассеянного от чистого голубого неба;
- 7500 8500 К — сумерки;
- 15 000 К — ясное голубое небо в зимнюю пору.

На диаграмме цветности цветовая температура может быть отображена шкалой, начинающейся среди красных цветов и стремящейся к синим (рис. 4.11).

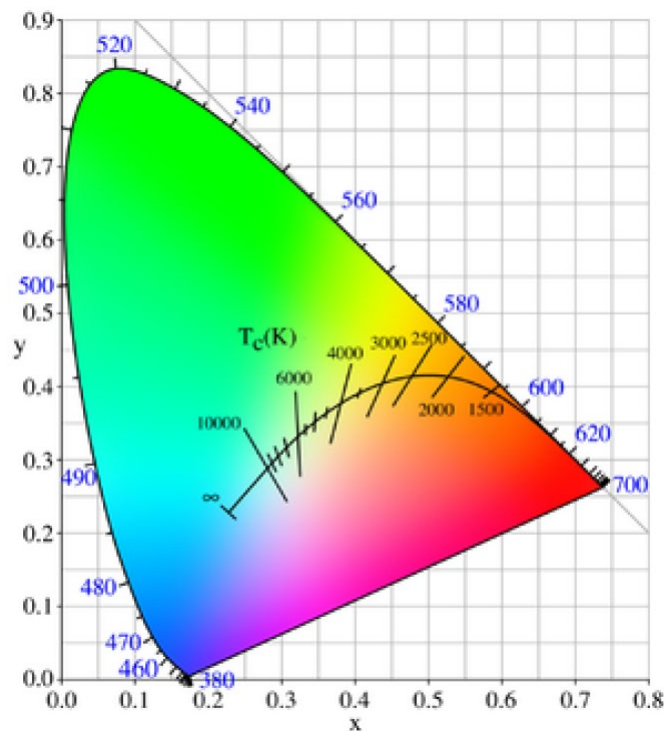


Рис. 4.11. Шкала цветовой температуры на диаграмме цветности

Существует некоторый набор стандартизированных точек белого — описаний модельных источников освещения, например D55, D65. Поэтому при описании цветных моделей часто просто называют такую точку белого.

Название	CIE 1931 x	CIE 1931 y	Цветовая температура
E (точка равной энергии)	1/3	1/3	5400
D55	0.33242	0.34743	5500
D65(sRGB)	0.31271	0.32902	6500
D75	0.29902	0.31485	7500
A (лампа накаливания)	0.44757	0.40745	2856

4.3.5. Цветовые профили RGB

Рассмотрим наиболее распространенные цветовые пространства *RGB*: *sRGB*, *Adobe RGB*, *ProPhoto*.

sRGB

sRGB - формат «по умолчанию», создавался для унификации использования модели *RGB* в мониторах, принтерах и сайтах в Интернете. *sRGB* объединил в себе стандартные основные цвета и гамма-коррекцию, благодаря чему его цвета отображаются на обычных CRT-мониторах и телевизорах. *sRGB* четко специфицирует показатель гаммы, однако выражает его не в виде фиксированного значения параметра, а в виде двух кусочно-заданных степенных функций. Приблизительно можно считать, что степень гамма-коррекции соответствует 2.2. Цветовой охват *sRGB* небольшой (около 35% видимых цветов). Для перевода линейных значений из пространства *XYZ* в *sRGB* используется следующая матрица:

$$M = \begin{pmatrix} 3.2406 & -1.5372 & -0.4986 \\ -0.9689 & 1.8758 & 0.0415 \\ 0.0557 & -0.2040 & 1.0570 \end{pmatrix}$$

Координаты точки белого, таким образом, составляют $\{X, Y, Z\} = \{0.9505, 1.0000, 1.0890\}$. Далее, для каждого канала *C* производится гамма-коррекция (будет рассмотрена позже):

$$C_{srgb} = 12.92C, C < 0.0031308$$

$$C_{srgb} = 12.92C^{\frac{1}{\gamma}} - 0.055, C < 0.0031308$$

ProPhoto RGB

Цветовое пространство ориентировано на печатный материал, имеет особо широкий цветовой охват. Содержит в себе 90% видимых цветов, в то же время 13% — это мнимые невидимые цвета. За счет этого теряется точность цветопередачи, а потому лучше использовать 16 бит на канал для кодирования (расширенный динамический диапазон, кодировка ERIMM RGB). Пространство редко применяется на практике из-за избыточности. Обычно вместо него используют другое цветовое пространство с расширенным цветовым охватом - *Adobe RGB*.

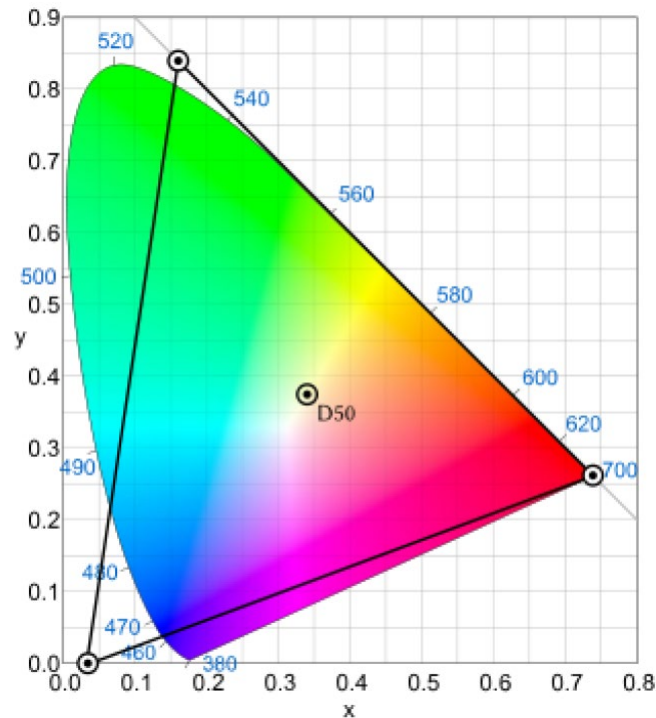


Рис. 4.12. Цветовой охват *ProPhoto RGB*

Adobe RGB

Цветовое пространство было введено в 1998. Основной целью было обеспечить доступность печатаемых цветов палитры CMYK используя базовые цвета, отображаемые на дисплее монитора. Цветовой охват модели намного шире, чем цветовой охват *sRGB*, но не такой широкий, как у *ProPhoto RGB*. Цветовое пространство покрывает примерно 50% видимых цветов. Ниже в таблице приведены параметры модели.

Параметр модели	Значение
Освещенность точки белого	160.00 $\frac{\text{кД}}{\text{м}^2}$
Освещенность точки черного	160.00 $\frac{\text{кД}}{\text{м}^2}$ (0.34731% точки белого)
Соотношение контраста	287.9
Уровень рассеянного света	32 люкс
Уровень освещенности дисплея	32.00 $\frac{\text{кД}}{\text{м}^2}$ (20% точки белого)
Окружающая освещенность	2.00 $\frac{\text{кД}}{\text{м}^2}$

Показатель гамма-коррекции 2.19921875. Матрица преобразования координат *XYZ* в *Adobe RGB*:

$$M = \begin{pmatrix} 1.96253 & -0.61068 & -0.34137 \\ -0.97876 & 1.91615 & 0.03342 \\ 0.02869 & -0.14067 & 1.34926 \end{pmatrix}$$

sRGB или *Adobe RGB*

sRGB задано по умолчанию для системы Windows. На экране стандартного монитора будет это пространство, поэтому готовя фото для выкладывания в интернет, лучше использовать его. То есть повышается совместимость. Также увеличивается точность отображения плавных цветовых переходов. Однако цветовой охват меньше, поэтому часть цветов теряется. Особенно это плохо при печати на устройствах CMYK, ведь часть потенциальных цветов CMYK не умещается в *sRGB*, предназначенного для отображения информации на мониторах.

Изначально цветное пространство *Adobe RGB* разрабатывалось для стандарта телевидения высокой четкости HDTV (High Definition Television) и печати. Оно включает в себя практически весь диапазон цветов CMYK, а также диапазоны цветов для таких устройств, как устройства записи на пленку. Поэтому при печати выдается тот цвет, который и был запечатлен, если аппаратура поддерживает профиль. В то же время в браузере картинки в этом формате смотрятся бледными. Другой недостаток - понижение точности представления данных, так как бит всего 8 на канал, а диапазон шире. Для компенсации можно использовать 16 бит на канал.

На рисунке 4.13 представлено сравнение цветового охвата трех рассмотренных цветовых пространств, а также цветовой охват чернил на бумаге.

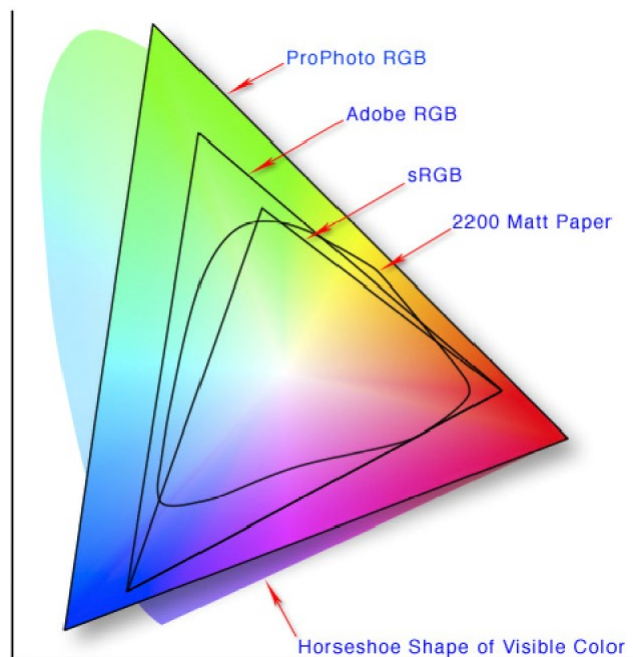


Рис. 4.13. Цветовой охват моделей *RGB* и печатных цветов

4.3.6. Отображение передаваемого диапазона (gamut mapping)

Из-за разного цветового охвата (gamut) не все цвета одного пространства могут быть однозначно сопоставлены цветам другого пространства. В предыдущем разделе мы рассмотрели несколько примеров цветовых пространств (называемых также цветовыми профилями). Мы отметили, что цветовой охват профиля *Adobe RGB* несколько шире, чем охват *sRGB*. Не все цвета *Adobe RGB* могут быть показаны на мониторе. Однако для показа этих цветов нужно каким-либо образом преобразовать изображение. В противном случае данные будут трактоваться как имеющие профиль *sRGB* и отображаться некорректно, фотографии будут казаться более блеклыми.

Чтобы этого не случилось, нужно преобразовать исходное изображение таким образом, чтобы все его цвета попадали в передаваемый диапазон устройства. Этот процесс называется отображением передаваемого диапазона (gamut mapping).

Другим примером, когда требуется преобразование цветового диапазона, является передача изображения *sRGB* на печать, т. е. преобразование в СМΥК. Например, тёмный насыщенный

сиренево-голубой цвет обычного компьютерного монитора как правило невозможно распечатать на бумаге с обычным СМΥК принтером. Ближайшее приближение по доступному принтеру спектру будет гораздо менее насыщенным.

Предположим, что диапазон значений цвета ограничен интервалом $[0,1]$. При непосредственном переводе цвета из *Adobe RGB* в *sRGB* (через пространство *XYZ*) могут быть получены 2 некорректных типа значений: отрицательные, либо большее 1. В первом случае невозможна коррекция цветности, во втором - коррекция интенсивности.

Преобразование диапазона цветов может быть локальным или глобальным. Под локальным имеется в виду независимое преобразование значений цвета в каждом пикселе. Например, приведение значений из отрезка $[-a,b]$ к отрезку $[0,1]$. При этом коэффициенты a и b берутся равными потенциальным экстремальным значениями для данной пары цветовых пространств. Плюсы таких подходов в простоте, скорости и универсальности по отношению к данным. Минусы - в недостаточной реалистичности получаемых изображений.

Глобальное преобразование использует специфическую информацию для каждого изображения. Например, можно определить экстремальные значения каждой компоненты цвета среди имеющихся, а не среди всех потенциальных.

4.3.7. Однородные цветовые пространства

Пространство *XYZ* - эталонное пространство с неотрицательными значениями цвета, пространство *RGB* наиболее широко используется в аппаратуре. Однако у них есть некоторые недостатки, один из которых - неоднородность цвета к восприятию. При изменении цветов C_1 и C_2 на одинаковую величину видимое изменение цветов может быть разным. Иллюстрация неоднородности цветового пространства xY приведена на рисунке 4.14. Показаны 2 пары цветов, в каждой цвета (точки на диаграмме цветности) отстоят на одинаковом расстоянии. Однако субъективно цвета в первой паре отличаются в значительно меньшей степени, чем цвета во второй.

Возникла цель создать цветовое пространство, изменение цвета в котором было бы линейным с точки зрения человеческого восприятия. То есть одинаковому изменению значений координат цвета должно соответствовать одинаковое ощущение изменения цвета.

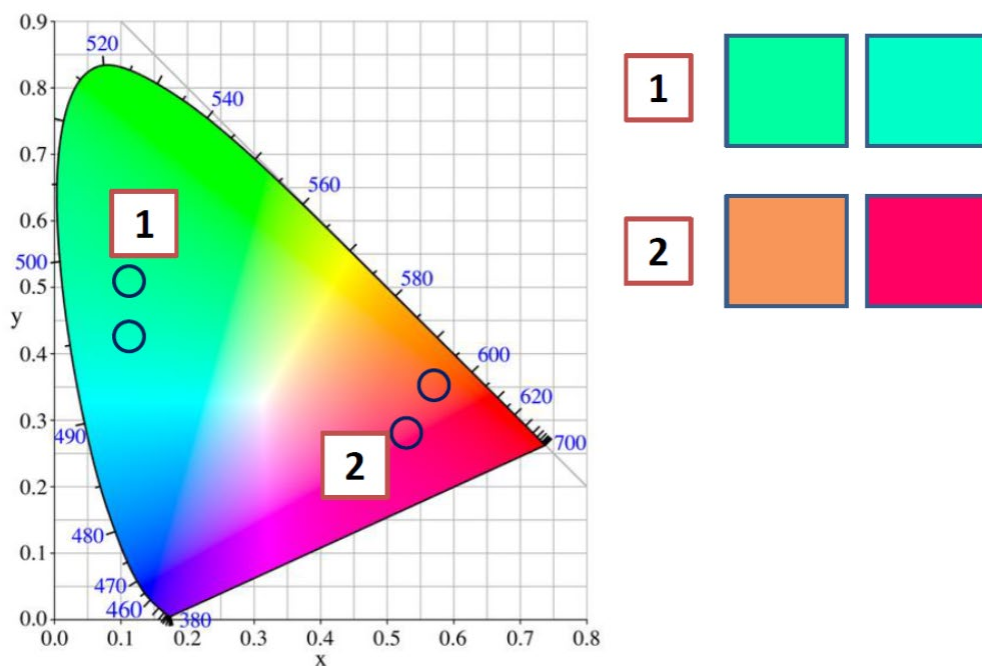


Рис. 4.14. Пары равноудаленных цветов на диаграмме цветности

Для устранения нелинейности CIE XYZ 1931 был предпринят ряд экспериментов. В 1958 году Ричардом Хантером была предложена модель Hunter « L, a, b », а в 1976 году после устранения разногласий была разработана модель «CIE $L^*a^*b^*$ », которая является сейчас международным стандартом [23]. Стандартным источником является D50.

Оба предложенных стандарта не являются идеальными, так как по-разному ведут себя в различных частях спектра. В Hunter Lab наблюдается сжатие в жёлтой части и расширение в синей. В CIE LAB , наоборот, расширение в жёлтой части.

Преобразование из XYZ нелинейное и выглядит следующим образом:

$$L^* = 116f(Y/Y_n) - 16a^* = 500[f(X/XY_n - f(Y/Y_n))]b^* \\ = 200[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)]$$

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

В цветовом пространстве *Lab* *L* означает светлоту (от 0 до 100), *a* и *b* - хроматические компоненты (координаты от зеленого до красного и от синего до желтого, соответственно). Помимо того, что цветовое пространство обеспечивает однородность изменения цвета, оно также отвечает интуитивным представлениям о природе цвета.

Lab применяется как промежуточное цветовое пространство, не зависящее от устройства, через которое происходит конвертирование данных между другими цветовыми пространствами (например, из *RGB* сканера в СМҮК печатного процесса). Это пространство в силу линейности к восприятию удобно использовать для цветокоррекции. Также в этом пространстве легко можно воздействовать на яркость и контраст изображения.

Основной недостаток модели - нелинейность преобразования в *XYZ*.

На рисунке 4.15 приведены пары цветов с соответствующими значениями расстояния в пространстве *Lab*. Видно соответствие прироста разницы между тонами человеческому субъективному восприятию. Первая пара цветов очень похожа, вторая уже сильно различается, а третья вообще содержит два противоположных цвета.



Рис. 4.15. Пары равноудаленных в пространстве *Lab* цветов

4.3.8. Интуитивные цветовые пространства

В цветовом пространстве *XYZ* *Y* отвечает за светлоту, *Z* связана с откликами колбочек, однако компонента *X* является искусственной математически введенной компонентой. Поэтому пространство *XYZ* недостаточно интуитивно. Пространство *RGB* более интуитивно, однако тоже недостаточно, поскольку промежуточные оттенки (голубой, розовый) приходится каждый раз рассчитывать через другие базовые цвета.

Рассмотренные трихроматические пространства *RGB*, *CMYK* удобны с технической точки зрения: они хорошо кодируют информацию, с их помощью удобно получать изображения с камеры, выводить их на экран, печатать на бумаге. Однако, когда дело касается обработки изображений, особенно художественной, на первый план выходят другие субъективные характеристики цвета, такие как яркость цвета, насыщенность цвета и цветовой тон.

Цветовой тон соответствует доминирующей длине волны. Это вполне интуитивная характеристика, знакомая и понятная даже детям. Насыщенность соответствует яркости, а светлота - белизне цвета.

На рисунке 4.16 приведены примеры пар картинок с разным

значением яркости (верхний ряд) и насыщенности (нижний ряд).

Три этих атрибута цвета положены в основу цветового пространства *HSV* (*Hue, Saturation, Value*). *H* обычно принимает значения от 0 до 360 и задан циклически, т.е. субъективные тона в 0 и 360 совпадают. Для наглядного представления палитры цветов используют различные варианты, наиболее распространены цилиндр и конус (рис. 4.17).



Рис. 4.16. а) - изображение с низкой яркостью (*value*), б) - изображение с высокой яркостью, в) - изображение с низкой насыщенностью (*hue*), г) - изображение с высокой насыщенностью

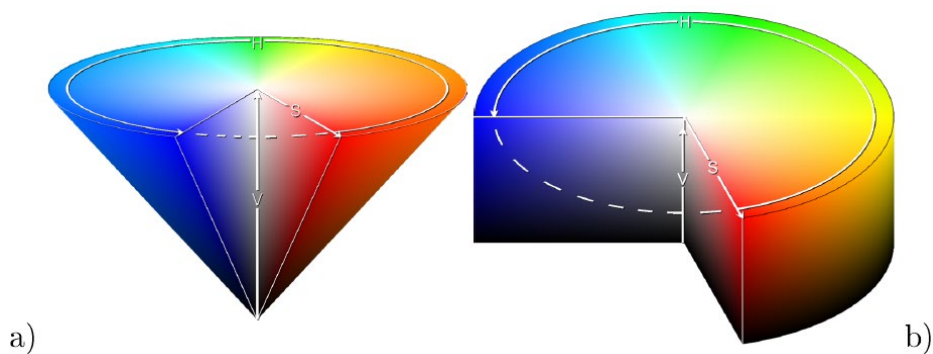


Рис. 4.17. а) Представление пространства HSV в виде цилиндра.
 б) Представление пространства HSV в виде конуса

В этом цветовом пространстве легко получить координаты дополнительных цветов. Дополнительными называются цвета, оптическое смешение которых в равной пропорции приводит к формированию ощущения ахроматического цвета (т. е. серого). В HSV для получения дополнительного цвета достаточно инвертировать первую компоненту *Hue* относительно середины диапазона.

Есть и другие цветовые модели того же типа, использующие другие субъективные атрибуты, например, HSL (*Hue*, *Saturation*, *Lightness*). Последняя компонента отвечает за светлоту.

4.3.9. Цветовое пространство CIECAM02. Хроматическая адаптация

Важным свойством зрительной системы является способность адаптироваться к различным уровням яркости. Благодаря этому обеспечивается постоянство цвета объектов окружающего мира, например, благодаря адаптации одно и то же яблоко будет одинаково зелёным и при лампе накаливания, и при дневном свете. В глаз человеку приходит свет источника, отраженный от поверхности. В спектре источника может преобладать тот или иной тон. Мы уже приводили пример того, как неверный выбор баланса белого может повлиять на цвета в отснятом изображении.

Последняя модель, одобренная CIE — это CIECAM02 [24]. Модель включает в себя преобразование хроматической адаптации, а также позволяет вычислить 6 атрибутов цвета: яркость, светлоту, цветность (*colorfulness*), хроматическую насыщенность (*chroma*),

насыщенность saturation) и оттенок.

Тон имеет аналогичный смысл с тоном в HSV и HSL (однако внутри модели используется промежуточное двухкомпонентное представление цвета), яркость в некоторой степени связана с восприятием отражающей способности объектов, светлота — с белесостью цвета, цветность — мера отличия цветного тона от серого цвета, прочие параметры выражаются через эти базовые.

Всего модель выделяет 4 важные зоны (рис.4.18):

- 1) стимул - рассматриваемая целевая область изображения (её размер согласуется с кривыми стандартного наблюдателя и равен 2 визуальным градусам)
- 2) промежуточная область (proximal field) - кольцо, захватывающее еще 2 визуальных градуса
- 3) фон (background) - до 10 градусов. Фон обычно включает в себя всю область монитора
- 4) окружающая область (surround filed) - выходит за пределы монитора, отражает уровень освещенности в комнате, в которой стоит монитор.

Окружение



Рис. 4.18. Структура пространства в модели SIESAM02

Модель берёт в расчёт уровень окружающей освещенности: нормальная (офис, работа за компьютером), полумрак (просмотр телевидения), темно (проектор в тёмной комнате). Для каждого

уровня есть predetermined набор констант, а все промежуточные значения можно получить интерполяцией базовых величин.

Кроме того, требуется определить отношение светимости точки белого, измеренной в окружении, к светимости точки белого на дисплее (в фоне). Обычно для этого используют специальное устройство - фотометр.

Основные шаги расчета величин исходя из цвета в XYZ следующие:

- 1) Конвертация цвета в CAT02 LMS. При этом увеличивается спектральная четкость цвета.
- 2) Применяется хроматическая адаптация на основе информации об окружении и фоне.
- 3) Происходит конвертация в пространство LMS, близкое к откликам колбочек.
- 4) Сжатие откликов колбочек¹.

Эта модель используется для специализированных задач, когда критично обеспечить правильную цветопередачу (например, для демонстрации образцов продукции на мониторах в магазине).

4.3.10. Ограничения трихроматических пространств

Однако даже «продвинутых» цветовых пространств (таких как CIECAM02) недостаточно для решения некоторых задач фотореалистичного синтеза изображений. Их ограниченность следует из самого принципа сведения сложного физического спектра к некоторым базисным значениям. Из трех полученных чисел, очевидно, нельзя однозначно восстановить исходный спектральный состав светового излучения. Эта потеря информации делает невозможной моделирование таких физических явлений как дифракция и интерференция. Оперирова при синтезе изображений с помощью трассировки лучей только тремя компонентами цвета, невозможно смоделировать радугу, полученную в результате преломления через призму (рис. 4.19).

¹ Подробисс про алгоритм можно прочитать в статье Moroney and others "The CIECAM02 Color Appearance Model" [24]

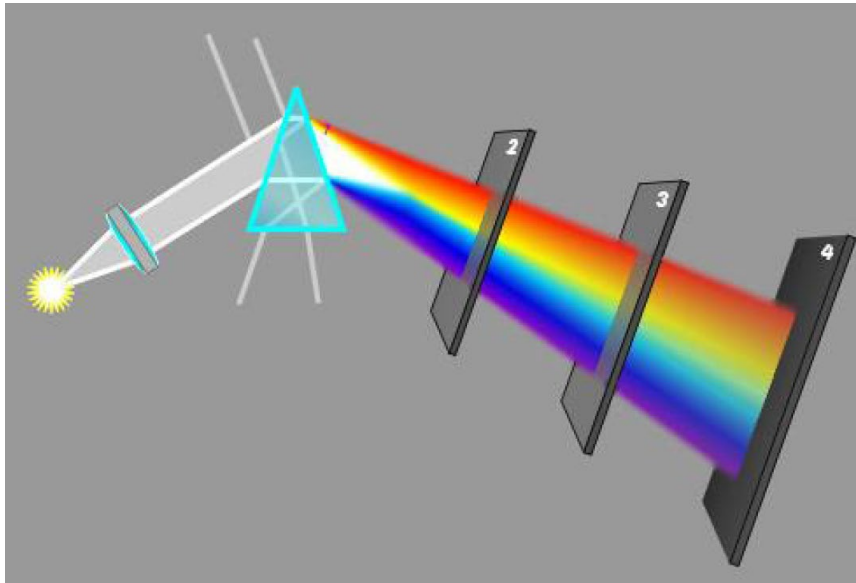


Рис. 4.19. Преломление белого света через призму

В последующих главах будут рассматриваться способы синтеза фотореалистичных изображений. Сейчас отметим только, что зачастую перевод в трихроматическое цветовое пространство лучше осуществлять только на самом последнем этапе, а все промежуточные расчеты выполнять для квантованных спектральных распределений.

В следующем пункте главы рассмотрим понятие гамма-коррекции, с упоминанием которой мы столкнулись при рассмотрении модели *sRGB*.

4.4. Гамма-коррекция

Гамма-коррекция в компьютерной графике одно из тех понятий, которое на первый взгляд кажется проще, чем есть на самом деле. Начиная разбираться, сталкиваешься с новыми и новыми определениями, новыми и новыми подробностями. В этом пункте сделана попытка тщательно разобраться с гамма-коррекцией, избежав неверных «очевидных» выводов.

4.4.1. Вспомогательные определения

Прежде чем мы перейдем к основному изложению, необходимо вспомнить основные термины, которыми мы будем оперировать.

Энергетическая яркость

Энергетической яркостью (radiance) называется поток энергии, излучаемой некоторой площадкой поверхности в направлении заданного телесного угла (т.е. в заданном направлении). Измеряется в ваттах на квадратный метр настерадиан $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{ст}}\right]$ по некоторому интервалу электромагнитного спектра (скалярная величина).

Энергетическая яркость является объективной линейной мерой количества энергии, попавшей на некоторый приемник с заданного направления или ушедшей в заданном направлении с некоторого источника. То есть энергетическая яркость источника со спектром $I(\lambda)$ будет равна $I = \int_{\lambda} I(\lambda) d\lambda$.

Световая яркость

Световая яркость (luminance;) относится к фотометрическим терминам и определяется как энергетическая яркость, взвешенная функцией спектральной чувствительности человеческого глаза (luminous efficiency curve) $V(\lambda)$ (рис. 2.12). В системе СИ приняты специальные единицы для (истовой яркости - канделы на квадратные метры $\left[\frac{\text{Кд}}{\text{м}^2}\right]$).

Чтобы перейти от $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{ст}}\right]$ к канделам, необходимо умножить значение на весовой коэффициент, который получается из определения кандалы. Кандела равна световой яркости монохроматического источника на длине волны 555 нм, излучающего в данном направлении $\frac{1}{683} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{ст}}\right]$.

На длине волны 555 нм человеческий глаз наиболее чувствителен к световому излучению, поэтому $V(555) = 1$. Таким

образом, зная кривую $V(\lambda)$ можно выразить световую яркость монохроматического источника на любой длине волны через яркость на длине волны 555 нм. Таким образом, для любой длины волны, зная спектральную энергетическую яркость на этой длине волны, мы можем получить световую яркость путем взвешивания энергетической яркости функцией $V(\lambda)$, т.е. $I_v(\lambda) = 683V(\lambda)I(\lambda)$. Коэффициент $\frac{1}{683}$ принят для того, чтобы сила света обычной свечи была приблизительно равна одной канделе.

Световая яркость источника со спектром $I(\lambda)$ будет равна $I_v(\lambda) = 683 \int_{\lambda} V(\lambda)I(\lambda)d\lambda$.

Такая величина позволяет определять видимую яркость источника.

Рассмотрим воображаемый инфракрасный источник с полным потоком излучения $1 \frac{\text{Вт}}{\text{ст}}$ в диапазоне от 700 нм до 800 нм и отсутствием излучения в других областях спектра. Его интегральный полный поток $\Phi = \int 1d\lambda = 100\text{Вт}$. В то же время фотометрический полный поток Φ_v составит около 42 люмен (световая эффективность $\frac{\Phi_v}{\Phi} = 0.42 \frac{\text{Лм}}{\text{Вт}}$). Для сравнения - полный поток лампы накаливания мощностью 100 Вт составляет около 1300 люмен (световая эффективность $13 \frac{\text{Лм}}{\text{Вт}}$). Т. е. этот источник глазом будет различим как достаточно тусклый.

Восприятие яркости человеком и светлота

Известно, что воспринимаемая человеком яркость источника света существенно нелинейно зависит от фотометрической яркости. Так, если уменьшить яркость источника до 18% по сравнению с базовым, он будет казаться вполтину менее ярким. Эксперименты показывают, что на большей части воспринимаемых яркостей человеческое зрение характеризуется логарифмическим восприятием (т.е. отклик на сигналы, меняющиеся в геометрической прогрессии, будет составлять арифметическую прогрессию). Однако логарифмическая функция обычно заменяется на степенную.

В цветовых системах CIE L^*u^*v и L^*a^*b введена

соответствующая безразмерная единица «светлоты»:

$$L^* = 116f(Y/Y_n) - 16$$

где Y_n - светлота некоторого идеально-белого объекта.

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

L^* лежит в диапазоне от 0 до 100, а единичное изменение немного превосходит порог различимости. В дальнейшем будет подробнее рассмотрена связь законов зрительной системы человека и гамма-коррекции.

Изображение

Гамма-коррекция рассматривается обычно (и нами тоже) в применении к изображениям. Мы будем понимать термин «изображение» в обычном смысле - как целочисленную матрицу, каждый элемент которой $I \in [0, 255]$ и хранит закодированное значение относительной светимости конкретного пикселя. Т. е. мы полностью исключаем цветовую информацию и сосредотачиваемся на представлении интенсивности.

4.4.2. Линейность кодирования яркости в изображениях

Что кодирует пиксель изображения? Чему соответствует, скажем, значение 0 или значение 125? Если рассмотреть процесс формирования изображения на чувствительной матрице, скажем, цифрового фотоаппарата, то мы придём к следующему упрощённому представлению.

Чувствительный элемент матрицы представляет собой некоторую чувствительную площадку, закрытую фильтром, пропускающим только определённый участок спектра. Будем считать, что площадка одинаково реагирует на все длины волн. Фильтр характеризуется функцией спектральной чувствительности

$m(\lambda)$. $m(\lambda) = 1$ означает, что свет на длине волны λ полностью пропущен. Соответственно, $m(\lambda) = 0$ означает, что свет на длине волны λ полностью поглощён фильтром.

Пусть $E(\lambda)$ - спектральная освещённость фильтра $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2_{\text{НМ}}}\right]$. Тогда освещённость E чувствительного элемента, взвешенная пропусканием фильтра сумма по всем длинам волн, составит

$$E = \int_{\lambda} E(\lambda)m(\lambda)d\lambda \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}\right]$$

Предполагая, что отклик чувствительного элемента прямо пропорционален освещённости E и времени воздействия света t , получим энергетическую экспозицию H .

$$H = Et$$

Энергетическая экспозиция измеряется в джоулях на квадратный метр $\left[\frac{\text{Вт}\cdot\text{сек}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}\right]$ так как $\left[\text{Вт} = \frac{\text{Дж}}{\text{сек}}\right]$.

Итак, значение пикселя изображения должно быть линейно пропорционально энергетической экспозиции H , которая, в свою очередь линейно зависит от мощности падающего излучения, взвешенного некоторым фильтром. Фильтры необходимы, чтобы получить цветное изображение (а не суммировать целиком весь спектр).

В случае обычных изображений, целью которых является максимально приближенное к человеческому восприятию картина, суммарный отклик фильтров делается похожим на функцию спектральной чувствительности человеческого глаза, поэтому с некоторым приближением можно перейти к использованию световой экспозиции, которая характеризуется использованием фотометрических единиц освещённости (т.е. освещённость E составит

$$E = \int_{\lambda} E(\lambda)V(\lambda)m(\lambda)d\lambda$$

где $V(\lambda)$ - функция спектральной чувствительности человеческого глаза). Освещённость в этом случае будет измеряться в люксах (lux),

а экспозиция — в люксо-секундах $\left[\frac{\text{люкс}}{\text{сек}} \right]$.

Для визуализации изображения мы должны обеспечить светимость пикселей на экране пропорционально значению в изображении и, следовательно, пропорционально освещенности сенсора. При этом не будем требовать точного соответствия, т. к. значения светимости пикселей могут зависеть от конкретного монитора. То есть:

$$B_{ij} = a + bI_{ij} = cE_{ij}$$

где i, j - координаты конкретного пикселя на изображении, в предположении что они соответствуют пикселям монитора.

Однако на практике выдерживание такой линейности потребует от нас некоторых дополнительных действий, к описанию которых мы и перейдем.

4.4.3. Тракт передачи изображений

Тракт передачи изображений - программно-аппаратный комплекс, предназначенный для получения (захвата или генерации), передачи и визуализации изображений. Примером тракта передачи изображений может служить система «видеокамера-пленка-видеоплеер-телевизор» или «фотоаппарат-компьютер-монитор». Заканчивается тракт всегда генерацией изображения на устройстве вывода - дисплее.

А начинаться может либо с захвата изображения реального мира, либо с генерации изображения тем или иным способом (скажем, с использованием алгоритмов компьютерной графики).

Тракт «от света до света» состоит минимум из трех звеньев: приемника (фотоаппарат, сканер, видеокамера), системы хранения/передачи и дисплея. Приемник преобразует свет в код, система хранения код этот хранит и передаст до дисплея, который, в свою очередь, преобразует код в цвет. Тракт для работы с синтезированными изображениями не включает приемник, который заменяется алгоритмом построения изображения.

Задача любого тракта передачи изображений - передать без искажений цвет и яркость исходных (либо синтезированных) изображений (см. Рис. 4.20).

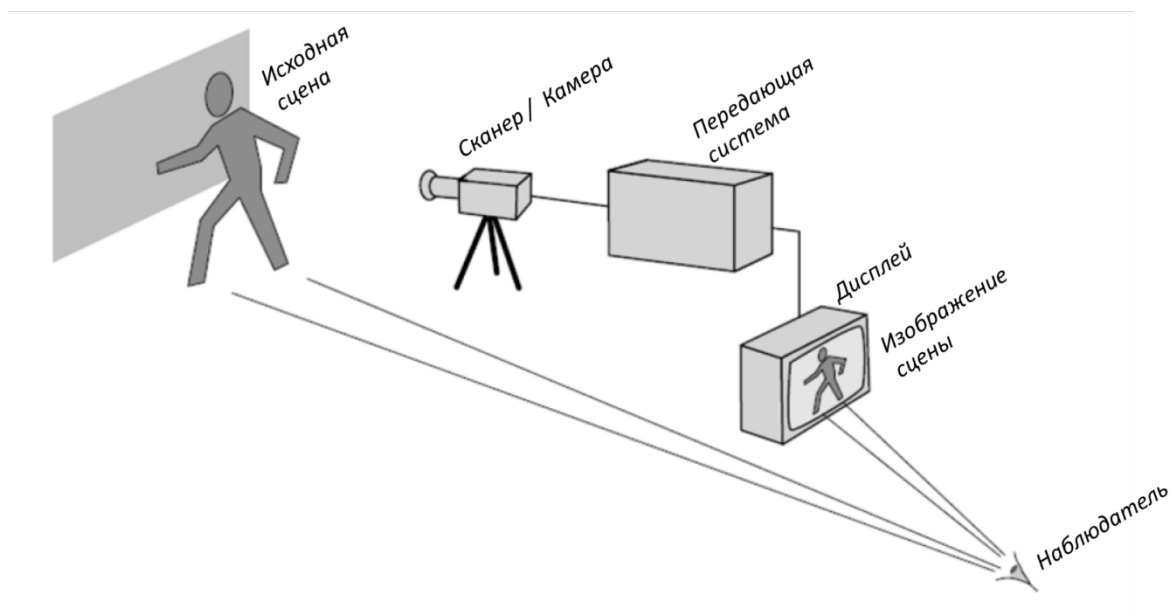


Рис. 4.20. Тракт передачи изображений

В данной главе мы рассматриваем вопросы передачи яркости, цвет - тема для отдельной работы, этому посвящены многие книги. Гамма-коррекция является составной частью тракта передачи изображений и предназначена для того, чтобы передать изображение без искажения интенсивности света.

4.4.4. Передающая функция

С каждым звеном тракта ассоциирована передающая функция.

Пусть функцией приемника будет $C=R(E)$ — преобразование освещенности E в код C .

Функция системы хранения: $C_1 = S(C)$.

Функция дисплея: $I = D(C_1)$.

В идеале

$$D(S(R(E))) = a + bE$$

т. е. после передачи через все системы и устройства исходное излучение остается неизменным с точностью до линейного преобразования. Это — наша цель, однако её достижению мешают несколько вещей:

- некоторые особенности передающих функций могут быть обусловлены физическим устройством приёмника и дисплея;
- при хранении информации в цифровом виде неизбежна дискретизация сигнала, что ведёт к потере информации, которую необходимо минимизировать.

Мы будем в основном рассматривать передающую функцию дисплея, т. к. своим появлением гамма-коррекция обязана в основном свойствам этого звена передающего тракта, а также особенностям человеческого восприятия яркости.

В следующих пунктах мы подробно рассмотрим различные причины появления гамма-коррекции:

- нелинейности передающей функции CRT-дисплеев;
- необходимости нелинейного кодирования яркости для более полного использования ограниченного диапазона представления яркости в ЭВМ;
- особенности восприятия интенсивностей человеческим зрительным аппаратом.

4.4.5. Нелинейность передающей функции дисплея

Исторически необходимость гамма-коррекции была обусловлена особенностями передающей функции CRT-дисплеев.

Рассмотрим передающую функцию дисплея $D(C)$. В данном случае C это входящий сигнал (напряжение, соответствующие данному пикселю). Интенсивность света, генерируемого физическим устройством обычно не является линейной функцией входящего сигнала. CRT-устройства (телевизоры, мониторы с электронно-лучевой трубкой, также называемой кинескопом) имеют степенную зависимость интенсивности излучения от входящего

напряжения:

$$B(C) = A(kC)^{\gamma}$$

где параметр A характеризует максимальную яркость монитора. Более точно, зависимость имеет вид

$$B(C) = A(k_1C + k_2)^{\gamma}$$

где k_2 характеризует уровень черного (black-level), т.е. яркость экрана при нулевом сигнале, а k_1 - усиление сигнала (контраст). Большинство различий между мониторами заключается в разной настройке регулировок яркости k_2 и контрастности k_1 . Такая зависимость является следствием принципиального устройства электронно-лучевой трубки (см. рис. 4.21).

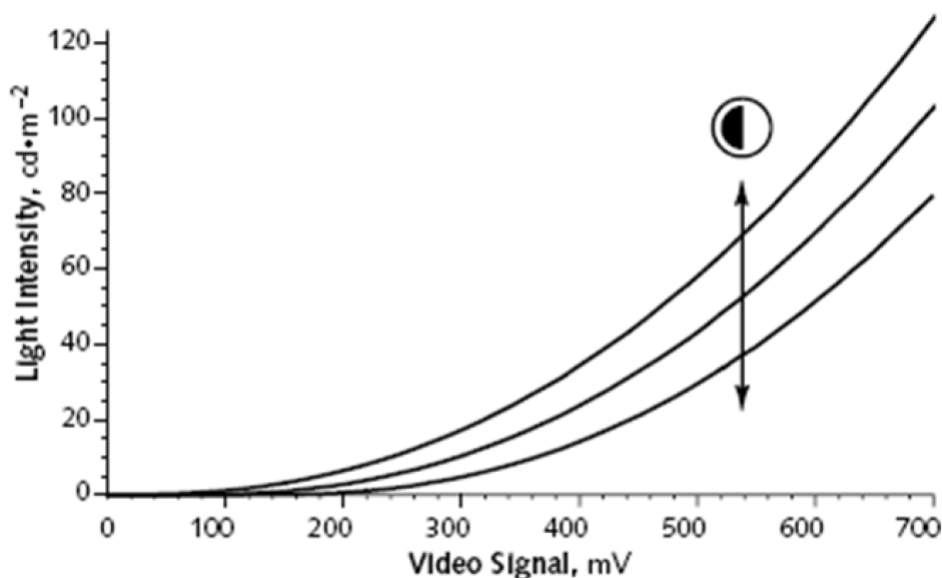


Рис. 4.21. Нелинейность монитора

Коэффициент γ обычно лежит в пределах 2.3 - 2.6 (чаще всего около 2.5 [25] и называется гаммой данного устройства (т.е. по названию буквы греческого алфавита, обозначающих коэффициент). Эта нелинейность должна быть скомпенсирована для корректной передачи хранимых яркостей.

Процесс корректировки этой нелинейности и называется

гамма-коррекцией. Гамма-коррекция включает в себя преобразование, обратное тому, которое происходит в мониторе (преобразование формы $kC^{\frac{1}{\gamma}}$, см. рис. 4.22).

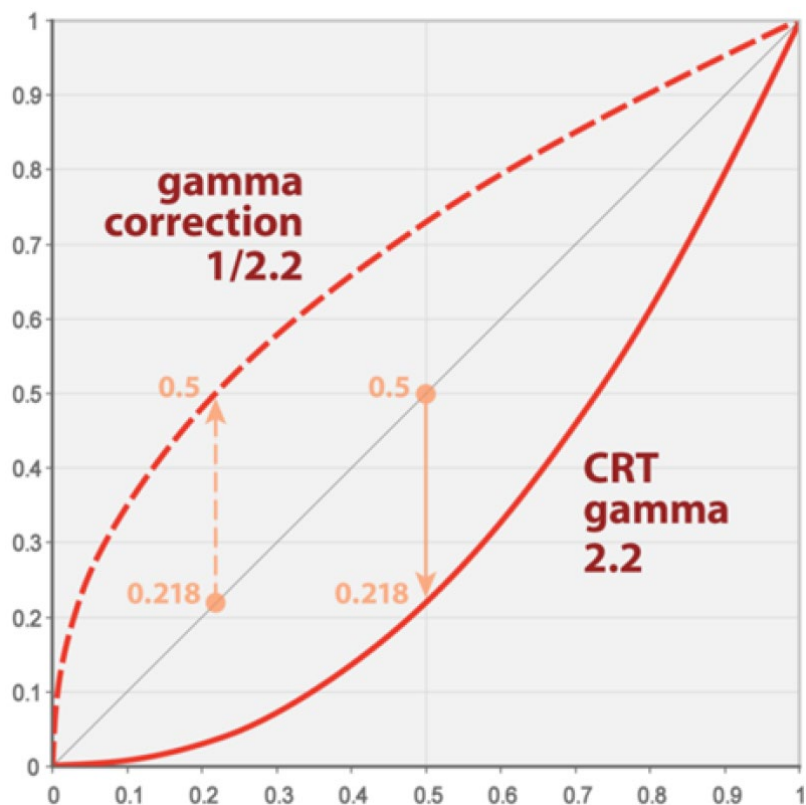


Рис. 4.22. Гамма преобразование и гамма-коррекция

Для LCD-мониторов передающая функция линейна. Однако они конструируются таким образом, чтобы эмулировать соответствующую кривую для CRT-мониторов. Это делается, в основном, по двум причинам:

- для того, чтобы можно было безболезненно подключать различные мониторы к одним системам без существенного изменения цвета и яркости изображения;
- нелинейность способствует повышению контрастности изображения и лучшей передаче тёмных оттенков, о чем будет рассказано в следующих пунктах.

Многие программы применяют неполную гамма-коррекцию (т.е. изображение корректируется так, что визуализируемое

изображение умышленно остается нелинейным). Часто используется значение гаммы 2.2. Неполная гамма-коррекция увеличивает контраст изображения, что, как считается, предпочитают пользователи. Кроме этого, «недокоррекция» полезна для компенсации эффекта бликования на экране монитора, который ухудшает контраст.

Необходимо заметить, что такая нелинейность мониторов не является по сути дефектом, который необходимо исправлять (на современном уровне развития науки и техники закодировать коррекцию нелинейности в аппаратное обеспечение монитора не составило бы больших проблем). Нелинейность CRT практически является точной обратной функцией чувствительности человеческого зрения к яркости и поэтому отклик монитора на входящие сигналы получается воспринимаемо-линейным, что на самом деле очень хорошо.

Кроме этого, сегмент около нуля обычно заменяется на линейное приближение степенной функции. Это делается для минимизации влияния шума в темных областях изображения.

4.4.6. Кодирование яркости

Другой причиной для появления гаммы и гамма-коррекции является дискретизированное представление информации в ЭВМ. Традиционное представление цвета в компьютерной графике ограничивает яркость 8-ми битным представлением. Таким образом на весь диапазон яркостей остается только 256 значений. Необходимо использовать их таким образом, чтобы процесс кодирования максимально отвечал свойствам человеческого зрения. Особенность восприятия приводит к тому, что человек лучше различает в темных областях.

При линейном представлении 8-битных изображений ошибка (относительный шаг между соседними значениями) меняется от 100% (темные пиксели) до менее 1%; (при значениях выше 100). Таким образом, соотношение между самым ярким белым и самым темным серым, которое может быть закодировано без видимых градаций, составляет 2,55:1 (т. е. $\min = 100$, $\max = 255$).

Чтобы избежать градаций, необходимо поддерживать шаг 1,01 на всем диапазоне яркостей. При использовании линейного кодирования абсолютная дельта 0,01 должна поддерживаться на всем диапазоне. Чтобы добиться контраста 100:1, понадобится использовать столько бит, чтобы максимальное значение цвета достигло 10000 (т. е. $\min = 100$, $\max = 10000$). Наименьшее количество бит на цвет, при котором достигается такое значение - 14 бит на канал.

Хранение 8-битных изображений в нелинейном виде (с гамма-коррекцией) позволит выделить больше бит под тёмные пиксели, что улучшит восприятие при визуализации на мониторе. Монитор выполнит «аналоговое» сжатие диапазона яркостей в тёмной области, что повысит «плотность» градаций, оставляя разницу в пределах 1-2% в широком диапазоне яркостей (см. рис. 4.23).

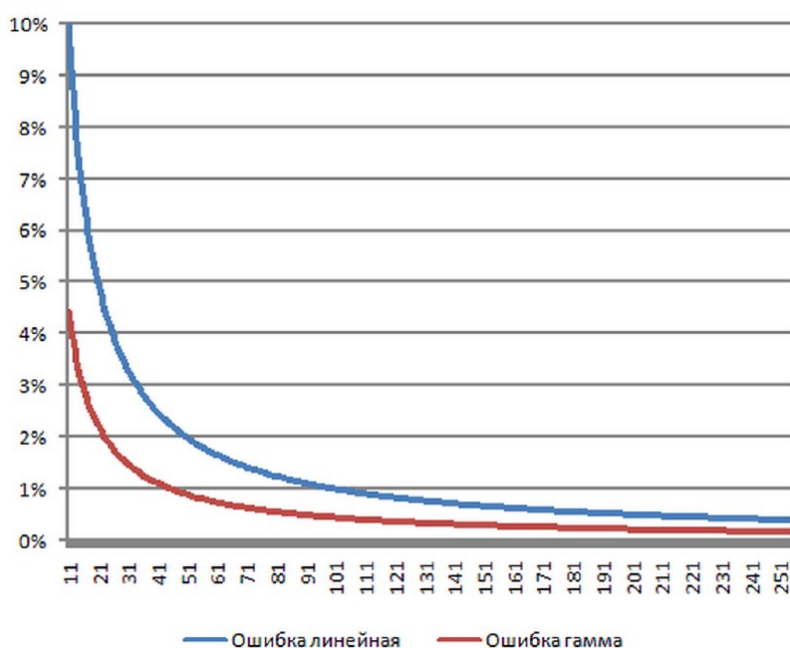


Рис. 4.23. Ошибка линейного кодирования и ошибка гамма-кодирования

Гамма-коррекция при кодировании уменьшает ошибку, однако нельзя считать ее универсальным способом кодирования изображений. Кроме того, одного байта на канал яркости часто недостаточно для представления всего диапазона яркостей, присутствующих в реальном мире. Существуют другие схемы

кодирования (например, логарифмические), которые часто применяются для хранения изображений широкого динамического диапазона.

В прошлом пункте мы столкнулись с нелинейностью восприятия цвета человеком относительно цветового пространства XYZ. Мы не заостряли внимание на том, что на самом деле восприятие человека нелинейно не только относительно производных величин, выбранных специально для представления цвета, но и относительно исходных физических величин. Однако это действительно так.

Прежде всего нас интересует восприятие человеком яркости, однако вы, возможно, уже сталкивались с понятием децибелов для звука. Децибел - логарифмическая единица. Величина, выраженная в децибелах, равна численно десяти десятичным логарифмам отношения физической величины к одноимённой физической величине, принимаемой за исходную:

$$A_{dB} = 10 \lg \frac{A}{A_0}$$

где A_{dB} — величина в децибелах, A — измеренная физическая величина, A_0 — величина, принятая за базис.

Одна из причин использования децибелов состоит в том, что восприятие стимулов различного вида носит близкий к логарифмическому характер. Наглядный пример - темперированная шкала частот (музыкальная гамма). Нота “Ля” разных октав фортепиано имеет следующие значения частот (Hz):

27,5 55 110 220 440 880 1760 3520 7040

В 19 веке Вебером, а затем Фехнером был предложен эмпирический закон для описания интенсивности ощущения. Согласно нему, интенсивность ощущения прямо пропорциональна логарифму интенсивности раздражителя:

$$p = k \cdot \ln \frac{S}{S_0}$$

где S — значение интенсивности раздражителя. S_0 — нижнее граничное значение интенсивности раздражителя: если $S < S_0$, раздражитель совсем не ощущается, k - константа, зависящая от субъекта ощущения. Можно заметить, что приведенная формула сходна с выражением физической величины в децибелах.

Позже (в 20 веке) Стивенс показал, что закон Вебера-Фехнера верен лишь для средних значений ощущения некоторых модальностей, а в общем случае зависимость степенная (показатель степени свой для различных условий). Согласно закону Стивенса:

$$Y = kI^\alpha$$

То есть субъективная яркость определяется степенной функцией от уровня физической интенсивности.

Таким образом, степенной закон гамма-коррекции оправдан с точки зрения человеческого восприятия. Рассмотрим подробнее, как гамма-коррекция помогает при кодировании изображения.

Порог различения (Just-noticeable difference) - минимальное значение, при котором различаются стимулы. Из приведенных выше законов следует, что порог различения яркости примерно пропорционален её величине. Это означает, что, не беря во внимание нелинейность восприятия, мы рискуем неверно закодировать изображение, из-за чего градации яркости получатся слишком разреженными, и пользователь начнет различать ступенчатость.

Считается, что для визуальных стимулов порог различения составляет около 2%. При линейном кодировании с последующей гамма-коррекцией могут возникать артефакты, потому что субъективная мера различия между двумя последовательными целыми значениями яркости (от 0 до 255) будет неравномерной.

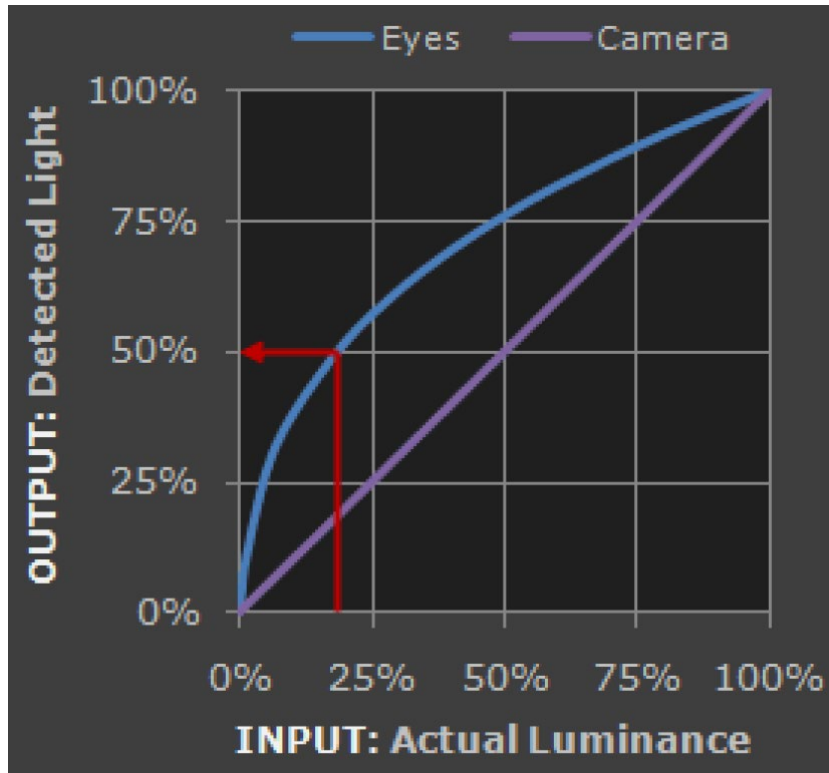


Рис. 4.24. Нелинейность восприятия яркости

При степенном кодировании ошибка уменьшается, поскольку увеличивается равномерность субъективной яркости для последующих градаций. На рисунке 4.25 пример двух шкал яркости без гамма-коррекции и с ней.

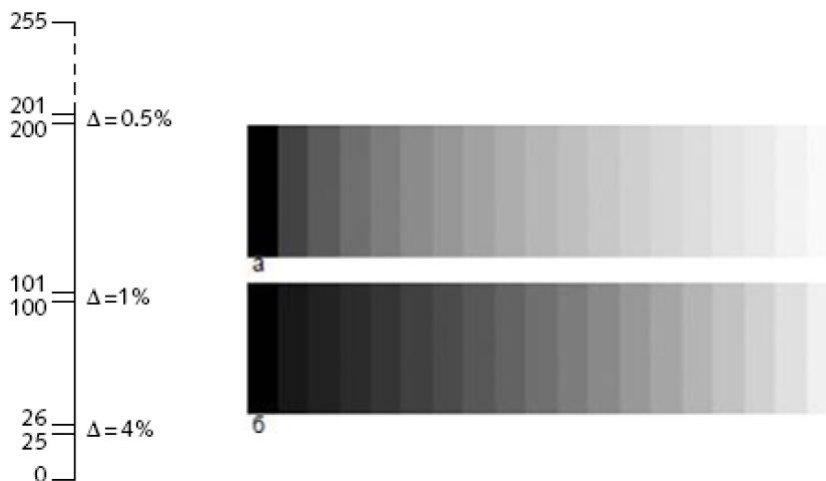


Рис. 4.25. Вверху - физически равномерные яркости, внизу - субъективно равномерные

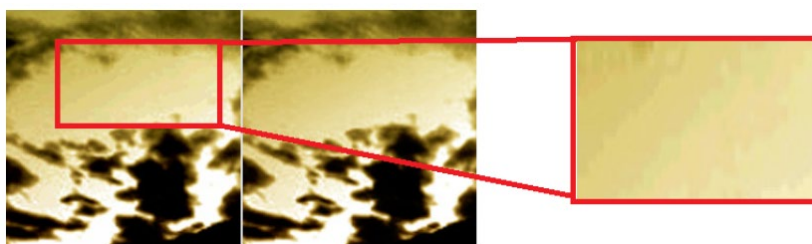


Рис. 4.26. Пример артефактов линейного кодирования

4.4.7. Использование гаммы для моделирования процессов адаптации

Одним из возможных проявлений свойства зрения адаптироваться к окружающему освещению можно считать иллюзию одновременного контраста (рис. 4.27). Иллюзия заключается в том, что квадраты одинаковой закодированной яркости могут выглядеть по-разному в зависимости от цвета фона. При ярком свете серое выглядит темнее, чем при тусклом.

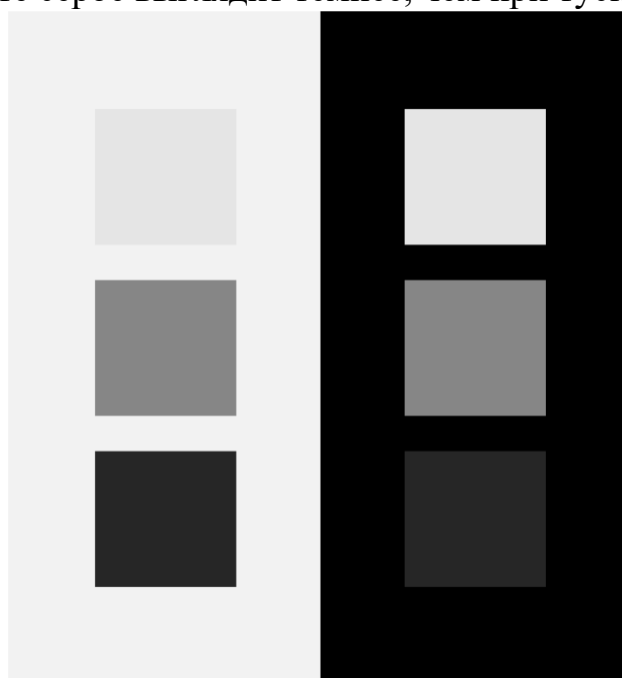


Рис. 4.27. Иллюзия одновременного контраста

Показатель Стивенсона различается для разных уровней освещенности, а значит можно искусственно изменить входные

данные по степенному закону для соответствия конкретным условиям просмотра. Похожий, но более сложный механизм используется в модели CIECAM02, упомянутой в предыдущем пункте.

Гамма-коррекция используется в стандартной модели sRGB, а значит широта ее применения и простота значительно превосходят хроматическую адаптацию CIECAM02. Подкорректировав параметр коррекции таким образом, чтобы после гамма-коррекции и гамма-преобразования суммарное значение степени превосходило единицу, можно адаптировать видеоряд для показа в темных помещениях. Таким образом, повысится контрастность видео.

4.4.8. Использование гамма-коррекции в приложениях

Гамма в операционной системе Windows

В большинстве случаев используется показатель гаммы 2.2. Компьютеры Макинтош до 2009 года использовали значение гаммы 1.8. Бинарные данные в файлах изображений и видео закодированы с использованием гамма-кодирования. Гамма для конкретного изображения может быть указана в профиле. Для корректного отображения данных на мониторе они должны быть приведены в степень, обратную степени гамма-преобразования монитора.

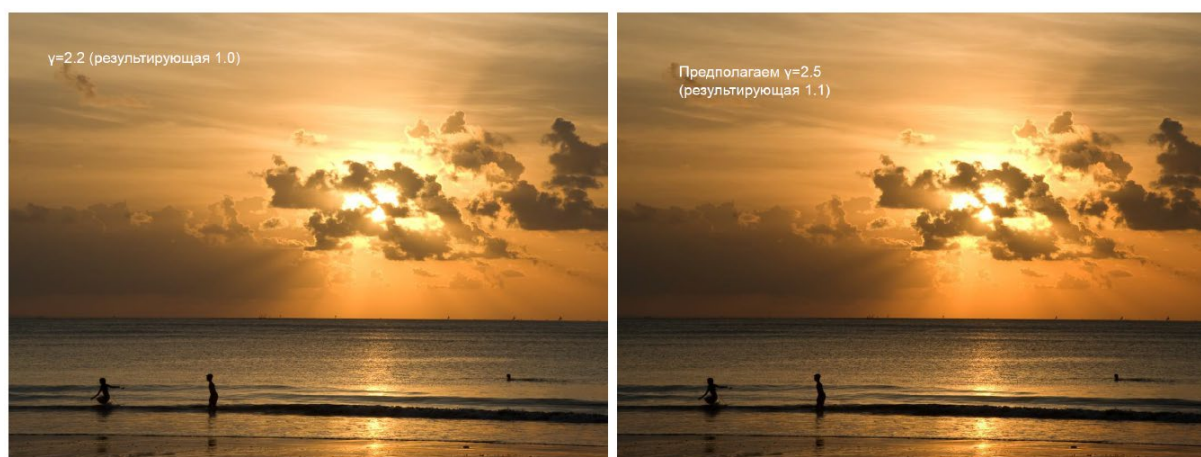


Рис. 4.28. Повышение контрастности за счет изменения результирующей гаммы

обеспечивает максимально возможную точность передачи цветового содержимого на устройства вывода (выполняют преобразование цветового диапазона - gamut mapping). В ОС Windows хранятся цветовые профили устройств. Цветовой профиль — это файл с цветовыми характеристиками. В профиле хранится информация о том, как именно интерпретирует данные определенное устройство в определенном состоянии. Одно устройство может иметь несколько цветовых профилей. Цветовые профили взаимодействуют с системой управления цветом, обеспечивая приемлемую передачу цветового содержимого независимо от устройства (с помощью профилей создаются преобразования цветов, которые используют приложения).

ОС Windows поддерживает 2 типа цветовых профилей:

- цветовой профиль системы Windows (WCS - Windows Color System)
- цветовой профиль международного консорциума по цвету (ICC - International Color Consortium)

Цветовые профили можно сопоставлять с устройствами, добавлять новый профиль (например, в результате калибровки экрана), назначать профиль по умолчанию для устройства.

Общая схема работы с изображениями

При синтезе фотореалистичных изображений зачастую используют готовые данные для создания и детализации объектов виртуальной сцены. Такими данными могут быть, например, трехмерные модели объектов, спецификации отражающих свойств материалов и т. д. Очень часто используют файлы изображений, поэтому важно не только уметь подготовить результат синтеза к выводу на экран, но и уметь интерпретировать данные в сохраненных на диск изображениях.



Рис. 4.29. Примеры использования текстур при синтезе изображений: а) карта земли как текстура для шара; б) Отражение панорамы в элементе сцены.

Наиболее типичными примерами использования изображений при синтезе являются текстуры (рис. 4.29). Текстура как правило является частью описания материала объекта. Хотя в общем случае текстуры могут иметь разную трактовку (текстура отражающих свойств материалов, микрорельеф поверхности, карта нормалей), в большинстве случаев ее интерпретируют как цветное изображение, накладывающееся на поверхность полигонов в сцене с целью придания объекту определенного цвета.

Другим примером изображений служат панорамы (cube map, sphere map), выступающие в качестве внешних источников энергии относительно сцены. Сами по себе в отрыве от приложения панорамы представляют собой изображения окружающего пространства.

Алгоритмы синтеза предназначены для работы с линейным

представлением излучения.

Однако, как правило, обыкновенные изображения уже содержат в себе гамма-коррекцию. Изображения широкого динамического диапазона (будут рассмотрены ниже) обычно, напротив, не содержат гамма-коррекции. Более точно можно это определить с помощью цветового профиля изображения. Если профиль не указан, то можно считать показатель гаммы равным 2.2. Однако в этом случае нет гарантии, что воспроизведение цветов изображения трактуется правильно.

Общий алгоритм использования изображений в процессе синтеза:

- 1) Применить гамма-преобразование (2.2 или иное из профиля изображения).
- 2) Рассчитать освещение, синтезировать выходное изображение.
- 3) Применить гамма-коррекцию для вывода на монитор ($\frac{1}{2.2}$ или иная).

Рассмотрим модельный пример для простейшего алгоритма синтеза: смешать 2 изображения с прозрачностью α .

Рассмотрим, по каким формулам будет рассчитан выходной свет без использования гаммы и с использованием. Обозначим входные цвета c_1 и c_2 .

В первом случае выходной цвет будет равен $c = \alpha c_1 + (1 - \alpha)c_2$

Во втором: $c = ((\alpha c_1)^\gamma + ((1 - \alpha)c_2)^\gamma)^{\frac{1}{\gamma}}$

Предположим, что:

$$\gamma = 2.2, \alpha = 0.4$$

Средняя ошибка на всевозможных комбинациях входных цветов составит 11.83, а максимальная 66. На рисунке 3.30 вы вполне можете заметить ошибки невооруженным глазом, сравнив два цвета.

Также приведена карта ошибок, где цветом закодирован уровень ошибки для данной пары значений цвета (рис. 4.31).



Рис. 4.30. Результирующие цвета для всевозможных значений входных цветов

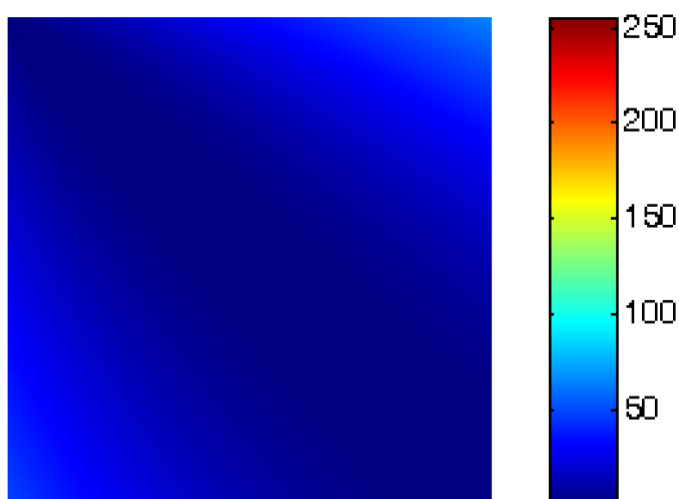


Рис. 4.31. Численная ошибка при комбинировании цветов, если цвета лежат в диапазоне от 0 до 255

Можно сделать еще одно замечание. Для сохранения точности операций лучше работать с вещественными числами иначе будут сильны ошибки округления.

Альтернативно можно заранее подготовить линейризованные данные для передачи на вход приложению, однако в этом случае вновь получим ошибки линейного кодирования.

4.4.9. Калибровка монитора

Как определить показатель гаммы у конкретного монитора?

Обычно, у LCD монитора значение гаммы близко к 2.2, но бывают и исключения. Более точно определить значение можно с помощью калибровки монитора. Существует как встроенное средство калибровки Windows, так и множество аналогов других производителей. В Windows калибровка монитора приводит к созданию нового цветового профиля. Монитор можно откалибровать под конкретные условия работы (например, для освещения на конкретном рабочем месте).

Изменение показателя гаммы сопряжено с двумя свойствами отображения: яркостью и контрастом. Как правило, именно эти параметры доступны для регулирования. Для определения гаммы достаточно воспользоваться специальной шкалой (рис. 4.32).

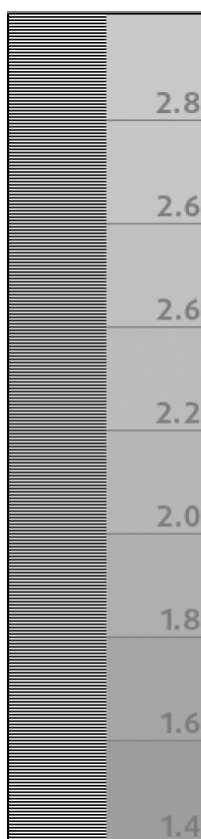


Рис. 4.32. Шкала для определения показателя гаммы монитора

Пользуются ей таким образом:

- 1) отодвигаются от монитора до тех пор, пока не перестают различать четкие полосы в левой части
- 2) находят уровень, для которого совпадают цвета в левой и правой части
- 3) в найденном уровне написан показатель гаммы ваших) монитора.

4.5. Вопросы для самоконтроля усвоенных знаний

Следующие вопросы позволят оценить степень усвоения знаний по разделу 4.

1. Поясните, какие структуры глаза человека позволяют ему различать цвет и почему?
2. Что лежит в основе трехмерности цвета? Как можно измерить цвет?
3. Как цвет поверхности зависит от освещающего эту поверхность света?
4. Каковы основные положения закона аддитивности Грассмана?
5. Каков будет результирующий цвет, полученный смешением световых пучков от двух источников света, цвет которых определяется соответственно тройками чисел (R_1, G_1, B_1) и (R_2, G_2, B_2) (где R, G, B - коэффициенты для заданных базовых источников света)?
6. Возможно ли, зная цвет источника, однозначно определить спектральный состав его излучения?
7. Поясните связь между координатами цвета и цветности.
8. Используя кривые стандартно наблюдателя МКО, рассчитайте цвет источника, спектр излучения которого равномерно распределен во всем видимом диапазоне.
9. Как осуществляется переход между цветовыми пространствами RGB и XYZ?
10. Поясните смысл понятий базовый цвет, цветовой охват и точка белого.
11. Что такое цветовая температура и как по ее значению можно определить цвет источника излучения?
12. Что такое гамма-коррекция и для чего она используется?

5. Изображения широкого динамического диапазона

5.1. Введение

При создании фотореалистических изображений мы, в итоге, рассчитываем получить неотличимое от реальности изображение. Именно для этой цели и нужны изображения широкого динамического диапазона (high dynamic range images - HDRI), далее HDR-изображения.

Рассмотрим, чем именно ограничен динамический диапазон итогового изображения.

На последнем этапе тракта передачи изображений хранимая информация преобразуется в видимый свет с помощью устройств визуализации. Оказывается, не всех параметров систем визуализации достаточно для точного воспроизведения сохраненной в виде изображения сцены. Хотя с точки зрения разрешающей способности, современные дисплеи удовлетворяют требованиям реализма, цветовые и яркостные характеристики всё ещё не могут соперничать с возможностями восприятия зрительной системы человека. Большинство современных мониторов имеют максимальную яркость 100 – 200 кд/м², а контрастность не превышает двух порядков* (*Появляются 10 и 12-битные мониторы, но пока они не широко распространены.). В то же время глаз способен работать с 10 – 12 порядками яркости (солнечный день и безлунная ночь).

Однако работа с изображениями не ограничивается выводом фотографий на дисплей. Как было сказано ранее, процессу визуализации предшествует хранение и обработка изображений. Устройство фотокамеры позволяет регулировать поток через диафрагму, однако в одном кадре зачастую невозможно запечатлеть реалистичную сцену. Хотя динамический диапазон пленки выше динамического диапазона монитора, его так же недостаточно для описания всех различимых человеком яркостей.

По этим двум причинам изображения узкого динамического диапазона (8-битные) более широко используются. Однако в процессе синтеза работа с HDR-изображениями де факто стала

обязательной. Они могут использоваться как в процессе визуализации, так и в качестве промежуточного результата для хранения физических значений яркости. Кроме того, существуют способы получения HDR-изображений реальных сцен с помощью стандартных технологий съемки. Для воспроизведения таких изображений разрабатывают специальные алгоритмы, называемые операторами тональной компрессии (tone-mapping operators).

Если вы хотите, чтобы результат вашей визуализации был максимально реалистичен, вам так или иначе необходимо уметь получать, хранить и обрабатывать HDR-изображения.

Вначале рассмотрим современные устройства визуализации и выявим их ограничения более детально.

5.1.1. Геометрическое разрешение дисплея

Представим, что мы не ограничены в параметрах яркости и разрешения цифрового изображения. Подсчитаем, какой дискретизации по геометрическим характеристикам и цветовым характеристикам достаточно для реалистичной (не отличимой от реальности) визуализации.

Разрешение зоркого глаза - примерно $1'$ (угловая минута). Значит, на расстоянии 1 метра человек способен различить изменение освещенности на площади равной приблизительно трети миллиметра (рис. 5.1):

$$\Delta = \tan(1')d \approx 0.29\text{мм}$$

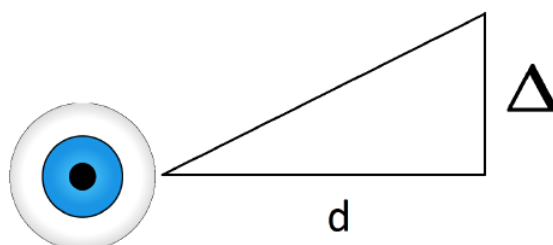


Рис. 5.1. Разрешающая способность глаза человека

Таким образом, монитор с диагональю 22 дюйма (дюйм — 2.54 см) и отношением сторон 16:9 должен иметь минимальное разрешение 1678 X 944 (рис. 5.2).

$$diag = \frac{22 \cdot 25.4}{0.29} \approx 1926pix$$

$$x = \frac{16 * diag}{\sqrt{16 * 16 + 9 * 9}} \approx 1678pix$$

$$y = \frac{9 * diag}{\sqrt{16 * 16 + 9 * 9}} \approx 984pix$$

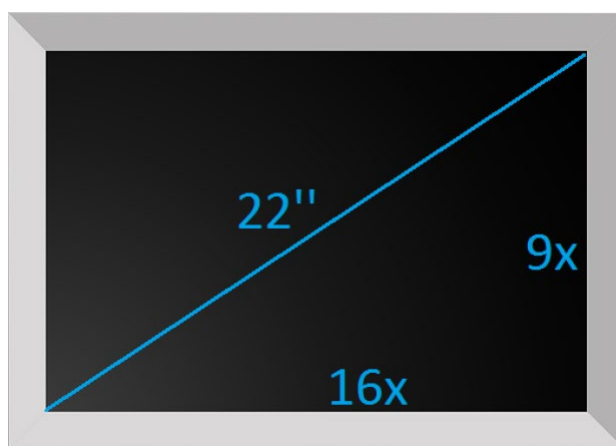


Рис. 5.2. Необходимая разрешающая способность монитора

Понятно, что все зависит от расстояния просмотра, контрастности, условий освещения. Но, тем не менее, можно сказать, что в среднем разрешения современных мониторов и телевизоров вполне достаточно для того, чтобы человек не различал отдельных пикселей.

5.1.2. Цветовое разрешение дисплея

Однако с цветовым разрешением дисплея всё обстоит несколько сложнее. Рассмотрим отдельно тон, насыщенность и светлоту.

Считается, что человек различает 150 спектральных тонов и от

10 до 60 оттенков насыщенности в зависимости от длины волны [26], [27]. Таким образом, при фиксированной яркости различимы несколько тысяч разных цветов. Это приводит нас к заключению, что для кодирования цвета достаточно 8 бит на канал. С помощью 24-битного представления можно передать все различимые человеком цвета (без учета светлоты).

Возможности человеческого глаза на данный момент существенно превосходят возможности устройств получения изображений и устройств вывода изображений. Считается, что человек в состоянии адаптироваться к освещению в пределах 10 порядков изменения яркости. При этом одновременно глаз различает до 5 порядков. Современные мониторы дают максимум 2 порядка. Таким образом, даже если в сцене оказалось несколько объектов различной яркости: яркое небо, солнце, освещенная земля, тени, то визуализировать всё это разнообразие на мониторе или телевизоре не получится.

Полученные яркости растянутся на доступный диапазон, реалистичность резко ухудшится, всё качество визуализации будет потеряно. Существует огромное количество задач и сцен, в которых это имеет большое значение. То, как мы видим солнце в реальной жизни, разительно отличается от того, как мы видим солнце на фотографии, где солнце может иметь яркость, сравнимую с яркостью иных объектов.

5.1.3. Статический и динамический диапазон устройств

Динамический диапазон сцены - отношение максимальной яркости к минимальной. Для измерения динамического диапазона устройств так же можно использовать линейное соотношение максимума и минимума. На практике минимум освещенности никогда не бывает равен 0, так как у монитора всегда есть минимальный уровень отражаемого света. Нулевое значение данного линейного отношения в точке означает отсутствие воспринимаемой величины цвета. Линейные соотношения зачастую оказываются очень большими и неудобными в использовании.

Поэтому используются другие модели, например:

- 1) Стоп (двоичный логарифм отношения) - часто применяется в фотографиях
- 2) Децибел (десятичный логарифм отношения) - применяется для одномерных сигналов

Таким образом, при помощи логарифма мы можем измерить диапазон яркости и громкости в стопах и децибелах.

Статический диапазон устройства - разница между максимальной и минимальной освещенностью в данный момент времени, а динамический диапазон устройства - во все моменты времени.

Например, статический диапазон человеческого глаза приблизительно равен 4 порядкам, а динамический диапазон - десяти. Такой скачок достижим за счет способности глаза к адаптации. Адаптация происходит как на уровне реакции зрачка, так и на уровне нервных клеток сетчатки.

Статический диапазон монитора - 2 порядка линейной интенсивности. Однако, увеличивая мощность подсветки, можно увеличить максимальную яркость монитора, и, следовательно, динамический диапазон. Этим фактом часто пользуются производители мониторов, указывая завышенные значения контрастности. Нужно понимать, что при активизации подсветки яркость самого темного пикселя также увеличивается. Это значит, что реальный контраст и диапазон отображаемой фотографии не изменится. Максимум, что можно сделать - изменить уровень подсветки для общего уровня яркости сцены: если визуализирован солнечный день, увеличить подсветку, если мрачное подземелье - уменьшить. С практической точки зрения, гораздо важнее одновременный уровень яркости для демонстрации и темных и светлых объектов в один и тот же момент времени.

В таблице 5.1 приводятся типичные значения яркостей излучения (в канделах на метр квадратный). Из таблицы видно, что яркость современных мониторов корректно отображает яркость ограниченного набора сцен. Остальные сцены можно отобразить лишь приближенно, используя специальные техники для повышения реализма.

Фон	Яркость [кд/м ²]
Ночное небо без луны	0.00001
Ночное небо с лунной	0.001
Ясный день	1000
Солнечный день	10000
Максимальная статическая яркость обычного монитора (CRT, LCD)	1000

Таблица 5.1. Яркость некоторых сцен

5.1.4. LDR и HDR

Итак, изображение широкого динамического диапазона — изображение, диапазон яркости которого превышает 8 бит (то есть динамический диапазон превышает 256:1). Все изображения, которые вы видите в этой книге — изображения узкого динамического диапазона, т. к. они ограничены возможностями выводящего устройства (экрана или бумаги). Ниже представлены 2 пары изображений (рисунки 5.3 и 5.4). Слева показано LDR, справа - специальным образом визуализированное HDR. Заметьте, что в первой паре на левом изображении недосвечена лодка, а небо пересвечено. В реальности мы бы увидели и детали лодки, и детали на небе, но возможностей фотоаппарата не хватило, чтобы запечатлеть всё в одной экспозиции. На правом изображении это было компенсировано, поэтому результат более близок к реальности. Во втором примере на левом изображении были потеряны детали за окном.

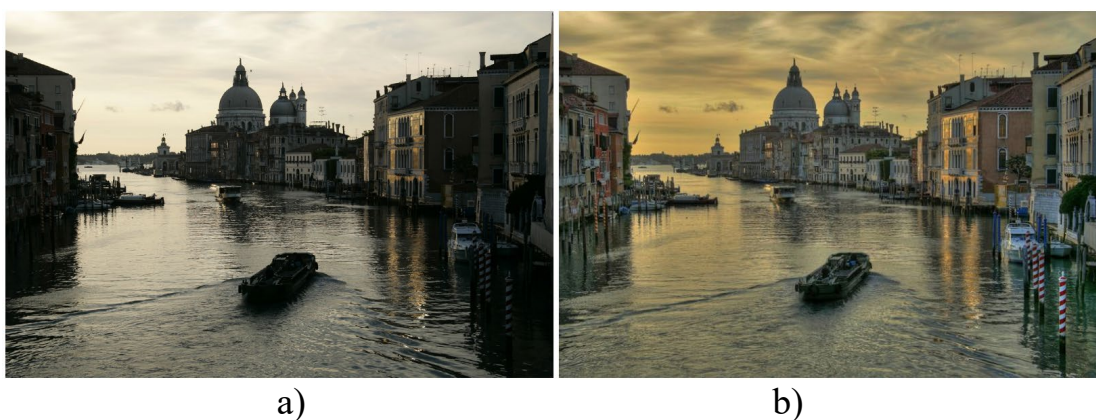


Рис. 5.3. Пример фотографии без использования (a) и с использованием (b) алгоритма тональной компрессии



a)

b)

Рис. 5.4. a) Пример фотографии (интерьер) без использования алгоритма тональной компрессии. b) Пример фотографии (интерьер) с использованием алгоритма тональной компрессии.

Изображение широкого динамического диапазона может быть использовано везде, где может быть использовано обычное изображение. Обратное неверно. Поэтому область применения HDR охватывает множество применений LDR. Вот лишь краткий список приложений, в которых использование HDR критично:

- Физически-корректная визуализация (техники глобального освещения)
- Эффекты дополненной реальности (спецэффекты в кино, мультфильмы)
- Симуляция человеческого зрения
- Профессиональная фотография
- Компьютерные игры

Список приложений со временем будет только расширяться. Результаты алгоритмов фотореалистичного синтеза, которые будут рассматриваться во второй части курса, без потерь описываются изображениями широкого диапазона. Для представления их на экране нужно использовать методы тональной компрессии, которые будут рассмотрены в ниже.

В заключение раздела приведем пример результатов фотореалистичного синтеза с использованием HDR (рис. 5.5).

a)



b)

Рис. 5.5. а) Пример синтеза без использования алгоритма тональной компрессии. б) Пример синтеза с использованием алгоритма тональной компрессии.

5.2. Получение изображений широкого динамического диапазона

Источником изображений широкого динамического диапазона может служить либо виртуальная реальность, либо реальный мир.

В первом случае, у нас имеется некоторый алгоритм синтеза изображений. В этом алгоритме мы можем напрямую работать с физическими величинами (можем даже проводить вычисления для спектральных распределений). В результате мы получаем энергетический срез сцены в пространстве экрана. Таким образом, фактически в алгоритме синтеза мы получаем изображение широкого динамического диапазона. Далее нужно сохранить результат в некотором формате, минимизируя по возможности потери (об этом в секции 3) или же вывести изображение на монитор (об этом в секции 4).

Во втором случае физическое излучение реального мира фиксируется с помощью устройств ввода (фото и видеокамер). У регистрирующей аппаратуры существуют физические ограничения.

1) Матрица фотоаппарата имеет довольно узкий

динамический диапазон. Современные цифровые зеркальные камеры поддерживают 14 бит на канал (т. е. 16384:1). Этого достаточно для многих сцен, но диапазон уже, чем диапазон человеческого зрения. Более простые фотоаппараты в принципе не обладают столь хорошими матрицами.

- 2) Программное обеспечение фотоаппарата зачастую сжимает информацию до 8 бит на канал.

Итак, возникает ситуация, когда полученное с помощью фотокамеры изображение не может передать весь динамический диапазон реальной сцены. Что делать в таком случае? Как получить изображение широкого динамического диапазона при ограниченных возможностях матрицы фотоаппарата?

5.2.1. Получение HDR-изображения из набора LDR-изображений

Фотограф имеет возможность регулировать время выдержки, в течение которого свет попадает на матрицу. Благодаря этому он может получить ряд изображений с разной экспозицией. Если время выдержки мало, то на матрицу поступит энергия лишь с тех направлений, где она высокая. Полученное изображение будет содержать детали в самых ярких областях сцены, а во всех других изображение будет темным. Если увеличивать время выдержки, то в темных областях начнут проявляться детали, а в светлых произойдет переполнение, пересветка области. Таким образом, снимая одну и ту же сцену с разной экспозицией, можно получить набор LDR-изображений, содержащих достоверную информацию о разных частях сцены. Набор таких изображений дан на рисунке 5.6.



Рис. 5.6. Вверху набор фотографий с равной выдержкой. Внизу те же фотографии, цветами выделены области с хорошо различимыми деталями.

На левом изображении плохо различим дом и площадка перед ним, зато хорошо видно дорожку и листву дерева на переднем плане. На среднем изображении хорошо различимы детали дома, травы и листвы на заднем плане, зато дорожка уже не видна. На третьем хорошо различима площадка перед домом, а всё остальное - слишком темное.

Формализуем задачу и опишем алгоритм поиска физических значений яркости по набору фотографий с разной выдержкой.

На входе:

- набор цифровых фотографий $j = 1 \dots n$, 24 бит на пиксель; в процессе съемки освещение не меняется, объекты в кадре не движутся;
- для каждой фотографии абсолютное или относительное время экспозиции Δt_j .

На выходе: HDR-изображение.

Алгоритм основан на принципе обратимости, который является физическим свойством как фотохимических, так и электронных систем получения изображения. Откликом точки на пленке или элемента сенсора будет экспозиция X . Принцип обратимости говорит о том, что экспозиция может быть задана как произведение освещенности $E \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$ и времени t , т.е. имеет единицы $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} \right]$. Таким образом, имея значения X и t , можно найти исходную освещенность точки, которую можно считать пропорциональной искомой световой яркости L . К сожалению, значение пикселя в фотографии не равно X . Это происходит по нескольким причинам:

- 1) внутрикамерная обработка и необходимость сохранения в 24-битный формат приводят к нелинейному кодированию цвета;
- 2) из-за ограниченной чувствительности сенсоров при малых t или E значение экспозиции будет столь мало, что сенсор дает нулевой отклик. А при больших значениях, наоборот - максимальный для данного сенсора.

Будем считать значение i -го пикселя в изображении j равным Z_{ij} . Тогда

$$Z_{ij} = f(X) = f(E_i t_j)$$

где f - характеристическая кривая (функция) камеры. Она преобразует экспозицию в значение пикселя. Для построения HDR-изображения эту функцию необходимо знать. Для учебных целей можно принять ее равной кривой гамма-коррекции с $\gamma = 2.2$. Так как эта функция монотонна, то она обратима. Если

предположить, что эта функция известна, то $f^{-1}(Z_{ij}) = E_i \Delta t_j$. Тогда

$$E_i = \frac{f^{-1}(Z_{ij})}{\Delta t_j}$$

Проблема заключается в том, что таким способом нельзя восстановить освещенность по одному изображению, т.к. информация в недосвеченных и пересвеченных пикселях будет потеряна. Также нельзя доверять яркости пикселей около нуля и близких к насыщению. В пикселях около нуля сказывается цифровой шум, а в ярких пикселях возможные засветки от ярких источников света, попавших в соседние пиксели. Поэтому надо брать информацию из всех изображений с разными весами. Введем функцию $\omega(Z)$, которая возвращает вес пикселя Z в зависимости от его яркости и с этими весами усредним значения одного пикселя i для разных значений экспозиций j . Таким образом

$$E_i = \frac{\sum_{j=1}^n \omega(Z_{ij}) \frac{f^{-1}(Z_{ij})}{\Delta t_j}}{\sum_{j=1}^n \omega(Z_{ij})}$$

Для выбора функции $\omega(Z)$ возможны варианты. Если предположить, что $Z_{ij} \in [0; 1]$, то можно использовать функцию типа $1 - (2z - 1)^{12}$. Отдельно придется обрабатывать ситуации с нулем в знаменателе и, возможно, настраивать функцию для борьбы с цифровым шумом. Результирующие E_i представляют собой значение одного канала изображения. Все приведенные выше рассуждения применяются к каждому каналу и результат сохраняется (без нелинейных преобразований) в один из HDR-форматов. В описанном выше алгоритме есть два важных момента. Первый - выбор весовой функции $\omega(Z)$ и второй - неизвестный вид кривой отклика $f(X)$. Неаккуратное исполнение этих моментов может привести к тому, что после деления значения интенсивности пикселей будут сильно отличаться.

5.2.2. Выбор весовой функции

Если неправильно учтена кривая отклика камеры, то эта ошибка будет систематической, иначе причиной несовпадения может быть одна из следующих причин: шум, изменение сцены за время фотографирования, краевое или близкое к краевым значение пикселя. Проблемы такого типа решаются выбором весовой функции. При этом весовая функция может, в принципе, вообще обнулить веса у некоторых значений.

Весовую функцию можно выбрать несколькими способами. Например, не учитывать все недосвеченные (менее 0) и пересвеченные (более 255) пиксели, а остальные, поделенные на экспозицию члены, усреднять.

Однако этого часто бывает недостаточно. Темные пиксели содержат серьезный шум. Белые пиксели могут быть бликом. Функция смешивания присваивает каждому значению яркости (от 0 до 255) некоторый вес. Примеры таких функций представлены на рисунке 5.7. Они уменьшают вес у пикселей с низким уровнем доверия.

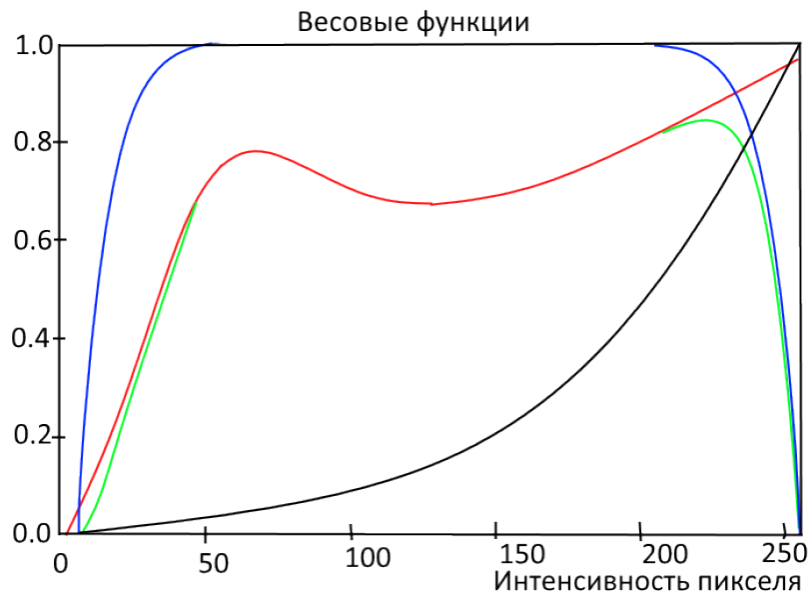


Рис. 5.7. Различные весовые функции. Черная линия - обратная кривая отклика камеры, синяя линия - hat-функция ($1 - (2z - 1)^2$), красная - функция Mitsunaga-Nayar, зеленая - произведение функций Mitsunaga-Nayar и hat-функции.

На рисунке 5.8 показан результат работы одного из методов построения HDR по LDR.

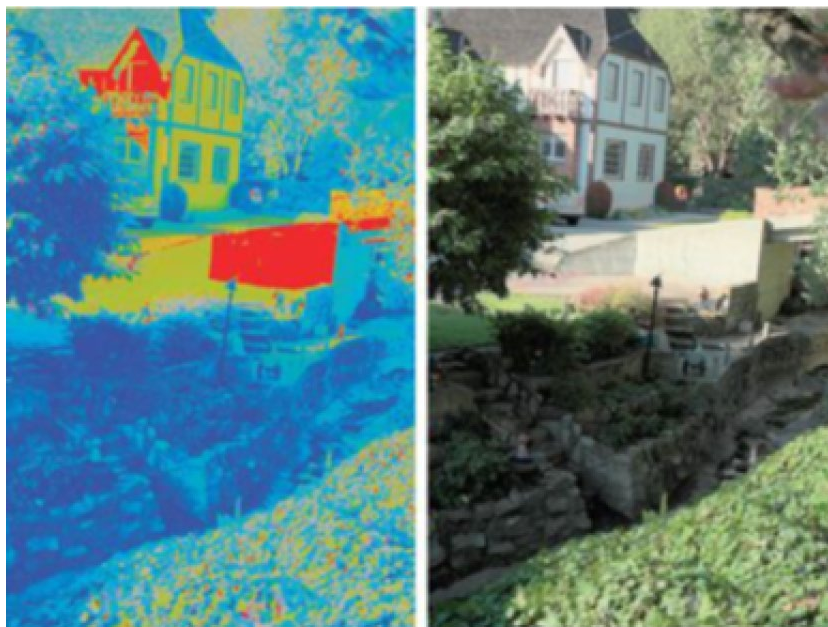


Рис. 5.8. Результат работы метода (справа) и закодированный индекс изображения (слева)

Слева цветом закодировано, из какого изображения был взят пиксель: красный означает, что из самого темного, желтый из среднего, синий из яркого. Правее показан результат визуализации изображения широкого динамического диапазона, при этом на мониторе старались передать все яркости, присутствующие в HDR. В итоге мы получили изображение, в котором содержится вся информация о нашей сцене, в то время как ни в одном из исходных изображений всей информации не было. Можно считать, что в полученном изображении содержатся яркости, пропорциональные абсолютным фотометрическим, и использовать изображение для расчетов (например, в качестве карты окружающей освещенности). Чтобы получить абсолютные значения яркости, нужно использовать базовый калиброванный объект, яркость которого мы точно знаем. А желательно произвести серию тестовых замеров для минимизации экспериментальной ошибки.

5.2.3. Восстановление кривой отклика камеры

Кривая отклика камеры может быть точно не известна. Кривые отклика реальных фотоаппаратов практически никогда не соответствуют гамма-функции, так как производители фотоаппаратов скрывают и патентуют свои кривые отклика, которые уменьшают шум, увеличивают насыщенность, корректируют цвета. Поэтому базовый алгоритм, представленный в разделе 5.2.1, будет работать с огрехами. Использование неверной кривой отклика приводит к тому, что отношения между яркостями в результирующем изображении получаются нелинейными. Однако, эту кривую можно посчитать прямо из исходных изображений. Вернёмся к уравнению $f^{-1}(Z_{ij}) = E_i \Delta t_j$. Возьмем логарифм от обеих частей и обозначим $g = \ln(f^{-1})$, тогда

$$g(Z_{ij}) = \ln(E_i) + \ln(\Delta t_j) \quad (*)$$

Новая функция g также монотонная и гладкая. Множество значений ее аргумента конечно. $Z_{ij} \in [Z_{min}, Z_{max}]$. Нам нужно минимизировать ошибку в системе уравнений типа (*). У нас $Z_{max} - Z_{min} + N$ неизвестных, где N - количество пикселей. Значит, необходимо больше уравнений, чем $Z_{max} - Z_{min} + N$. Кроме минимизации ошибки, нам необходимо также, чтобы результирующая функция была гладкой. Поэтому модифицируем результирующий функционал ошибки:

$$O = \sum_{p=1}^N \sum_{j=1}^p \left(g(Z_{ij}) - \ln(E_i) + \ln(\Delta t_j) \right)^2 + \lambda \sum_{z=Z_{min}+1}^{Z_{max}} g''(z)^2$$

Таким образом получается расширенная система уравнений, которую можно решить любым способом, например сингулярным разложением (SVD - singular value decomposition). На самом деле при добавлении постоянной к E , система уравнений останется верной, поэтому нужно дополнительно зафиксировать одну из точек результирующей функции. Например, можно ввести нормировку:

$$g\left(\frac{Z_{min} + Z_{max}}{2}\right) = 0$$

На краях функция будет менее гладкой. Можно тут тоже использовать весовую функцию ω внутри функционала минимизации:

$$O = \sum_{p=1}^N \sum_{j=1}^p \omega \left(g(Z_{ij}) - \ln(E_i) + \ln(\Delta t_j) \right)^2 + \lambda \sum_{z=Z_{min}+1}^{Z_{max}} \omega g''(z)^2$$

Для восстановления кривой не обязательно использовать все точки изображения, необходимо лишь, чтобы $N(p - 1) > Z_{max} - Z_{min}$. То есть случайным образом выбирается несколько точек с разной яркостью. Для них выбираются значения для всех выдержек. На рисунке 5.9 представлены такие значения 3 пикселей для 5 выдержек. По горизонтали отложено пиксельное значение яркости, по вертикали - значения правой части (*). В процессе оптимизации подбирается такое решение (множители для этих рядов), чтобы все точки легли на одну кривую (справа).

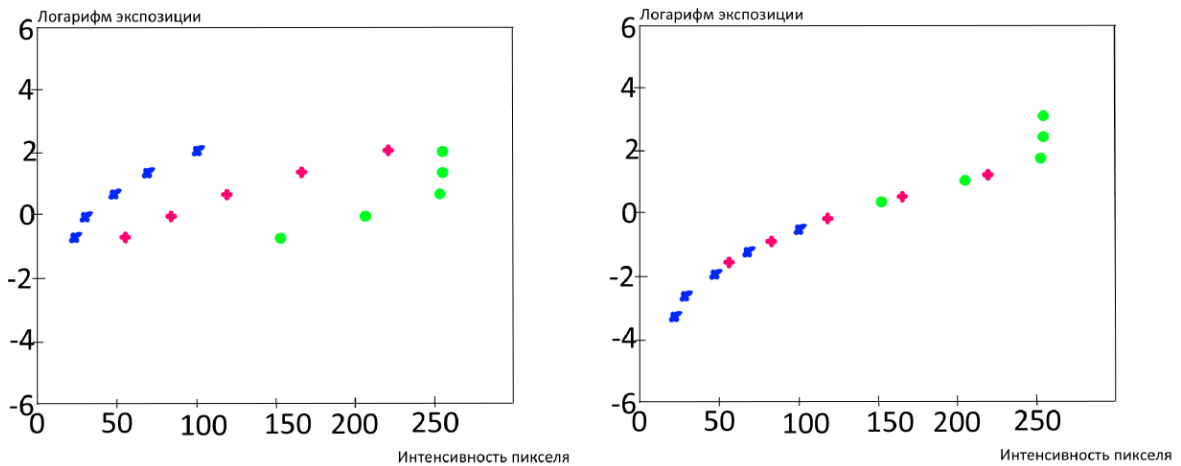


Рис. 5.9. Иллюстрация идеи восстановления кривой отклика

5.3. Хранение HDR-изображений

При фиксированной яркости в реальных изображениях разброс цвета по оттенкам относительно небольшой. Яркие цвета

чаще бывают белыми, а насыщенные яркие цвета - довольно редкое явление даже для изображений широкого динамического диапазона. Это наблюдение можно использовать как идею для раздельного кодирования яркости и цвета. При кодировании нам нужно меньше бит выделять на цвет, чем на яркость. Рассмотрим, например, рисунок 5.10: изображение и диаграмму корреляции цветочных каналов для него. Видно, что относительно диагонали разброс мал, то есть цвета очень сильно коррелируют. Значит, яркость имеет более сильный разброс, чем цвет.

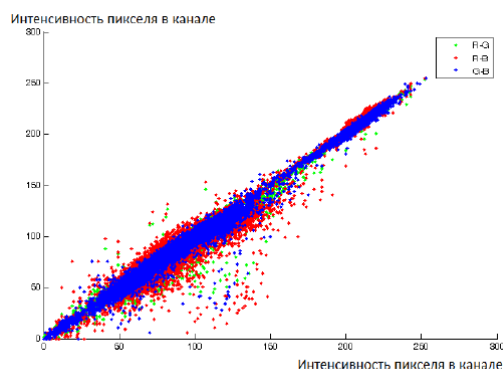


Рис. 5.10. а) - изображение реального мира, б) - график корреляции каналов (value)

5.3.1. Способы кодирования яркости

В прошлой главе мы дали пример гамма-кодирования и обратили внимание на выравнивание различной разницы по яркости с точки зрения человека при таком подходе.

$$\bar{I} = I^\gamma,$$

где γ — параметр кодирования, I — входное значение, \bar{I} — квантованное значение.

Цифровое кодирование требует квантования, при этом неизбежны ошибки. Эти ошибки нужно сохранять ниже различимого человеком порога. Поскольку отклик глаза на интенсивность не линеен, то и квантизация должна быть нелинейной, иначе будет заметна ступенчатость при переходе от светлого к темному. Если использовать гамма-кодирование, то этот эффект можно частично компенсировать. Однако для HDR-изображения гамма-кодирование уже не столь хорошее решение, поскольку наблюдатель адаптируется и под текущий уровень освещения. Если умножить яркость на достаточно большой коэффициент, то ошибка уменьшится, но сократится разрешение по яркости (уменьшится диапазон представимых значений) см. график на рисунке 5.11. Существуют и другие способы кодирования, например, логарифмическое кодирование и кодирование мантисса-экспонента. При логарифмическом кодировании яркость кодируется в соответствии с формулой:

$$\bar{I} = k^I,$$

где k — параметр кодирования, I — входное значение, \bar{I} — квантованное значение

Если известны границы диапазона I_{min} и I_{max} , то формула может быть переписана следующим образом:

$$I_{out} = I_{min} \left(\frac{I_{max}}{I_{min}} \right)^v, v \in \left[0, \frac{1}{n}, \frac{2}{n}, \dots, 1 \right]$$

Соседние значения при логарифмическом кодировании отличаются на постоянную:

$$\left(\frac{I_{max}}{I_{min}} \right)^{\frac{1}{n}}$$

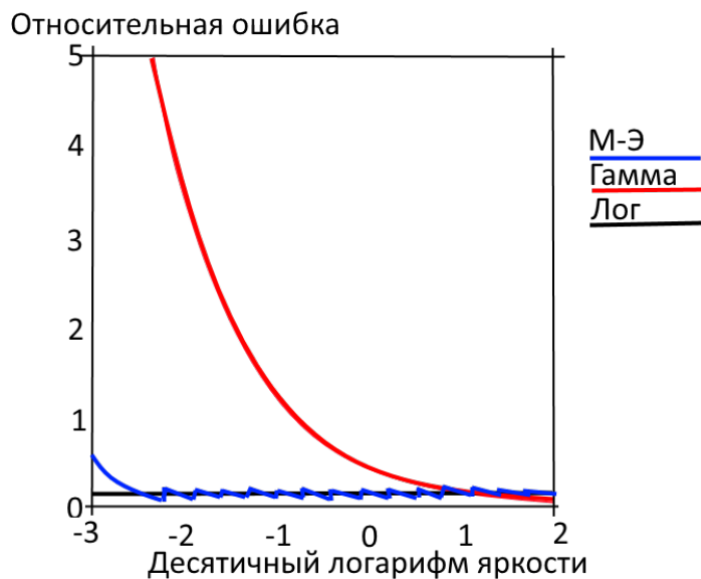


Рис. 5.11. Ошибки разных методов квантизации яркости в HDR-изображениях. По вертикали отложена относительная ошибка, но горизонталь десятичный логарифм кодируемой яркости.

Кодирование мантисса-экспонента по сути близко к логарифмическому. Число в этом представлении кодируется в виде комбинации мантиссы, обычно задаваемой в некоторых фиксированных пределах (например, от 0 до 1, или от 1 до 2) и экспоненты, значению степени при представлении числа в некоторой системе счисления (например, десятичной). Ошибка для этого типа кодирования является кусочно-монотонной функцией.

$$\bar{I} = M10^e,$$

где e — экспонента, M — мантисса, \bar{I} — квантованное значение.

На рисунке 5.11 показаны графики относительных ошибок в процентах для каждого из перечисленных видов кодирования.

Резюмируем вышесказанное. При уменьшении интенсивности ошибка при гамма-кодировании растет, но в узком диапазоне при условии адаптированного зрения ошибка при гамма-кодировании будет составлять менее одного процента. Логарифмическое кодирование имеет постоянную ошибку.

Кодирование мантисса-экспонента тоже имеет малое значение ошибки, однако она не монотонна.

5.3.2. Форматы хранения HDR-изображений Radiance

RGBE Encoding (HDR)

В 1985 Вард предложил физическую систему визуализации Radiance [28], [29]. Поскольку система вычисляла фотометрическую яркость, казалось необдуманным выбросить информацию, получая на выходе изображение. Поэтому использовалась 4-байтное представление с общей экспонентой. Кодирование свободно распространялось вместе с системой визуализации. По сей день формат RGBE остается самым популярным форматом хранения HDR-данных. В каком-то смысле является аналогом формата bpr для HDR в силу своей простоты. В формате используется предположение о том, что у цвета нет сильного варьирования по каналам, и это значит, что можно поделить значения каналов на яркости, чтобы уместить цвет в 8 бит, а оставшуюся информацию о самой яркости хранить отдельно. Один байт использовался для мантиссы красного цвета, другой - для зеленого, третий - для синего, четвертый дополнительно кодировал яркости. При этом яркости кодируется логарифмически. Итого на цвет уходит 24 бита (24 битное представление цвета), на яркости - дополнительные 8 бит. Базисное основание равно двум. Общая формула:

$$E = [\log_2(\max(R_W, G_W, B_W) + 128)]$$

$$R_M = \left[\frac{256R_W}{2^{E-128}} \right] G_M - \left[\frac{256G_W}{2^{E-128}} \right] B_M = \left[\frac{256B_W}{2^{E-128}} \right]$$

$$\begin{aligned} R_W &= \frac{R_M + 0.5}{256} 2^{E-128} G_W = \frac{G_M + 0.5}{256} 2^{E-128} B_W \\ &= \frac{B_M + 0.5}{256} 2^{E-128} \end{aligned}$$

Ошибка алгоритма составляет около 1%, покрывается 76 порядков яркости. Формат очень простой, кодирование и декодирование происходят очень быстро. Поддерживается RLE-кодирование (данное представление позволяет цепочке

одинаковых цветов кодироваться как совокупности «цвет» + количество далее идущих подряд пикселей с данным цветом). При HDR-кодировании в итоге в среднем можно получить 25-процентное сжатие. Хотя эта модель стала своего рода стандартом, ей присущи серьезные недостатки:

- 1) Избыточности динамического диапазона (примерно 62 порядка лишние с точки зрения восприятия человека, для других задач этот ранг может быть не избыточен). Было бы лучше, если бы формат имел меньший диапазон, но лучшую точности при том же числе бит.
- 2) Мантиссы могут принимать только положительные значения и не могут покрыть весь видимый диапазон. В случае использования вместо RGB XYZ увеличивается ошибка квантования из-за еще большего количества неиспользуемых значений.
- 3) Распределение ошибки неравномерно по отношению к восприятию. Шаги могут быть различимы для насыщенного голубого и розового (5%).

TIFF (Tagged Image Format)

Одной из первых групп, создавших стандарт кодирования изображений широкого динамического диапазона, был отдел компьютерной графики компании Lucasfilm, который в середине 80-х отделился и стал известен как Pixar. Требовалось сохранять визуализированные изображения. Плёнка способна сохранять динамический диапазон, превосходящий отображаемый на дисплее, при этом кривая скорее логарифмическая. В соответствии с этим в стандарте также используется логарифмическое кодирование.

В формате используется 3 канала, но для каждого отводится 11 бит информации. Таким образом, удалось закодировать динамический диапазон 3600:1 (недостаточно широкий) с шагом в 0.4% (глаз различает 1%, то есть точность вполне достаточная). Цвета не могут принимать отрицательные значения, значит невозможно представить весь цветовой охват.

В дальнейшем расширения формата позволили сохранять в

себе 32-битные числа с плавающей точкой, т. е. 96 бит на пиксель. При этом размер файла, разумеется, получался огромным.

LogLuv TIFF

Более эффективное кодирование формата TIFF - LogLuv-кодирование. В 1997 Вард решил исправить ошибки, допущенные при составлении RGBE HDR. Он представил кодек LogLuv [30] в библиотеке TIFF. Это кодирование основано на восприятии и спроектировано таким образом, чтобы шаг квантизации соответствовал порогам обнаружения контраста и цвета. Ошибка при этом квантовании всегда ниже различимого диапазона. Отделив цветности и яркости и применив логарифмическое кодирование к яркости, Вард получил очень эффективную квантизацию. Существует 3 варианта логарифмического кодирования.

- 1) 10 бит на яркость и 14 бит на пару (u' , v'). Это было сделано в основном для доказательства, что использование моделей восприятия помогает эффективнее использовать память. В этом случае можно было на неразличимом уровне работать с цветовым охватом и 4.8 порядками яркости. Пара значений кодировалась индексом на диаграмме цветности (см. рис. 5.12)
- 2) 16 бит на яркость, динамический диапазон 38 порядков, шаг квантизации 0.3%
- 3) 16 бит на яркость и по 8 бит на каждый цветовой канал.

Формат не получил широкого распространения. Часть людей предпочитает пользоваться знакомым цветовым пространством (RGB). Объективно это очень хороший, компактный формат, позволяющий наиболее эффективно использовать память запоминающих устройств.

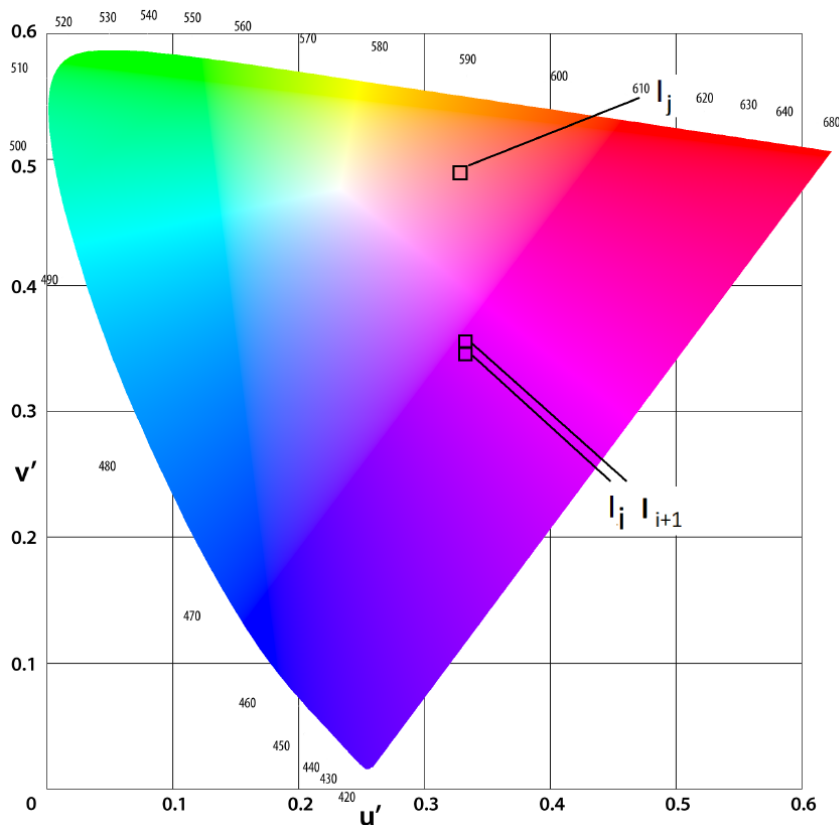


Рис. 5.12. Принцип кодирования пары (u', v') в формате LogLuv TIFF. Индекс кодирует область цветовой диаграммы. В пределах одного индекса разница между цветами незаметна человеком.

OpenEXR

Формат был представлен в 2002 как открытый формат, с тех пор широко используется. Это оболочка общецелевого назначения для 16-битных данных. Другое название этого формата “S5E10” (“Sign plus 5 exponent plus 10 mantissa”). OpenEXR также поддерживает стандартный 32-битный вещественный цвет с плавающей точкой. Современный формат, был разработан как открытый стандарт. С одной стороны удобный, т.к. открыт для всех спецификаций, есть открытые библиотеки для загрузки и сохранения. С другой стороны - формат был разработан для реализации весьма серьезных алгоритмов для хранения HDR-изображений. В последние годы его поддержка есть во многих программах редактирования изображений.

Может представлять отрицательные значения цвета,

покрывает видимый цветовой охват и диапазон 10.7 порядков яркости с относительной точностью в 0.1%. Поскольку человек может одновременно видеть не более 4 порядков яркости, можно использовать этот формат данных совместно с архивацией. Особенности формата OpenEXR:

- 1) Ограничено максимальное значение (при этом мы всегда можем использовать некоторый нормировочный коэффициент, теряя в диапазоне представимых значений).
- 2) Шаг квантования 0.1%. Такой маленький шаг выбирать разумно, когда требуется дополнительно обработать изображение. Ведь после обработки ошибка возрастает.
- 3) Есть разные форматы сжатия, в том числе и современное сжатие без потерь на основе вейвлетов.
- 4) Спецификация OpenEXR предлагает возможность использования дополнительных каналов, куда можно записать информацию о прозрачности или глубине.
- 5) Формат хранения half float поддерживается современными графическими картами.
- 6) Библиотека распространяется свободно.

Форматы с обратной совместимостью

Идея использования форматов с обратной совместимостью (например, JPEG-HDR) состоит в том, что данные могут интерпретироваться как LDR-изображения и воспроизводиться классическими просмотрщиками изображений, поддерживающих JPEG. А специальные просмотрщики, знакомые с расширением стандарта могут обрабатывать и воспроизводить изображение широкого динамического диапазона.

В метаданных может храниться уменьшенная копия изображения, в пиксели которой записаны коэффициенты, на которые нужно умножить значения исходного пикселя для восстановления изображения широкого динамического диапазона. Если программы не знают о дополнительном изображении в метаданных, они покажут основную картинку без усиления, иначе интерполируют коэффициенты масштабирования для получения HDR-изображения.

Таблица 5.2 подводит итог рассмотренных форматов хранения HDR изображений. По таблице можно сделать выводы, что наиболее удачными на сегодняшний день являются форматы Open EXR и LogLuv TIFF.

Формат хранения	Покрытие видимого цветового охвата	Динамический диапазон (порядки)	Шаг квантования	Объем данных пикселя (бит)
sRGB	Нет	1.6	Переменный	24
RGBE	Нет	76	1%	32
XYZE	Да	76	1%	32
Pixar TIFF	Нет	3.8	0.4%	33
LogLuv 24	Да	4.8	1.1%	24
LogLuv 32	Да	38	0.3%	32
EXR	Да	10.7	0.1%	48

Таблица 5.2. Форматы хранения HDR-изображений

Форматы RGBE, XYZE избыточны, форматы sRGB, Pixar TIFF недостаточны для представления различимых глазом цветов. У формата Open EXR более широкое распространение, а возможности эффективного сжатия без потери компенсирует избыточный объем данных пикселя.

5.4. Визуализация HDR-изображений. Алгоритмы тональной компрессии.

Большинство современных средств визуализации рассчитано на работу с LDR-изображениями. В последнее время появились мониторы с более высоким динамическим диапазоном, позволяющим превосходить ограничения стандартных LCD-дисплеев (кратко будет рассказано в конце раздела). Однако основная масса дисплеев оперирует 256 градациями яркости.

Пусть имеется некоторое HDR-изображение, содержащее яркости в пределах шести порядков (от 0 до 100 000). Для представления модельного изображения на экране нужно тем или иным способом сопоставить каждому из 100 001 значений яркости в данном пикселе экрана значение в диапазоне монитора (от 0 до

255). При этом, разумеется, произойдет потеря информации.

Алгоритмы тональной компрессии стараются уменьшить динамический диапазон изображения таким образом, чтобы минимизировать потерю информации с точки зрения наблюдателя. Алгоритмы тональной компрессии отвечают на вопрос: “Как в условиях ограниченного диапазона оборудования отобразить на нём изображения, таким образом, чтобы с точки зрения наблюдателя отображенное изображение воспринималось идентичным исходной сцене?”

Простейший вариант отображения диапазонов - обрезать значения, или взять их с некоторым сдвигом. Это приведет к тому, что всё, что было ярче верхней границы или темнее нижней, просто станет белым, и все детали за пределами порогов станут неразличимы. Ясно, что для большинства изображений это приведет к нехватке реализма. Другой простой вариант - нормировать изображение. В этом случае мы теряем детали на изображении (т. е. если на картинке солнце яркостью 100000 и остальная сцена, которая укладывается, скажем, в 500 - то на сжатом изображении мы не увидим ничего, кроме солнца). Можно применить также нелинейную функцию, которая переведет значения от 50 000 до 100 000 в диапазон от 150 до 255, а все остальное - в диапазон от 0 до 150.

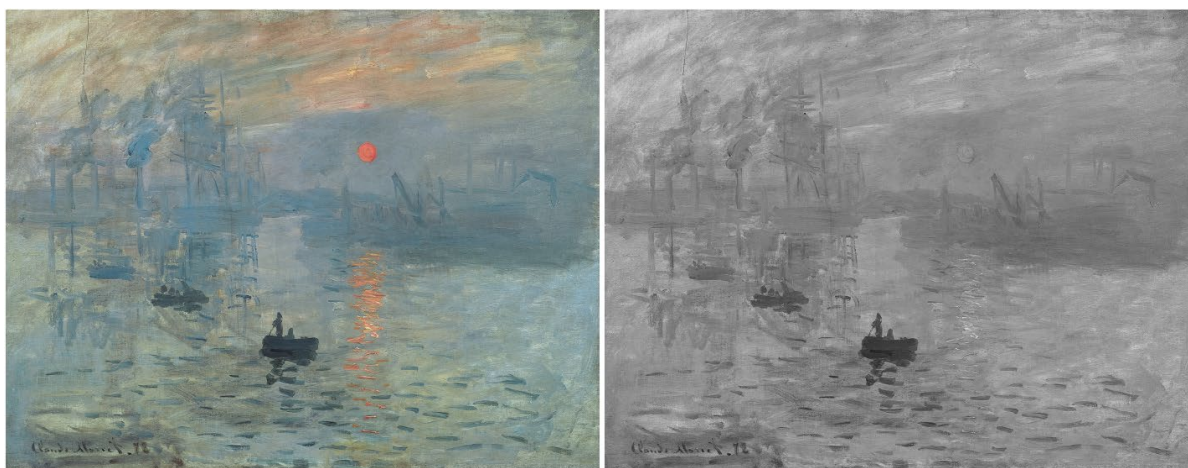


Рис. 5.13. Клод Моне. "Впечатление. Восходящее солнце", 1872. Слева - цветная репродукция, справа - черно-белая.

Цель алгоритма тональной компрессии - показать на экране

изображение, максимально близкое к тому, что увидел бы человек, находясь в сцене. Решаема ли данная задача в принципе? Оказывается, вполне решаема. На протяжении столетий она успешно решалась художниками, отображающими окружающий мир с помощью ограничений имеющейся палитры. При этом вы не раз сами убеждались в достигаемом ими реализме. В своей работе художники использовали собственную зрительную систему для верификации получающегося правдоподобия. Эль Греко использовал насыщенные цвета противоположных оттенков для увеличения видимого диапазона сцены. Также он прорисовывал контуры темными и светлыми мазками, что увеличивало воспринимаемый контраст изображения. На рисунке 5.13 изображено знаменитое полотно Моне «Impressions at Sunrise». Солнце и облака имеют одинаковую физическую яркость. Однако насыщенный красный солнца помещен на насыщенный синий фон неба, что усиливает впечатление. Справа приведен обесцвеченный вариант изображения, на котором солнце почти незаметно.

После эры художников, за дело взялись фотографы. Выдающимся мастером можно считать Ансея Адамса, он первым систематически измерил диапазон всего имеющегося оборудования. Изобретенная им зонная система позволила с точностью предсказать, какие детали он может заснять на пленку, поэтому он мог выставить правильные настройки съемки до спуска затвора. Кстати, его идеи легли в основу одного из алгоритмов тональной компрессии, о котором будет рассказано далее.

5.4.1. Классификация операторов тональной компрессии

Операторы тональной компрессии целенаправленно разрабатываются учеными вот уже без малого полвека. Классифицировать все имеющиеся на сегодняшний день наработки довольно сложно, однако некоторые общие закономерности выявить, все-таки можно. Среди операторов тональной компрессии можно выделить минимум 2 основных типа:

- глобальные, пространственно-равномерные операторы,
- локальные, пространственно-неравномерные операторы.

Первые еще иногда называют TRC (tone reproduction curve), вторые – TRO (tone reproduction operator) [32]. Глобальные операторы используют идентичную кривую сжатия для всех пикселей изображения. Локальные операторы используют информацию о пикселе и его окружении для того, чтобы скорректировать значение яркости вокруг этого пикселя.

Иногда в литературе [8] можно встретить выделение третьего типа операторов - временные тональные операторы. В таких операторах как правило учитываются не только пространственные, но и временные законы восприятия зрительной системы. Далее мы не будем останавливаться на них подробнее. Интересующиеся могут самостоятельно изучить статьи [32] и [8].

В дополнение к сжатию диапазона яркости, тональная компрессия может подражать воспринимаемым характеристикам, воспроизводя изображение, возбуждающее в зрительной системе тот же отклик, что и реальная сцена. Например, оператор тональной компрессии может пытаться сохранять такие характеристики как контраст, яркость или четкость - черты, которые могут быть утеряны при сжатии. Для корректного сжатия диапазона нужно разрабатывать психофизиологические модели восприятия цвета и видимого контраста. Часто методы тональной компрессии сосредотачиваются на единичных аспектах, таких как восприятие яркости. Это происходит, потому что отсутствуют глубокие знания об устройстве зрительной системы человека. Однако такие алгоритмы не эффективны, поэтому часть исследователей не рассматривает устройство зрительной системы человека вообще и работает исключительно с экспериментальными данными.

Резюмируя, можно выделить вторую плоскость классификации алгоритмов тональной компрессии:

- экспериментальные,
- теоретические.

Нужно также отметить важность нормировки изображений (рисунок 5.14). Для исходного изображения широкого динамического диапазона настоящая яркость, как правило, неизвестна. Поделенная на экспозицию, яркость изображения всегда получается приведенной к некоторому диапазону в зависимости от того, какой алгоритм синтеза мы используем. Это приводит к проблемам, т.к. если у нас в некоторых пикселях изображения яркость, близкая к нулевой на грани распознавания человеческим глазом, и нужно визуализировать ее на мониторе так, как эту яркость увидел бы человек, то должны работать специфические механизмы (колбочки, а не палочки или палочки, а не колбочки), в зависимости от уровня яркости, при котором ведется наблюдение на мониторе. Вообще говоря, алгоритмы могут зависеть от абсолютной яркости.

Если для той или иной задачи требуется восстановить точные значения освещенности для реальной сцены, то для этого как правило необходимо иметь дополнительную информацию об устройстве, на котором производилась съемка (фотоаппарате). Каждому фотоаппарату соответствует свой коэффициент, связывающий значения на матрице с физической энергией. Этот коэффициент можно рассчитать по специальным калибровочным объектам.

В случае, если изображение создается в результате синтеза, необходимо аккуратно учитывать все физические преобразования яркости в результате отражений и преломлений, чтобы получить на результирующем изображении корректные физические значения. Соответственно, часть алгоритмов тональной компрессии (обычно из числа теоретических) требует физических значений яркости на вход, а другая часть не требует.

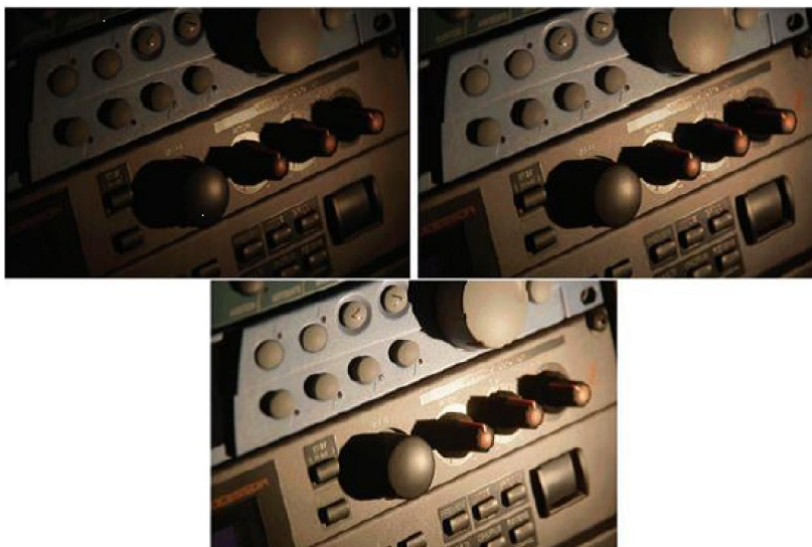


Рис. 5.14. Пример работы одного алгоритма для разной нормировки физической яркости

5.4.2. Глобальные операторы тональной компрессии

Глобальные операторы имеют простой вид и очень высокую скорость работы, однако при любом выборе кривой мы теряем либо в бликах, либо в объектах, расположенных преимущественно в тени, ведь чем больше диапазон, тем больше значений нам нужно отобразить. Заметный плюс глобальных операторов — отсутствие артефактов на полученном изображении, так как изменения с пикселями происходят гладко, плавно, и локальные соотношения яркости между соседними пикселями не изменяются. Глобальные методы плохо работают с изображениями, где области интереса (детали) равномерно расположены по всему диапазону яркости.

С примером глобальных операторов мы уже сталкивались, когда говорили о гамма-коррекции. На самом деле гамма-коррекцию можно произвести и с изображением широкого динамического диапазона.

Исторически так сложилось, что в разные временные периоды исследователи стремились к сохранению в алгоритмах отображения тона различных психофизиологических характеристик. Первой такой характеристикой была яркость.

Впервые в 1984 Miller, Ngai and Miller [33] использовали экспериментальные данные для сопоставления яркости реальной и отображаемой сцены для цели определения освещенности пикселя в их системе визуализации. Они использовали психофизиологические данные из работы [34]. Далее Tumblin и Rushmeier [35] также сфокусировались на сохранении общего впечатления наблюдателя о яркости сцены. Они создали модель наблюдателя - математическую модель зрительной системы, которая включала свето-зависимые визуальные эффекты по преобразованию физических значений освещенности в воспринимаемую яркость.

Далее глобальные методы сместились в сторону сохранения контраста. Ward [36] пытался свести вычислительную сложность алгоритма к минимуму, умножая реальные значения на коэффициент. Основываясь на контрастной чувствительности глаза, он представил адаптацию зрения как сдвиг в абсолютной яркости освещенности, необходимой, чтобы наблюдатель заметил вариацию яркости. Недостатком его метода было откидывание очень ярких и темных значений. Эксперименты, на которые он опирался, проводились в лабораторных условиях и не учитывали сложности типичных условий наблюдения.

Работа Ward, Rushmeier и Piatko [37] представила технику выравнивания гистограммы для отображения воспринимаемых точных тонов в HDR. Фокус был сделан на различимости объекта и контрасте изображения, вторичная цель была в воссоздании субъективного отклика наблюдателя о консистентности наблюдаемых сцен. Они использовали тот факт, что зрительная система чувствительна к относительным, а не абсолютным изменениям яркости, поэтому яркое должно быть ярким, а тусклое тусклым вне зависимости от абсолютных значений. Кумулятивная гистограмма яркости используется для нахождения кластеров яркостных уровней и присваивает им итоговые уровни на основе контрастной чувствительности.

В 1999 Tumblin, Hodgkins and Guenter [38] представили 2 новых тональных оператора для имитации некоторых процессов адаптации зрительной системы человека. В процессе рендеринга послойный метод конструирует изображение из нескольких слоев освещения и свойств поверхности. Это делается путем разделения

изображения на слои и сжатия слоя освещения с сохранением отражательности и прозрачности, что уменьшает контраст с сохранением деталей. Второй, фовеальный метод, итеративно настраивается для сохранения деталей в регионе взгляда (на который наблюдатель указывает мышью) и сжимает остальное. Оба эти оператора вычислительно не затратные. Послойный метод подходит для статических синтетических сцен, а фовеальный - для интерактивных.

Adaptive Logarithmic Mapping For Displaying High Contrast Scenes

В статье [39] предлагается быстрая высококачественная техника тональной компрессии для отображения высококонтрастных изображений на устройствах с ограниченным динамическим диапазоном светимости. Метод основан на логарифмическом сжатии значений освещенности, таким образом имитируется отклик человека на свет. Представлена функция смещения мощности, автоматически варьирующая основание логарифма. Алгоритм удовлетворяет следующим требованиям:

- 1) согласованность с восприятием человека для изображений естественных сцен;
- 2) дополняемость и расширяемость;
- 3) минимизация артефактов (инверсия контраста, ореолы);
- 4) интуитивные параметры настройки;
- 5) интерактивность.

Яркость выходного изображения зависит от освещенности сцены. Значит, требуется найти множитель для яркости, аналогичный экспозиции. Для статических изображений вычисляется логарифмическое среднее сцены на основе значений освещенности в пикселях (адаптация к мировой освещенности). Для интерактивного приложения вычисляется логарифмическое среднее региона, окружающего пиксель (центр фиксации взгляда) и свернутого двумерным гауссовым ядром. Площадь выборки региона и фильтра Гаусса - 15% изображения, но может настраиваться.

Этот метод можно дополнить системой слежения за глазами.

Коэффициент нормировки также регулируется для настройки яркости выходного изображения под условия монитора (освещения в комнате).

Базисная функция для расчета выходной яркости такова:

$$L_d = \frac{\log(L_\omega + 1)}{\log(L_{max} + 1)}$$

Основание логарифма x варьируется между 2 и 10. При $x < 2$ присутствует слишком много деталей, сложно настроить яркости, при $x > 10$ идет большая потеря контраста. Основание логарифма интерполируется между двумя крайними значениями с использованием функции сдвига:

$$bias_b(t) = t^{\frac{\log(b)}{\log(0.5)}}$$

Итоговая функция тональной компрессии используется для вычисления отображаемого значения L_d . L_{dmax} характеризует максимальную освещенность дисплея. Параметр функции смещения обозначается b .

$$L_d = \frac{0.01L_{dmax}}{\log_{10}(L_{\omega max} + 1)} \frac{\log(L_\omega + 1)}{\log\left(2 + 8\frac{L_\omega}{L_{\omega max}}\right) \left(\frac{\log(b)}{\log(0.5)}\right)}$$

b настраивает сжатие в ярких областях и различимость деталей в темных областях (параметр интерполяции). Оптимальный диапазон значений параметра $b \in [0.7, 0.9]$. По результатам опросов наилучшее значение $b = 0.85$. Оказалось, что яркость изображения примерно удваивается для $b = 0.85$ и утраивается для $b = 0.7$ по сравнению с яркостью для $b = 1.0$. Это влияет на реализм изображений, несмотря на увеличение контраста. Поэтому мировая яркость должна быть домножена на дополнительный коэффициент:

$$L_{\omega\alpha} = \frac{L_{\omega\alpha}}{(1 + b - 0.85)^5}$$

Далее должна выполняться гамма-коррекция до вывода на

экран.

На рисунке 5.15 приведены примеры результатов работы алгоритма. В первом случае результат удовлетворительный, однако на втором примере изображение стало слишком белёсым, пропал контраст.

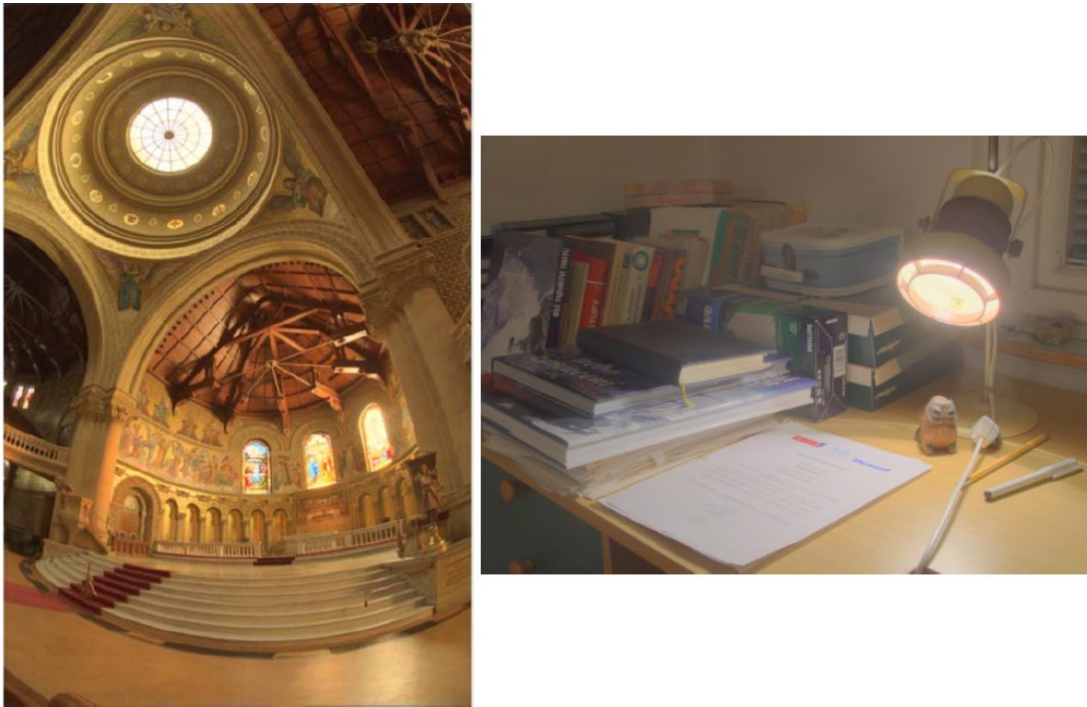


Рис. 5.15. Примеры работы алгоритма

5.4.3. Пространственно-зависимые операторы тональной компрессии

Среди пространственно-зависимых операторов можно выделить несколько подгрупп:

- 1) локальные операторы, действующие в ограниченной области вокруг данного пикселя;
- 2) частотные операторы, использующие разложение изображения на две и более частотных компонент;
- 3) градиентные операторы, модифицирующие изменения яркости на изображениях.

Впервые попытка создания алгоритма пространственно-

зависимой тональной компрессии была проведена в 1968 году [40]. Идея алгоритма была такова. Изображение делится на компоненту освещения (освещенность) и компоненту отражения (отражательность). Компонента освещения содержит большие перепады яркости, состоит из низких частот, а компонента отражения из высоких. Поэтому низкие частоты — это широкий динамический диапазон, а высокие — узкий динамический диапазон. Уменьшив низкие частоты в пространстве Фурье, можно сжать HDR данные с сохранением высоких частот. Далее появилось сразу несколько методов, одни из которых следовали этой идее (частотные методы), а другие выбрали свои направления исследований (локальные и градиентные методы).

Локальный оператор тональной компрессии. Photographic Tone Reproduction for Digital Images [41]

Эта статья базируется на зонной системе фотографа Анселя Адамса. В результате получается простой и быстрый экспериментальный метод (без моделирования зрительной системы человека). Информации об абсолютных значениях яркости не требуется, так как используется пользовательский интерактивный ввод. Суть метода такова:

- 1) весь диапазон яркости разбивается на совокупность зон;
- 2) средняя визуальная яркость в сцене сопоставляется средней зоне;
- 3) пространственно-равномерный оператор производит сжатие;
- 4) при этом для сохранения различимости важных областей используется пространственно-неравномерный оператор ретуши (“dodging and burning”).

Зонная система — это система практических замеров, когда фотограф использует информацию о замерах яркости для улучшения качества будущего снимка. Зоны обозначаются римскими цифрами от 0 до X (каждая следующая вдвое ярче предыдущей), означающими примерный диапазон освещенности сцены, а также приблизительную отражательность снимка. Всего печатных зон 11, а зон сцены намного больше. Зоны сцены

требуется отобразить в печатные зоны (Рис. 5.16).

Сначала фотограф определяет средне-серый цвет. Это субъективно средняя яркость области сцены, обычно соответствует печатной зоне V. Затем он определяет фотографический динамический диапазон. Динамический диапазон — это соотношение яркостей в самой светлой и самой темной областях в сцене. Фотографический динамический диапазон — это соотношение яркостей в регионах, где различимы детали. Из-за логарифмической зависимости зон от яркости можно выразить фотографический динамический диапазон как разность между максимальной и минимально-различимой зоной сцены.

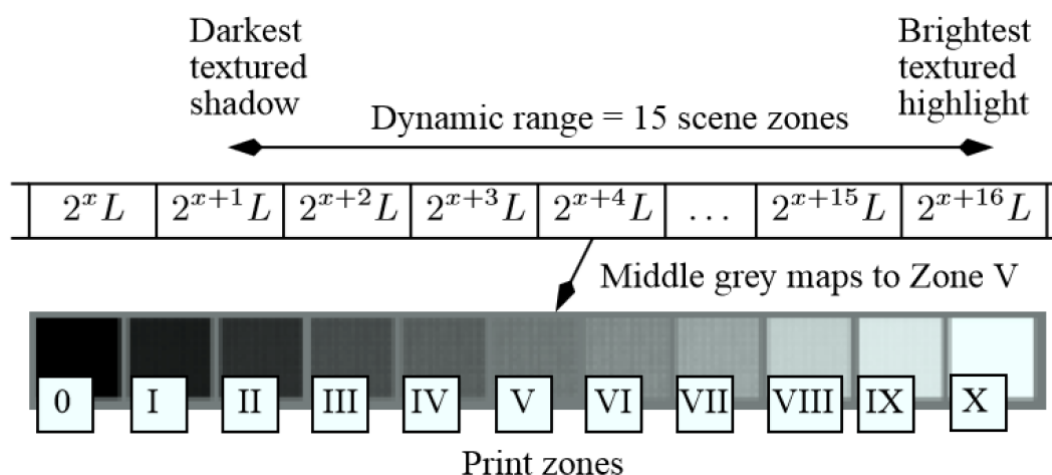


Рис. 5.16. Зонная система

Кроме того, важным является понятие ключа сцены. Ключ сцены изображает общую яркость сцены: сцена субъективно яркая, нормальная или темная. Ретушь - техника проявки, когда часть света удаляется с области снимка в процессе проявки (dodging), или наоборот добавляется больше света (burning). Сначала фотограф определяет освещенность средне-серой поверхности и отображает её в зону 5, отвечающей 18% отражательности снимка. Для сцен с высоким ключом серый будет темным регионом, для сцен с низким - одним из светлых регионов. Выбор зависит от художника, но можно использовать 18%-ную серую карту для автоматизации процесса. Затем фотограф считывает светлые и темные регионы для определения динамического диапазона сцены. Если диапазон не превышает 9

зон, то вся сцена со всеми деталями попадет в снимок. Иначе некоторые зоны отобразятся в абсолютно черный или абсолютно белый. Там, где произошла потеря деталей, можно использовать ретушь для внесения локальных изменений. Описанную процедуру сложно автоматизировать, например, непонятен выбор ключа. Тем не менее, субъективных настроек у алгоритма всего несколько. Ключ сцены - средний логарифм яркости.

$$\overline{L_\omega}(x, y) = \frac{1}{N} e^{\sum_{x,y} \log(\delta + L_\omega(x,y))}$$

В этой формуле $\overline{L_\omega}(x, y)$ - яркость пикселя, суммирование производится по всем пикселям изображения (N - число пикселей), δ - маленькое число для предотвращения сингулярности. Если ключ сцены нормальный, то отобразим полученное значение в 18% (значение ключа $a = 0.18$), иначе в некоторое другое:

$$L(x, y) = \frac{\alpha}{\overline{L_\omega}(x, y)} L_\omega(x, y)$$

Обычно сцены с нормальным диапазоном содержат несколько элементов с высокой яркостью (например, на небе). В традиционной фотографии сжимают обычно и низкие и высокие яркости, но в современной стараются сжать в основном высокие. Пример такого тонального оператора:

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y)}{1 + L(x, y)}$$

Эта формула гарантированно отобразит весь имеющийся диапазон, но это не всегда желательно. Иногда удобно выбрать некоторое ограничение сверху (L_{white}), все значения выше которого можно отобразить в белый цвет. Модифицируем формулу:

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y)}{1 + L(x, y)} \left(1 + \frac{L(x, y)}{L_{white}^2} \right)$$

Технику ретуши можно представить как выбор значения ключа для каждого пикселя. Ретушь обычно применяется для региона, ограниченного большим контрастом. Например, черное

дерево на светлом фоне. Размер локального региона вычисляется на основе многомасштабной меры локального контраста. Эта функция конструируется для каждого масштаба s и каждого пикселя (x,y) разницей двух гауссиан вида:

$$R_i(x, y, s) = \frac{1}{\pi(\alpha_i s)^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{\alpha_i s^2}}$$

Большой гауссиан в 1.6 раз превосходит меньший. Большой гауссиан текущего масштаба становится малым следующего. После свертки изображения с гауссианами, получаются функции отклика V_i :

$$V_i(x, y, s) = L(x, y)R_i(x, y, s)$$

Наименьший Гауссиан будет едва больше пикселя. Интеграция производится в терминах функции ошибки:

$$V(x, y, s) = \frac{V_1(x,y,s) - V_2(x,y,s)}{\frac{2\phi\alpha}{s^2} + V_1(x,y,s)},$$

где α - ключевое значение, ϕ - параметр четкости.



Рис. 5.17. Зонная система

Окрестность пикселя - максимальная площадь без резких изменений контраста. Уравнение вычисляется для разных масштабов. Там, где градиент яркости мал, мала разница между V_1 and V_2 . Поэтому, для выбора окрестности, V просеивается по порогу для выбора хорошего масштаба s_m . Начиная с наименьших) масштаба, ищем первый масштаб, где выполняется неравенство:

$$|V(x, y, s_m)| < \varepsilon$$

Далее используем локальное отображение:

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y)}{1 + V_1(x, y, s_m(x, y))}$$

Частотный оператор тональной компрессии

Основная идея частотных операторов состоит в разложении изображения на две компоненты: освещенность и отражательность. Человек более чувствителен к отражательности, поэтому можно сжимать освещенность, а отражательность оставлять без изменений. Далее мы подробнее изложим суть двух работ.

Авторы первой установили ограниченность области применения глобальных операторов тональной компрессии. Они намеренно не включали процессы адаптации и психофизиологические модели в свой оператор, а экспериментировали с пространственно-зависимым оператором. Метод теоретический, работает с физическими яркостями.

Авторы второй работы используют метод сохранения граней на основе билатеральной фильтрации. Базовый уровень (освещенности) получается в результате фильтрации, у неё уменьшается контраст. Итоговый метод получается быстрый, устойчивый. Метод экспериментальный, тональный оператор не пытается моделировать зрение.

Spatially nonuniform scaling function for high contrast images
[42]

Одноканальные изображения, сгенерированные

компьютером, домножаются на пространственно-неоднородные коэффициенты для отображения на стандартном CRT-дисплее. Пиксели с одинаковой яркостью на исходном изображении могут иметь разную интенсивность в результирующем изображении. Вопросы адаптации остаются в стороне.

Тестовое изображение - комната, освещенная одной лампой накаливания. Это изображение получается в результате трассировки лучей, также добавляется рассеянная компонента для аппроксимации непрямого освещения. Яркости консистентны с яркостями реальной комнаты. Задача ставится так. Требуется отобразить одно изображение в другое, минимизируя ошибку с точки зрения восприятия.

Изображение реального мира отображает любое значение из отрезка $[0;1]$ в излучательность: $R = r|r: [0, 1]^2 \rightarrow [0, \infty)$. Изображение реального мира (представленное функцией $F(x, y)$) отображается в растровое изображение P размера $(n_x, n_y)P = 0, \dots, n_x - 1 \times 0, \dots, n_y - 1: F = f|f: P \rightarrow [0, \infty)$. Растровое изображение вычисляется из реального изображения с помощью процесса, известного как фильтрация. В компьютерной графике процесс фильтрации обычно сводится к семплированию. Конечный динамический диапазон оборудования требует дальнейшего шага нормализации. Нормализованное множество растровых изображений: $\hat{F} = \hat{f}|\hat{f}: P \rightarrow [0, 1]$. Дискретная природа дисплея требует дискретного представления цвета каждого пикселя: $D = d|d: P \rightarrow l_0, l_1, \dots, l_n$.

Далее на экране получается растровое недискретизированное изображение, потому что применяется размытое ядро в результате излучения каждого фосфора. Если бы у нас была мера воспринимаемой близости, то можно было бы просто выбрать по ней ближайший к f элемент \hat{f} . Физические ограничения глаза создают артефакты. Внесение этих артефактов в изображение может увеличить реализм. Однако это нужно делать с осторожностью, так как мозг частично компенсирует эти артефакты. Поэтому авторы статьи предлагают не стимулировать локальный контраст, а стимулировать блик, объясняя это тем, что локальный контраст воспроизводим на дисплее. Рассматривается базовый способ отображения с обрезанием высоких яркостей:

$$\hat{f}(i, j) = \begin{cases} \frac{f(i, j)}{I_{clamp}}, & f(i, j) < I_{clamp} \\ 1, & \text{иначе} \end{cases}$$

Для изображений широкого динамического диапазона изображение либо выглядит слишком темным, если порог отсечения большой, либо возникают артефакты, если маленький. Можно уменьшить артефакты, используя более непрерывное преобразование, но тенденции сохранятся. Поэтому необходимо использовать пространственно-неравномерное отображение:

$$\hat{f}(i, j) = g(i, j, f, f(i, j))$$

Более удобно представить трансформацию как произведение оригинального изображения и коэффициента масштабирования:

$$\hat{f}(i, j) = S(i, j)f(i, j)$$

$$\text{где } S(i, j) = \frac{g(i, j, f, f(i, j))}{f(i, j)}$$

Из определения следует, что допустимые функции отображения должны лежать между этими граничными функциями в каждой точке (i, j) :

$$S_0(i, j) = 0, \quad S_{max}(i, j) = \frac{1}{f(i, j)}$$

Глаз более чувствителен к локальным изменениям яркости, вызванными локальными изменением отражательной способности объектов при переходе между соседними пикселями изображения, чем к глобальным изменениям яркости всего изображения. В результате этого, слабые пространственные изменения яркости в некоторой мере игнорируются глазом. Это значит, что мы можем отобразить изображение с более широким динамическим диапазоном на дисплей с более узким динамическим диапазоном. Поэтому, если S имеет слабый градиент, то результирующее изображение не должно слишком отличаться от исходного. S выбирается пропорциональным обратному размытому изображению f :

$$S(i, j) = \frac{1}{kf_{blur}(i, j)}$$

Далее авторы специфицируют точный вид фильтра и значение константы на основе экспериментальных данных. После этого у них получаются изображения, содержащие темный ореол вокруг источника освещения (Рис. 5.18).



Рис. 5.18. Зонная система

Для его компенсации они предлагают моделировать свечение вокруг источника (blooming). Оно наблюдается у объектов с высокой интенсивностью в результате преломления в глазу. Монитор не может создать достаточную яркость, чтобы воспроизвести этот эффект.

$$\hat{f}(i, j) = \begin{cases} k, & i = j = 0 \\ \frac{1-k}{I} F(i, j), & \sqrt{i^2 + j^2} < \frac{\omega}{2} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

где ω – ширина фильтра,

$$F(i, j) = \left| \sqrt{i^2 + j^2} - \frac{\omega}{2} \right|^n, n > 1$$

$$I = -F(i, j) + \sum_{i=-\frac{\omega}{2}}^{\frac{\omega}{2}} \sum_{j=-\frac{\omega}{2}}^{\frac{\omega}{2}} F(i, j)$$

где n – контролируемый параметр

Разумеется, при этом могут быть ошибки в изображениях с высокоинтенсивными не источниками, а отражателями. Однако, если метод применяется вместе с синтезом изображений широкого динамического диапазона, то можно однозначно установить, где находится источник и создать там эффект свечения.

Fast Bilateral Filtering for the Display of High-Dynamic-Range Images [43]

Метод основан на декомпозиции изображения на 2 масштаба. Базовый уровень кодирует изменения большого масштаба. Уровень детализации кодирует малые изменения. Только базовый уровень испытывает уменьшение контраста, поэтому сохраняются детали. Базовый уровень находится с использованием билатерального фильтра, сохраняющего границы. Это нелинейный фильтр, вес каждого пикселя вычисляется с использованием фильтра Гаусса, умноженного на функцию влияния (действует в пространстве яркости), что увеличивает вес пикселей с большой разницей интенсивности. Затем фильтрация ускоряется с помощью кусочной аппроксимации в области интенсивности и подходящим семплированием, благодаря этому достигается оптимизация в 2 порядка. Быстрый метод, не требует настройки параметров.

Предложенный метод связан с анизотропной диффузией. Размытие по Гауссу может быть интерпретировано в качестве решения уравнения теплопроводности: $\frac{\delta I}{\delta t} = -\Delta I$. То есть, интенсивность каждого пикселя рассматривается как тепло и распространяется в течение времени к своим 4 соседям, функция краевой остановки g изменяет проводимость в зависимости от градиента изображения. Это предотвращает прохождение теплового потока через края:

$$\frac{\delta I}{\delta t} = -\text{div}[g(\|\nabla I\|)\nabla I]$$

Ранее другими исследователями было предложено 2 выражения для функции краевой остановки:

$$g_1(x) = \frac{1}{1 + \frac{x^2}{\sigma^2}}$$

$$g_2(x) = e^{-\frac{x^2}{\sigma^2}}$$

где σ - параметр масштабирования в пространстве интенсивности. Специфицирует, какая величина градиента должна остановить диффузию. Дискретное уравнение диффузии:

$$I_s^{t+1} = I_s^t + \frac{\lambda}{4} \sum_{p \in \text{neighb}_4(s)} g(I_p^t - I_s^t) (I_p^t - I_s^t),$$

где t - дискретный шаг по времени. λ - скаляр, определяющий уровень диффузии. Это популярное средство сохранения границ, но очень медленное из-за дискретного процесса, результат зависит от времени останова, так как диффузия сходится к равномерному изображению. Билатеральная фильтрация используется как альтернатива. Это нелинейный фильтр, где выход - взвешенное среднее входов. Вес пикселя зависит также от функции g в пространстве интенсивности, которая уменьшает вес пикселей с большой разницей интенсивности (аналог функции остановки в анизотропной диффузии):

$$J_s = \frac{1}{k(s)} \sum_{p \in \Omega} f(p - s) g(I_p - I_s) I_p,$$

где $k(s)$ - нормализующий член: $k(s) = \sum_{p \in \Omega} f(p - s) g(I_p - I_s)$

Уменьшение контраста с сохранением границ может породить артефакты гало для четких границ из-за всплесков у высококонтрастных границ. Авторы предлагают такое объяснение. Артефакты возникают в тех местах, где недостаточно информации о соседях для отделения черт большого масштаба и малого масштаба. Избежать этой проблемы помогает нормализующий фактор k . Его можно использовать для определения пикселей, которые нужно исправить. Единственные

контролируемые пользователем параметры метода — это общая яркость и базовый контраст. Хотя предоставляются и автоматические значения. Благодаря устранению эффекта гало, это один из самых хороших методов. Примеры работы представлены на Рис. 5.19.

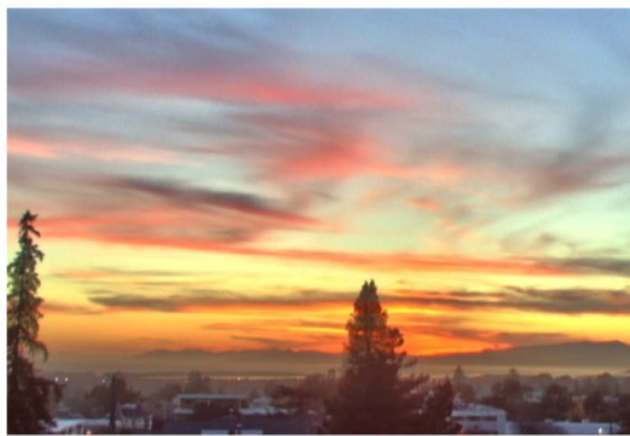
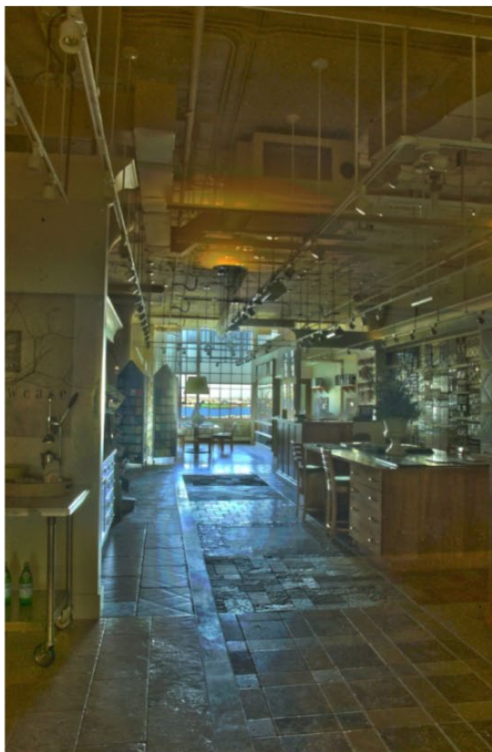


Рис. 5.19. Примеры работы алгоритма

Градиентный тональный оператор. Gradient Domain High Dynamic Range Compression [44]

Этот метод концептуально простой, эффективный устойчивый. Увеличивается амплитуда больших градиентов. Новое изображение с более низким динамическим диапазоном получается путем решения уравнения Пуассона для модифицированного поля градиентов. Результаты демонстрируют, что метод способен значительно уменьшить динамический диапазон и сохранить детали, отсутствуют такие дефекты как гало, инверсия градиента, потеря локального контраста. Также метод значительно улучшает обычные изображения, привнося детали в темные регионы. Получаются хорошие результаты для панорамных видео-мозаик, обычных высококонтрастных фотографий и медицинских изображений.

Идея метода похожа на идею частотных методов. Зрение чувствительно не столько к абсолютной яркости, сколько к отношению локальных интенсивностей, что уменьшает эффект больших глобальных изменений, ассоциируемых с разницей в освещении. Изменение яркости на HDRI увеличивает магнитуду градиента яркости для некоторого масштаба. Четкие детали, такие как текстура, соответствуют градиентам меньшей магнитуды. Идея в том, чтобы идентифицировать большие изменения градиента больших масштабов и увеличить их магнитуду, сохранив их направление. Уменьшенное HDRI реконструируется из измененного поля градиентов. Вычисления производятся с логарифмом освещенности.



Рис. 5.20. Примеры работы градиентного тонального оператора

Другие пространственно-зависимые операторы

Мы рассмотрели всего лишь несколько методов. Здесь будут упомянуты некоторые другие значительные идеи и статьи. Schlick [45] пошел путем увеличения эффективности вычислений и упрощения параметров для настройки. Он использовал полином первой степени для тональной компрессии и предложил 3 метода для моделирования локальной адаптации.

Jobson et al. [46] презентовали метод сжатия динамического

диапазона на основе многокомпонентной версии теории цветного видения “retinex”. Ретинекс рассчитывает отражательную компоненту как отношение изображения к его профильтрованной низкочастотным фильтром версии. Таким образом в статье была представлена многомасштабная версия алгоритма для одновременного сжатия динамического диапазона и сохранения цвета. Но для проверки они использовали обычные изображения узкого динамического диапазона. Также были проблемы для сцен с доминантным цветом, так как ретинекс использует предположение о «сером мире».

Pattanaik, Ferwerda, Fairchild and Greenberg [47] изобрели технику многомасштабного представления паттерна, яркости и цвета в зрительной системе человека и адресовали проблему сжатия и восприятия сцен на пороговом и надпороговом уровне. Они обеспечили вычислительную модель адаптации и пространственного зрения для реалистичного отображения тона. В этой модели есть 2 основные части: модель зрения, обрабатывающая входное изображение для кодирования воспринимаемого контраста для хроматических и ахроматического каналов и их частотного механизма; и модель дисплея, которая принимает закодированную входную информацию и реконструирует изображение. Модель зрительной системы из этой статьи может быть использована в других областях, таких как метрики качества изображений, методы сжатия и основанные на восприятии алгоритмы синтеза.

В 1999 Tumblin и Turk [49] предложили метод LCIS (Low Curvature Image Simplifier). Метод разделяет изображение на крупные черты и мелкие детали. Идея проистекает из искусства, где начальный набросок описывает общую структуру картины, а детали и освещение заполняются позднее. The LCIS использует вариант анизотропной диффузии для определения четких деталей (границ) и плавного затенения. Эта техника позволяет значительно сжать динамический диапазон, сохраняя четкие детали. При этом недостаток в том, что детали иногда слишком сильно выражены, а также в методе более 8 параметров, поэтому сложно их подобрать правильно.

Смешивание экспозиций (Exposure Fusion)

Мы рассмотрели алгоритмы синтеза и визуализации HDR-изображений. При последовательном применении алгоритмов синтеза HDR-изображения и алгоритмов тональной компрессии из набора LDR-изображений с разной выдержкой можно получить другое LDR-изображение, максимально приближенное к тому, что видит человек.

Существует также техника объединения изображений с разной выдержкой минуя непосредственно построение HDR-изображения. Она носит название смешивания экспозиций (Exposure Fusion) [49].

При этом не делается никаких предположений о времени выдержки каждого кадра, не требуется калибровка кривой отклика камеры. Недостатком алгоритма является узкая область его применимости по сравнению с техниками тональной-компрессии. Его можно использовать для визуализации фотографий, но нельзя использовать при расчетах или при синтезе виртуальной сцены.

В основе техники смешивания экспозиций лежит мера насыщенности или контраста, в соответствии с которой взвешиваются значения яркости в изображениях с разной выдержкой. Каждому пикселю p каждого элемента i в наборе N изображений сопоставляется весовое значение W_j . Результат получается согласно следующей формуле:

$$R^p = \frac{\sum_{i=1}^N W_i^p * I_i^p}{\sum_{i=1}^N W_i^p}$$

Однако попиксельное смешивание может привести к артефактам на финальном изображении, поэтому обычно используются некоторые модификации, например, весовые функции слегка размываются. Однако это приводит к ореолам. Более хороший подход - смешивание коэффициентов изображения в пирамиде Лапласа.

Пирамида Гаусса - набор уменьшенных копий одного и того же изображения, каждое последующее в 2 раза меньше предыдущего по ширине и высоте. Пирамида Лапласа - набор

разностей исходного изображения и его уменьшенной, а затем вновь увеличенной копии (см. рисунок 5.21). Каждый новый уровень пирамиды содержит более низкие частоты, чем предыдущий. Для весовых функций строится пирамида Гаусса, для исходных изображений - пирамида Лапласа. Затем на каждом уровне элементы пирамиды Лапласа изображений смешиваются при помощи элементов пирамид Гаусса весовых функций. Таким образом, получается избежать как неравномерности итогового результата, так и артефактов размытия и ореолов, которые получаются в результате размытия весовых функций.

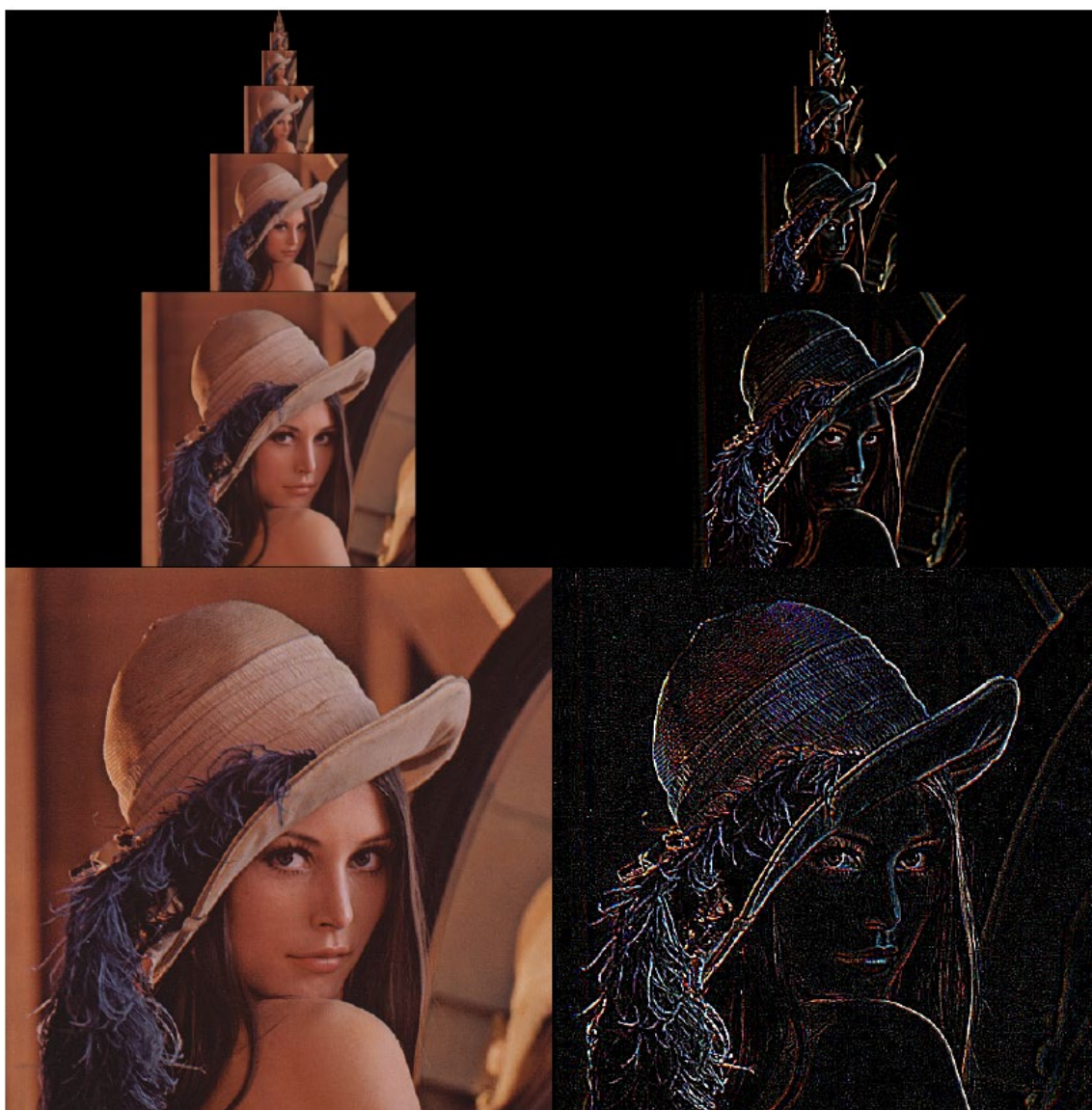


Рис. 5.21. Иллюстрация пирамиды Гаусса (слева) и пирамиды Лапласа (справа). Яркости элементов пирамиды Гаусса усилена в 10 раз.

Пример работы алгоритма смешения экспозиций представлен на рисунке 5.22.

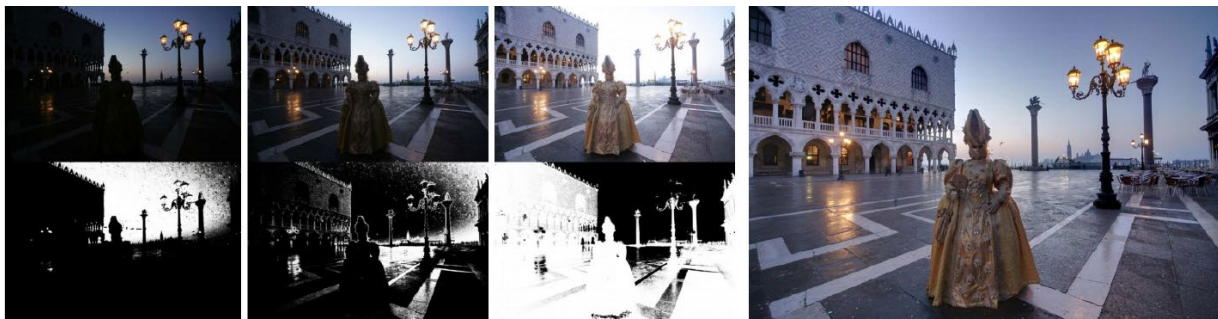


Рис. 5.22. Слева - набор изображений с разной выдержкой, справа - результат алгоритма смешения экспозиций.

5.4.4. Отображение на дисплеях с широким динамическим диапазоном

Идея дисплея с широким динамическим диапазоном в том, чтобы осветить каждый маленький участок изображения, отображаемый на LCD источником LED со специальной излучательностью для этого участка. Это значит, что, если сцена содержит черные детали, нужно выключить LED для получения истинно черного цвета. Если же яркость области высока, то нужно включить подсветку на максимальную мощность. Серые оттенки получается с промежуточными интенсивностями LED.

Теоретический базис для работы с таким дисплеем дается в работе [50]. Авторы решают проблему отображения хранением и визуализацией текстурных карт в реальном времени с использованием аппаратных возможностей. В их методе текстурные карты хранятся в форме двух различных восьмибитных текстурных карт, одна представляет высокие интенсивности, а другая - низкие. В процессе отображения они рекомбинируются для динамической настройки экспозиции.

Таким образом текстурная карта состоит из:

- изображения для передачи LCD
- изображения для передачи LED

Производители мониторов уверяют, что результат чрезвычайно высоко контрастен для наблюдателя, с высоко интенсивным белым и полностью темным черным. Однако пока такие дисплеи не дошли до массового потребителя. Методы тональной компрессии, напротив, сильно развились. Существует множество программ, позволяющих конвертировать изображения с широким динамическим диапазоном в изображения с узким динамическим диапазоном. Кроме того, печатный диапазон по-прежнему ограничен, поэтому полезно иметь представление об описанных выше алгоритмах.

На изображениях широкого динамического диапазона заканчивается первая часть курса лекций. Вторая часть (синтез изображений) начнется с рассказа о двулучевой функции отражения.

5.5. Вопросы для самоконтроля усвоенных знаний

Следующие вопросы позволят оценить степень усвоения знаний по разделу 5.

1. Поясните, какие именно факторы ограничивают динамический диапазон итогового изображения на мониторе?
2. Рассчитайте разрешение, которое должен иметь монитор с диагональю 22 дюйма и отношением сторон 16:9, чтобы глаз не различал отдельные пиксели.
3. Какими параметрами определяется цветовое разрешение дисплея?
4. Каков порядок величин динамических диапазонов глаза человека и монитора?
5. Можно ли увеличить динамический диапазон монитора, увеличивая мощность подсветки?
6. Перечислите методы получения изображений широкого динамического диапазона?
7. Каким образом можно получить HDR изображение из набора LDR изображений?
8. Почему при получении HDR из набора изображений с разной экспозицией необходимо учитывать информацию из этих изображений с разными весами?

9. Перечислите способы кодирования яркости, используемые для хранения HDR изображений.

10. Какие форматы хранения HDR изображений обеспечивают максимальный динамический диапазон?

6. Расчёт цвета пиксела. Основы фотографической оптики.

6.1. Введение

Для создания реалистичных изображений нужно не только уметь рассчитывать яркость точек трёхмерной сцены, но и понимать, как получается цвет пиксела из световой энергии. Что делать с энергией, которая попала в пиксел, как преобразовывать её в цвет, в разные цветовые пространства? Промежуточный этап между попаданием энергии в оптическую систему фотоаппарата и этапом формирования изображения следует рассмотреть более подробно.

6.2. Уравнение измерений и уравнение освещенности

Вспомним материал предыдущих глав, и заодно перейдем к решению общей задачи рендеринга. В одной из предыдущих глав была приведена формула, позволяющая рассчитать цвет конкретного пикселя для случая, когда мы игнорируем дефокусировку (т. е. в предположении, что глубина резкости бесконечна, рис. 6.1):

$$M_j = \int_{380}^{780} \int_I W_{i,\lambda}(x) L_i(x) \frac{\pi}{4} n^2 dA_x d\lambda$$

$$n = \frac{f}{D}$$

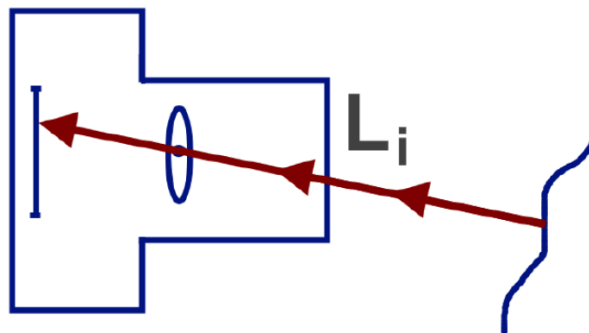


Рис. 6.1. Попадание изображения на диафрагму. Бесконечная глубина резкости.

Идея метода состоит в следующем. Пусть у нас есть некоторая матрица, есть некоторая аппаратная система и есть некоторая оптическая система, обладающая диафрагмой, т. е. геометрией. Нам известно фокусное расстояние данной системы, что позволяет нам узнать, каким образом данная система будет преобразовывать элементы видимой сцены, т. е. насколько сильно она будет масштабировать элемент виртуального пространства в проекцию на матрице.

Для определения данного преобразования рассматриваемой системы рассмотрим следующую ситуацию. Пусть p - некоторая точка в пространстве, обладающая некоторой яркостью, воспринимаемой наблюдателем, находящимся в центре проекции. Данную яркость обозначим через L_i . Также известны некоторые кривые устройства измерения, определяющие чувствительность данного устройства к разным длинам волн. Согласно уже упомянутому в предыдущей главе, при использовании виртуальной камеры данные кривые можно взять равными кривым для цветового пространства XYZ или для пространства RGB и с их помощью рассчитать M_j - вектор из трех цветовых компонент. Множитель n^2 под знаком интеграла нужен для коррекции изменений яркости, возникающих из-за размера оптической системы. Чем меньше n , тем темнее будет результат (итоговое изображение). Интегрирование происходит по площади нашего пикселя и по длинам волн воспринимаемого глазом излучения.

Проблема подобного расчета состоит в следующем: не принимается во внимание тот факт, что на освещенность некоторого пикселя светочувствительной матрицы может влиять не только точка 3D сцены, идеально сфокусированная на данном пикселе, но и соседние, не сфокусированные точки трехмерной сцены. В частности, если рассматривать некоторую часть лучей, которая фокусируется не в той точке, которую мы хотим увидеть, подобная система создаст несфокусированное пятно на матрице, т. е. освещенность каждого пикселя будет задаваться не только теми точками, которые на них) сфокусировались (рис. 6.2).

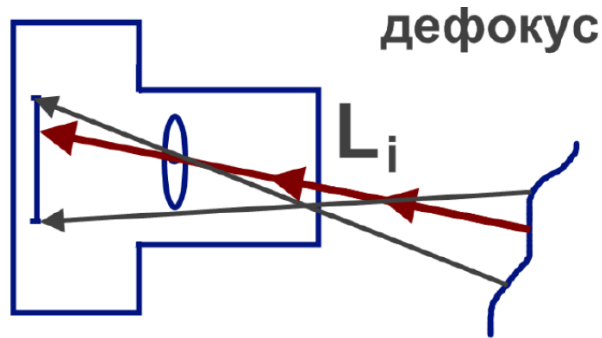


Рис. 6.2. Попадание изображения на диафрагму. Случай дефокусировки.

6.3. Модель матрицы камеры

Рассмотрим следующую модель. Каждый пиксел — это некоторый датчик, который чувствителен ко всем длинам волн λ (колбочки-палочки в человеческом глазу - пример такого датчика). Датчик обладает некоторой площадью I . Мы имеем некоторое изображение конечного размера и можем считать, что оно представляет собой находящуюся где-то в пространстве чувствительную площадку, которая разбита на сектора-датчики с некоторой площадью. Датчик таков, что при облучении его всем спектром на выходе получится только одно скалярное значение. Он по-разному чувствителен в разных частях спектра, и это задается функцией спектральной чувствительности.

Для каждой камеры на рисунке 6.3 показаны 3 кривые. Дело в том, что в фотокамерах установлен набор датчиков, которые по-разному реагируют на разные части спектра (по аналогии с человеческим зрением). Из графиков видно, что в разных камерах используются разные матрицы, которые обладают разной чувствительностью. Например, Nikon D200 и Nikon D700: видно, что они обладают похожей формой, но у одного из датчиков явно другая спектральная чувствительность. Каждый датчик по сути интегрирует произведение спектра всего попавшего на него излучения на свою кривую чувствительности и выдаст получившееся скалярное значение в качестве результата. Излучение, попавшее на датчик, интегрируется по площади этого датчика.

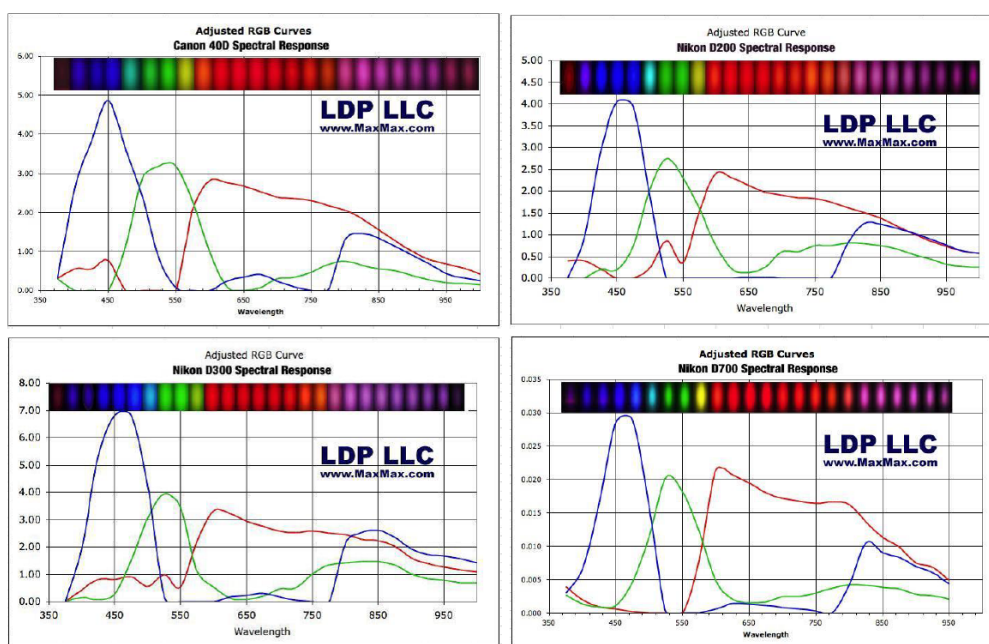


Рис. 6.3. Примеры кривых спектральной чувствительности для равных фотокамер.

В нашей модели отклик сенсора пропорционален степени его освещённости. На практике это действительно так. Кроме того, отклик зависит от времени облучения, но пока это не будет рассматриваться.

При условии линейной зависимости отклика датчиков от яркости формируется некоторое линейное видимое цветовое пространство. Для каждого спектра мы получаем 3 числа, причем из свойства линейности следует, что для двух разных источника света, освещающих набор датчиков, можно сложить отклики соответствующих датчиков на каждый источник света в отдельности, и получить отклик на комбинацию этих источников света. Если мы увеличим в N раз мощность излучения источника света (пропорционально на всех длинах волн), то в N раз увеличится полученный вектор откликов. Вектор откликов задаст некоторый цвет (для камеры). Этот цвет может не иметь никакого отношения к тому, что видит наш глаз. Например, камера может видеть инфракрасный цвет, или какой-нибудь другой, это «псевдоцвета». Наша задача сделать эти цвета такими, какими их видит человек. Поэтому в некотором смысле все эти датчики (см графики) должны быть максимально скоррелированы с учетом

особенностей человеческого глаза. Они должны получать приблизительно ту же смесь цветов, которую видит человек.

В реальном фотоаппарате находится массив датчиков (рисунок 6.4). Разными цветами на рисунке ниже обозначены датчики, обладающие разной чувствительностью к разным частям спектра (так называемая *Байесовская мозаика*).

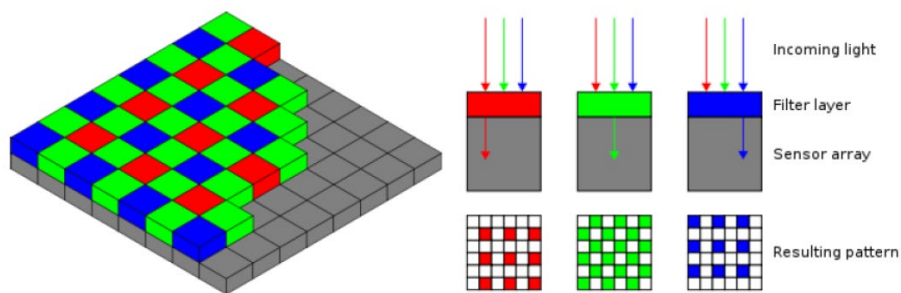


Рис. 6.4. Байесовская мозаика на массиве датчиков фотоаппарата

Они реагируют на свет по-разному, создавая картинку на рисунке 6.5 слева. Это то изображение, которое даст на выходе матрица камеры.

Затем это изображение необходимо преобразовать в обычное изображение (рис. 6.5 справа) путем соответствующих фильтраций с помощью так называемого Байесовского фильтра. Есть разные алгоритмы того, как это сделать, например, с помощью интерполяции между соседними элементами, или так, чтобы несколько соседних пикселей образовали в итоге один результирующий пиксел изображения.



Рис. 6.5. Изображение на матрице и преобразованное при помощи Байесовского фильтра

Таким образом, три датчика дали нам картинку, где каждый канал — это один канал цветового пространства камеры. Затем этот вид преобразуется в пространство XYZ, его уже можно преобразовать к любому RGB-подобному пространству с помощью линейного преобразования. А это все, что необходимо, чтобы сохранить данное изображение.

Если перед нами стоит задача рендеринга, т. е. никакой реальной сцены и исходного изображения с камеры нет, то мы моделируем каким-то образом процесс распределения света. При этом нам не нужно думать о каких-то физических кривых: эти кривые обусловлены возможностью физически сделать тот или иной сенсор. Математически мы можем задать любые кривые. Также не нужно моделировать с байесовскую мозаику. В реальных сенсорах она обусловлена тем, что мы физически не можем для одного датчика получить три числа, не скалярный, а векторный выход. Поэтому мы можем считать, что один пиксел на выходе может сразу давать три значения, т. е. по сути сразу давать цвет. Таким образом, пиксел имеет сразу три кривые чувствительности, которые можно применять к одному и тому же спектру освещения данного пиксела. Например, в качестве этих кривых мы можем сразу взять кривые сложения стандартного наблюдателя \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} (рисунок 6.6).

$$X = \int_{380}^{780} \bar{x}(\lambda) E_j(\lambda) d\lambda \quad (6.1)$$

$$Y = \int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda) E_j(\lambda) d\lambda \quad (6.2)$$

$$Z = \int_{380}^{780} \bar{z}(\lambda) E_j(\lambda) d\lambda \quad (6.3)$$

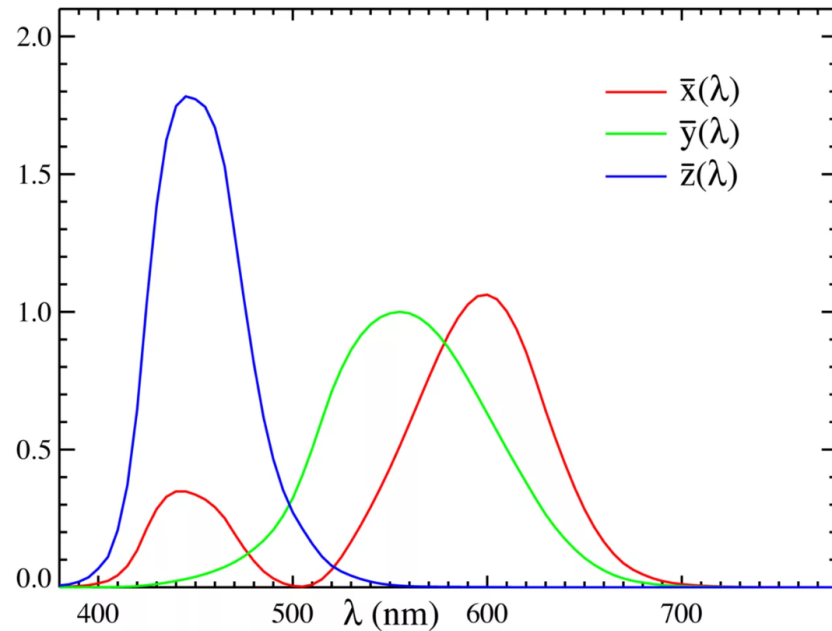


Рис. 6.6. Кривые сложения в системе XYZ

После применения формулы (с двойным интегралом), которую мы несколько упростили, подставив сразу интегральную освещенность по всему пикселу и используя сразу подставленные кривые сложения стандартного наблюдателя, мы можем сразу получить итоговый цвет пиксела в пространстве XYZ. Если использовать в качестве кривых в интегральной формуле кривые sRGB, например, то напрямую получится цвет. Стоит заметить, что здесь значение цвета не относительное, а абсолютное, и возможны значения цвета, большие единицы.

Зная освещенность, мы можем получить по этим формулам цвет. Поэтому главная задача узнать освещенность пиксела. Если у нас есть реальный фотоаппарат, то он сделает всю работу за нас. Если мы строим систему рендеринга, то все величины нужно рассчитывать.

Нужно решить, как вычислить освещенность пиксела исходя из физических величин. Для этого нужно выяснить, как происходит формирование изображения. Важно понимать, какую освещенность создает в конкретном пикселе некоторая точка пространства, которая имеет яркость L . Начнем с вывода закономерностей, а затем получим все необходимые формулы для того, чтобы, зная яркость точки в пространстве, посчитать, какую освещенность в пикселе она создает.

6.4. Формирование изображения

Необходимо сделать несколько замечаний о том, как строятся изображения. Возьмем две светящихся точки, красную и зеленую (рисунок 6.7).

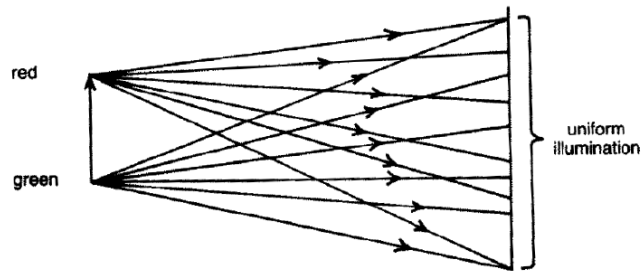


Рис. 6.7. распространение освещения от двух светящихся точек

Допустим, плоскость справа это матрица фотоаппарата. Фотоаппарат будет освещен некоторой смесью красного и зеленого источников. Из схемы видно, что никакого изображения этих источников так, как мы хотели бы их получить, не выйдет. Источники светят в разные стороны, затем свет смешивается и равномерно освещает матрицу. В идеале нужно пустить из источника один луч, и если мы этот луч отрежем, он сформирует четкое изображение на картинной плоскости (на приемнике), рисунок 6.8.

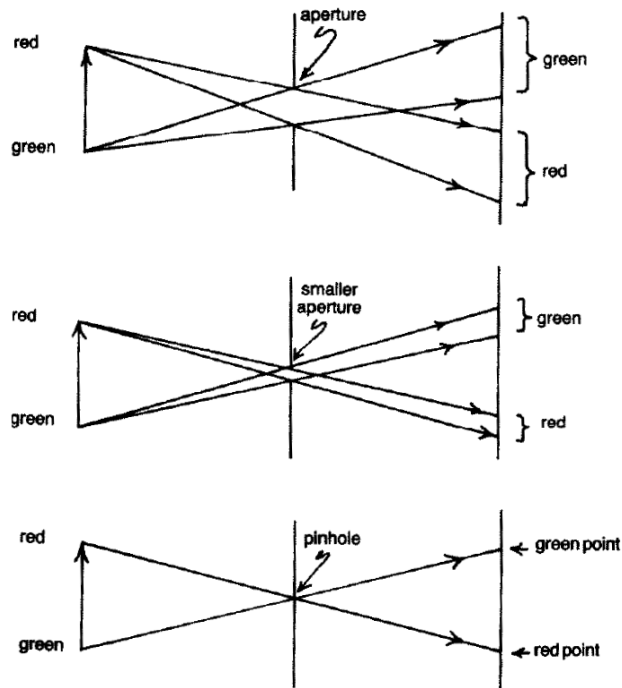


Рис. 6.8. В зависимости от размера диафрагмы точки на экране превращаются в протяженные элементы различного размера

Существует два способа решения данной проблемы. Первый способ — отсекается часть лучей, оставляется один луч, и так формируется изображение. Второй способ — это собирать или фокусировать лучи в одной точке. Нужно сделать так, чтобы одна точка в пространстве соответствовала одной точке на картинной плоскости.

6.5. Камера обскура

Если мы хотим ограничить лучи и за счет этого получить освещение, то переходим к идее камеры-обскуры (pinhole-camera). Пространство закрывается от картинной плоскости заслонкой с маленьким отверстием (рис. 6.9 слева). Получается так называемая апертура, которая ограничивает пучок света, идущий от красного и зеленого. Этот пучок света создает уже более сформированное изображение, соответствующее данному источнику света, которое по-прежнему, однако, остается пятном. Чем меньше размер апертуры, тем более сформированное, четкое изображение мы получаем. Таким образом, мы получили некую

систему, которая формирует изображение. Заметим, что изображение получается перевернутым. Каждой точке в пространстве, ставится в соответствие точка на матрице. Далее в работу вступают сенсоры, чувствительные к свету.

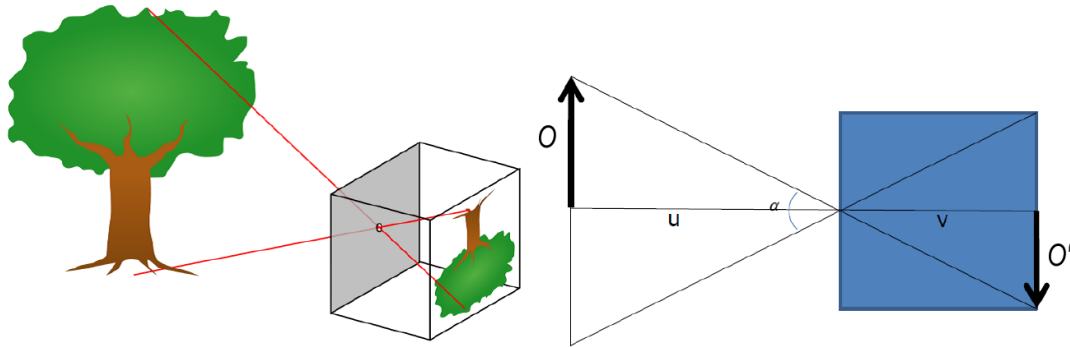


Рис. 6.9. Принцип работы камеры-обскуры

На рисунке 6.9 приведена камера-обскура (pinhole-camera). Она представляет собой ящик с отверстием. На задней стенке камеры мы получаем изображение. На ней может быть пленка, или электронный датчик на основе фотоэлектрического эффекта, который позволяет регистрировать результирующее изображение.

С точки зрения геометрии, камера-обскура очень простая (рисунок 6.9, справа). Если мы в своей системе визуализации поддерживаем камеру-обскуру, то, зная положение исходной точки в пространстве (условно на рисунке эта точка показана), легко из чисто геометрических соображений получить ее координаты на картинной плоскости. Из трехмерных координат с помощью преобразования проекции получаем двумерные координаты. Камера-обскура определяется двумя параметрами: углом и расстоянием от центра проекции до задней стенки. Если мы знаем эти параметры, то можем задать такую камеру и строить проекции. Дополнительно нужно знать так называемые внешние параметры, т. е. положение и ориентацию камеры в пространстве.

Камера-обскура имеет некоторые проблемы. Они связаны с тем, что для повышения резкости нужно уменьшить отверстие. Однако, чем меньше отверстие становится, тем больше проявляется влияние дифракции (рисунок 6.10).

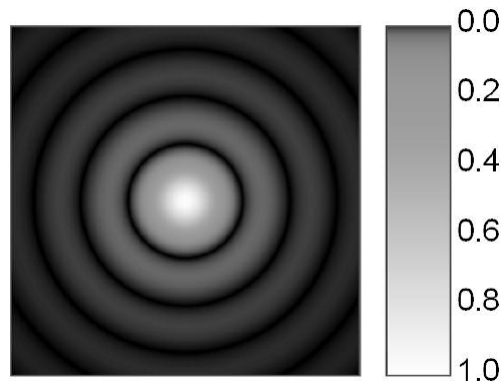


Рис. 6.10. Дифракция света на круглом отверстии

Дифракция — волновой эффект, который проявляется, когда геометрические особенности среды имеют размер порядка длины световой волны. В результате, в определённый момент вместо ожидаемого повышения резкости картинку мы увидим соответствующий волновой эффект, и не получим еще более резкую картинку.

6.6. Камера с линзой

Общепринятым подходом к избежанию этой проблемы является использование линз. Т. е. переход от идеи ограничения потока света к идее его фокусировки. Вместо отверстия в заслонке ставится фокусирующая линза, которая проецирует весь свет из некоторой точки пространства в соответствующую точку на картинной плоскости (рисунок 6.11).

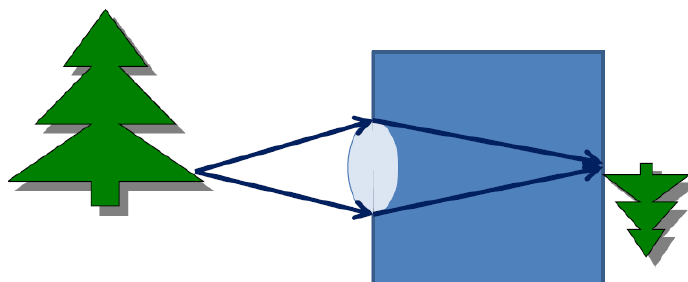


Рис. 6.11. Камера с линзой

Таким образом, хотя и сейчас мы проецируем точку в точку, но света стало много, и теперь нет проблем с яркостью. Зато есть

новая проблема: как сделать такую линзу, которая не вносила бы дополнительных искажений? Линзы применяются сейчас везде, в любой оптике, и когда мы будем писать систему рендеринга, мы должны будем уметь эти линзы использовать, и реализовывать систему не как ящик в камере-обскуре, а как фотоаппарат с некоторой оптикой.

6.7. Преломление света на сферической поверхности

Рассмотрим некоторые аспекты геометрии и оптики на линзах. Рассмотрим вначале одну сферическую поверхность, границу воздуха с преломляющим материалом (рисунок 6.12).

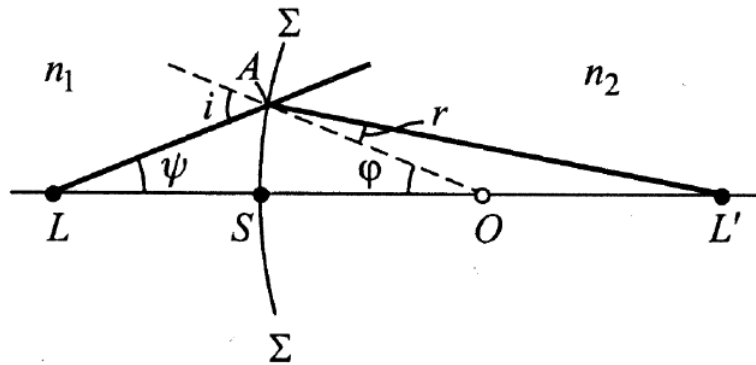


Рис. 6.12. Преломление луча на сферической поверхности

Пусть есть точка L — источник света в пространстве. Есть некоторая сферическая поверхность Σ , будем считать, что это одна поверхность линзы. Центр кривизны сферической поверхности находится в точке O . Проведем через центр кривизны этой сферической поверхности и точку L прямую, так называемую оптическую ось. Имеем некоторый пучок света конической формы с осью OL и углом φ . Когда он попадает на поверхность линзы, то происходит преломление, луч LA преломляется и попадает в точку L' . Здесь происходит фокусировка лучей, пришедших из точки L .

Для упрощения мы будем рассматривать так называемые *параксиальные* или *приосевые* пучки. Мы предполагаем, что это LS и LA имеют приблизительно одинаковую длину. Это довольно сильное предположение, т. к. если бы они действительно имели одинаковую длину, угол между ними был бы равен нулю, и они

бы совпали. Но, на самом деле, если считать, что расстояние до объекта много больше, чем отклонение луча от оси, то угол будет очень маленьким, и наши рассуждения будут достаточно верны до тех пор, пока пучок идет ровно через центр перпендикулярно касательной в точке пересечения с поверхностью. Основная задача - узнать, где этот пучок будет фокусироваться. Для этого нам нужно, зная расстояние LS , подсчитать расстояние SL' . Это делается достаточно просто, исходя из следующих соображений:

Рассмотрим LO и LA . Введем углы i и ϕ . Согласно теореме синусов, верно соотношение:

$$\frac{LO}{LA} = \frac{\sin i}{\sin \phi} \quad (6.4)$$

То же самое - с другой стороны сферической поверхности: рассматриваем AL' и OL' и их соотношение тоже записываем по теореме синусов:

$$\frac{AL'}{OL'} = \frac{\sin \phi}{\sin r} \quad (6.5)$$

Перемножив эти равенства, получим, что произведение отношений длин равно, по закону Снелла, отношению показателей преломления соответствующих сред:

$$\frac{LO}{LA} \frac{AL'}{OL'} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_1}{n_2} \quad (6.6)$$

Изначально мы знаем коэффициент преломления снаружи и коэффициент преломления внутри, а также OC - радиус сферической поверхности. Наши выкладки в итоге должны свестись к этим параметрам, что в итоге и получилось. Далее введем некоторые переопределения, необходимые для того, чтобы найти искомое SL' . Во-первых, введем знаковые величины $a_1 = LS$, $a_2 = SL'$. Обозначим радиус сферы $R = OS$. По логике прохода в одном направлении, когда мы идем слева направо, расстояние считается положительным, справа налево отрицательным. Поэтому $SL = -a_1$. Подставляем эти обозначения, получаем:

$$\frac{-a_1 + R}{-a_1} \times \frac{a_2}{a_2 - R} = \frac{n_1}{n_2} \quad (6.7)$$

Перепишем это соотношение в классической форме:

$$\frac{n_1}{a_1} - \frac{n_2}{a_2} = \frac{n_1 - n_2}{R} \quad (6.8)$$

Надо иметь в виду, что если речь идёт об абсолютном расстоянии, то a_1 надо брать с минусом. Таким образом, зная показатели преломления и радиус кривизны, мы можем связать между собой a_1 и a_2 . Обратим внимание на две вещи. Во-первых, это справедливо только для параксиальных пучков, в силу нашего первоначального предположения о равенстве расстояний. Во-вторых, для параксиальных пучков у нас получилось, что a_2 зависит только от a_1 . Это значит, что весь параксиальный пучок сойдётся в одну точку. Это большой плюс для наших задач, т. к. это означает, что изображение точечного источника света сфокусируется сферической поверхностью в одну точку. К сожалению, в реальности это не совсем так. Пучки, как правило не параксиальные, и лучи в одну точку не фокусируются. Из-за этого в оптике возникает масса проблем с так называемыми аберрациями. Для идеальной оптической системы, в которой мы рассматриваем исключительно параксиальные пучки, лучи будут сходиться в одну точку (рисунок 6.13).

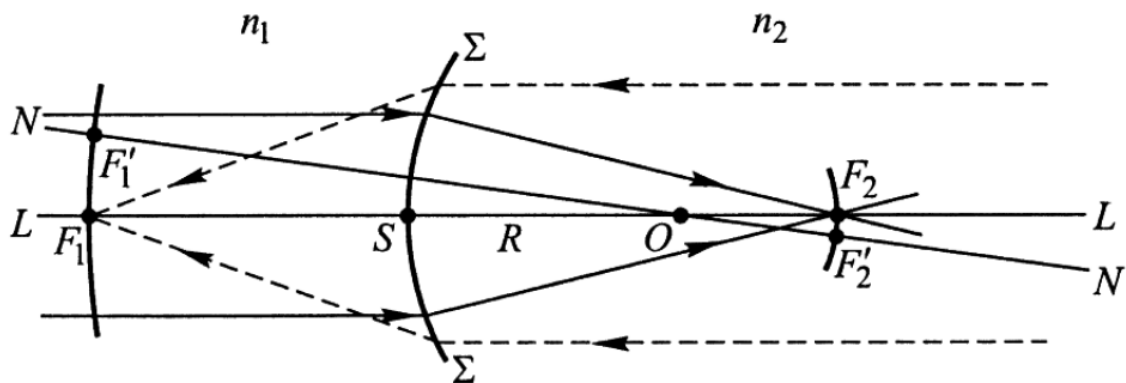


Рис. 6.13. Идеальная оптическая система

Если источник излучения находится на расстоянии $a_1 = -\infty$, то линза сфокусирует свет в некоторой точке. Расстояние a_2 от центра S до точки фокусировки называется передним фокусным расстоянием. В зависимости от того, с какой стороны поверхности приходят параллельные лучи, фокусируются они в одной из двух точек. Таким образом, мы имеем два фокусных расстояния.

6.8. Преломление света в линзе

Сейчас мы рассматривали одну поверхность, иначе говоря, мы предполагали (рисунок 6.12), что всё, что справа от поверхности, находится в стекле. Чтобы рассматривать настоящую линзу (рисунок 6.14), нам нужно от одной поверхности перейти к двум.



Рис. 6.14. Фотография настоящей линзы. Хорошо видно, что линза имеет 2 поверхности и ненулевую толщину.

Таким образом, настоящая линза представляет собой стекло, обработанное таким образом, что с обеих сторон линзы находятся две сферические поверхности, возможно, разной кривизны. Мы рассматриваем центрированную оптическую систему (это означает, что центры всех оптических поверхностей лежат на одной прямой). Линза — это такая центрированная оптическая система, которая состоит из двух сферических поверхностей, ограничивающих преломляющий материал.

Линзы бывают разной формы (рисунок 6.15).

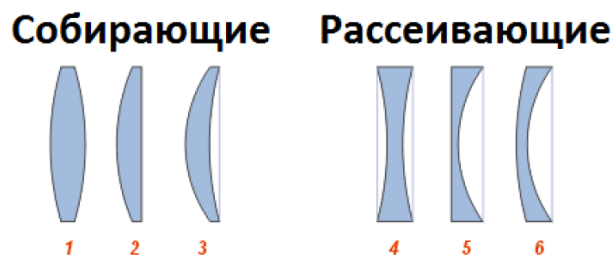


Рис. 6.15. Различные формы линз

- 1) Двояковыпуклая
- 2) Плоско-выпуклая
- 3) Выпукло-вогнутая (положительный мениск)
- 4) Двояковогнутая
- 5) Плоско-вогнутая
- 6) Выпукло-вогнутая (отрицательный мениск)

Нам, по сути, нужна некоторая абстрактная линза, которая будет характеризоваться своими радиусами кривизны.

6.9. Тонкие линзы

Рассмотрим так называемую тонкую линзу.

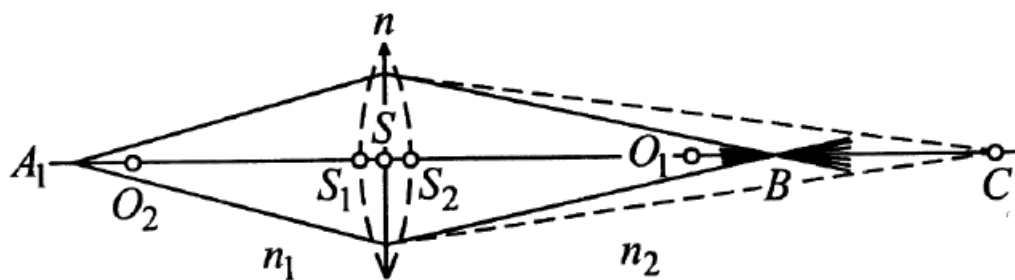


Рис. 6.16. Тонкая линза

Тонкая линза характерна тем, что толщина линзы очень мала по сравнению с радиусом кривизны. То есть d - толщина линзы, расстояние между вершинами сферических поверхностей - пренебрежимо мало по сравнению с радиусами кривизны сферических поверхностей (линза «плоская»). Это позволяет считать, что точки S_1 и S_2 сливаются. Мы можем считать, что у линзы есть некоторый средний радиус кривизны, который и будем

использовать. Здесь очень много предположений, но на практике, для маленькой линзы в фотоаппарате или, тем более, хрусталика в глазу, и объекта на расстоянии 10 или 100 метров эти предположения работают с хорошей точностью. Таким образом, будем использовать вместо точек S_1 и S_2 точку S .

Как формируется изображение в данном случае? Первая поверхность даст изображение на расстоянии a в точке C .

$$\frac{n_1}{a_1} - \frac{n}{a} = \frac{n-n_1}{R_1} \quad (6.9)$$

Теперь у нас есть противоположная поверхность, но точка C находится внутри среды с коэффициентом преломления n_2 . Получается, что это некоторый мнимый источник света, лучи от него преломляются через вторую сферическую поверхность. Она для этого источника света является фокусирующей и создает уже реальное изображение в точке B . (Получается, она вогнутая для мнимого источника, поэтому она является фокусирующей). Записываем такое же соотношение уже для второй поверхности и точки C .

$$\frac{n}{a} - \frac{n_1}{a_1} = \frac{n-n_1}{R_2} \quad (6.10)$$

Сложим эти две формулы.

$$n_1 \left(\frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1} \right) = (n - n_1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (6.11)$$

Введём относительный показатели преломления. Далее будем работать именно с относительным показателем преломления $N = \frac{n}{n_1}$. Запишем окончательное соотношение:

$$\frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1} = (N - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (6.12)$$

6.10. Фокусное расстояние

Для данной линзы тоже можно найти фокус, как и для одной

сферической поверхности. Фокусное расстояние - удобная характеристика. Посчитав это значение для данной линзы, можно не использовать радиусы и относительный показатель преломления. Фокусное расстояние можно, грубо говоря, назвать фокусирующей силой линзы. Для параксиальной оптики параллельные пучки, которые не параллельны главной оси, фокусируются на так называемых фокальных плоскостях. Для непараксиальной оптики это не плоскости, а сферические поверхности, но нам это сейчас не важно.

Чему равно фокусное расстояние? Подставим бесконечность в качестве одного из расстояний до источника света a_1 или a_2 и получим соответствующее переднее и заднее фокусное расстояние. Как будто мы взяли готовую линзу, поставили где-то далеко от неё источник света и посмотрели, на каком расстоянии от центра линзы лучи сфокусировались. Это расстояние и будет равно фокусному расстоянию.

$$\text{При } a_1 = \infty \text{ получаем } a_2 = f_2 = \frac{1}{(N-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)}$$

$$\text{При } a_2 = \infty \text{ получаем } a_1 = f_1 = \frac{1}{(N-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)}$$

Для приближения тонкой линзы оказывается, что эти фокусные расстояния равны по модулю, но отличаются по знаку. Фокусное расстояние становится характеристикой линзы, в которую входят радиусы кривизны и относительный показатель преломления.

6.11. Формула тонкой линзы

Для того, чтобы посчитать для любой точки пространства, где эта точка будет сфокусирована, достаточно знать только фокусное расстояние линзы. Мы приходим к известной всем формуле тонкой линзы:

$$\frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1} = \frac{1}{f} \quad (6.13)$$

Эта формула позволяет, зная фокусное расстояние линзы, связать между собой две точки: источник света и точку фокусировки света от него. Для реальных линз параметр f предоставляется производителем. Таким образом, для расчетов не нужны радиусы кривизны и материал линзы. Более того, если сложная оптическая система приближается такой тонкой линзой, то для расчета геометрии, опять же, требуется только фокусное расстояние.

6.12. Формирование изображения линзой



Рис. 6.17. Изображение, формируемое линзой

На рисунке 6.17 показана одна линза, дающая перевернутое изображение. Зная фокусное расстояние линзы и расстояние от свечи до линзы, в соответствии с формулой тонкой линзы можно поставить плоскость, где формируется изображение, на правильном расстоянии от линзы (рисунок 6.18). Это знание понадобится нам при разработке алгоритмов глобального освещения.

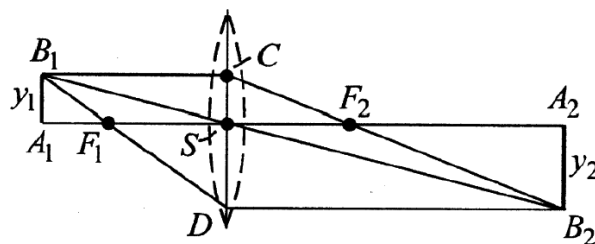


Рис. 6.18. Схема формирования изображения линзой

Полезным параметром линзы является увеличение. Это соотношение размеров изображения и объекта.

$$V = \frac{a_2}{a_1} - \frac{f}{a_1 + f} = \frac{1}{\frac{a_1}{f} + 1} \quad (6.14)$$

Видно, что увеличение может быть разное в зависимости от того, где находится данный объект. Также увеличение зависит от фокусного расстояния. Чем больше фокусное расстояние, тем больше результирующее увеличение.

6.13. Диафрагмирование

Нужно разобраться, что происходит с теми лучами, которые попали в оптическую систему, но при этом не находятся на расстоянии от главной оси, идеальном для того, чтобы сфокусироваться в точку. Они будут портить нам картинку. Чтобы бороться с этим, используется диафрагмирование. В чём-то его смысл аналогичен отсечению пучков для камеры-обскуры. Диафрагма — это некоторый экран с отверстием. Функцию этого экрана выполняет оправа линзы, чаще специальные отдельно стоящие элементы внутри оптической системы (рисунок 6.19).

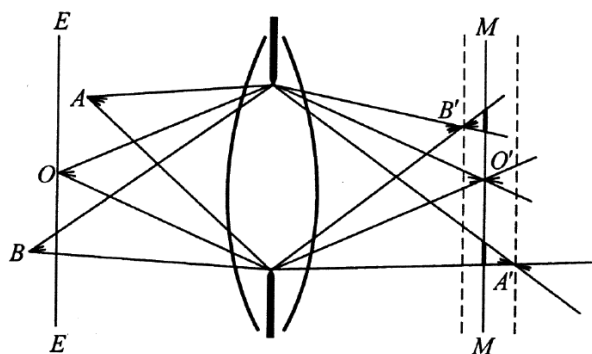


Рис. 6.19. Диафрагмирование.

К чему это приводит закрытие части линзы? Точка O перешла в точку O' , идеально сфокусировавшись. Точка A находится ближе, чем та плоскость, для которой в данной линзе происходит фокусировка. Расчёт показывает, что она сфокусировалась позади приемника. Это значит, что на приемнике в соответствующем месте мы увидим размытое изображение точки A . То же самое с точкой B , которая стояла за точкой O , она сфокусировалась перед приёмником. Наблюдаем тот же эффект,

который возникает в связи со слабым зрением в результате вытянутого глазного яблока, или не совсем правильной работы хрусталика. На сетчатке формируется местами размытое изображение. Чем сильнее мы закрываем диафрагму, тем уже становится этот пучок и уже становится пятно на приёмнике, чётче изображение. В случае, когда размер изображения одной точки пространства на матрице меньше или сравним с размером пиксела, будем считать, что эта точка изображается резко. Это значит, что появляется некоторая интересная зависимость: если сделать отверстие диафрагмы достаточно маленьким, то получится, что резко изображается не одна плоскость, а большой диапазон. На практике это может зависеть от расстояния, на которое мы сфокусировались. Этот диапазон может иметь разный размер: несколько метров, или несколько сантиметров, в зависимости от оптической силы линзы и от расстояния до объекта. Важно то, что он есть, и мы можем получить резкое изображение достаточно большой глубины пространства.

Ограничение размера пучков — это результат совместной работы различных элементов внутри оптической системы. Как правило, она сложнее, чем одна линза. Можно не учитывать все ограничители, а выделить одну наименьшую диафрагму, поскольку именно она будет максимально блокировать распространение света, и считать, что остальные вообще не ограничивают ход лучей. Такая диафрагма называется апертурной или просто апертурой. Иногда, если мы говорим про однолинзовую оптическую систему, здесь же сама линза является апертурой, потому что она единственная.

6.14. Виртуальный фотоаппарат

С точки зрения теории вышесказанного достаточно, чтобы нарисовать виртуальный фотоаппарат (рисунок 6.20).

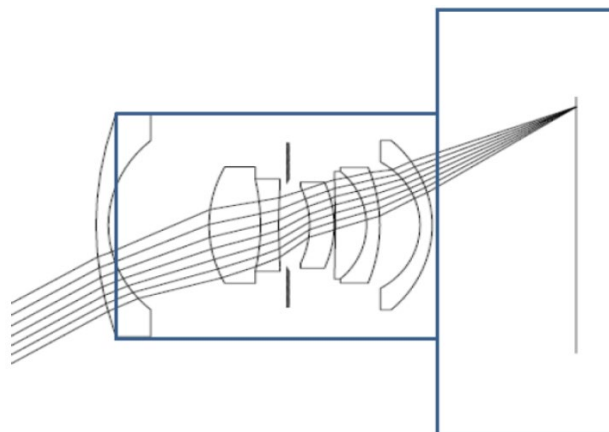


Рис. 6.20. Виртуальный фотоаппарат

У нас сеть объектив — это система, включающая в себя набор линз и апертурную диафрагму, которая позволяет определенным образом фокусировать поток излучения. Все точки фокусировки расположены в плоскости изображения. Она находится внутри фотоаппарата, на ней может быть расположена пленка, или матрица, как и в камере-обскуре. Наш виртуальный фотоаппарат будет иметь точно такую же структуру: оптическая система и плоскость изображения. Чтобы правильно с этим работать, нужно разобрать модель оптической системы. Она может быть как простой, так и сложной, вплоть до того, что можно промоделировать все линзы и получить идеально совпадающую с некоторым реальным фотоаппаратом картинку, или ограничиться достаточно простой схемой тонкой линзы, например.

Что мы знаем на практике про фотоаппарат? Для того или иного фотоаппарата всегда известно фокусное расстояние f т. к. именно оно влияет на то, какое изображение будет строиться. Обычно оно выражается в миллиметрах: 15, 20, 30 мм. В принципе, знания расстояния f должно быть достаточно для того, чтобы построить модель тонкой линзы. Модель тонкой линзы будет верна тогда, когда характерное расстояние, с которого мы снимаем объект, будет намного больше фокусного расстояния. К примеру, если фокусное расстояние оптической системы 50 мм, то нескольких десятков метров до объекта будет достаточно, чтобы использовать модель тонкой линзы. Если мы занимаемся макросъемкой, то нужны более сложные модели, иначе мы не учтем изменения в геометрии. Что мы еще не знаем? Расстояние до плоскости изображения. В реальности матрица находится в

фотоаппарате, ведь от этого зависит то, на каком расстоянии находящиеся объекты будут резко изображены, и мы не знаем размеров внутри фотоаппарата. Но их можно ввести, или найти. Обычно можно считать, что для линз, сфокусированных на бесконечности, расстояние до плоскости изображения будет равно фокусному расстоянию. Но здесь возникают дополнительные сложности. Например, путь луча нужно считать в зависимости от объектива, и центральная точка, которая нужна, чтобы моделировать сложную оптическую систему одной линзой, может двигаться в зависимости от точки фокусировки объектива и фокусного расстояния, но таким образом, чтобы фокусировка всегда осуществлялась по расстоянию до плоскости изображения.

6.15. Расчет освещенности матрицы

На практике все это важно, если мы делаем некоторый виртуальный фотоаппарат. Чтобы получить проекцию в виртуальном фотоаппарате, нужно знать фокусное расстояние, центр проекции и размер приемника.

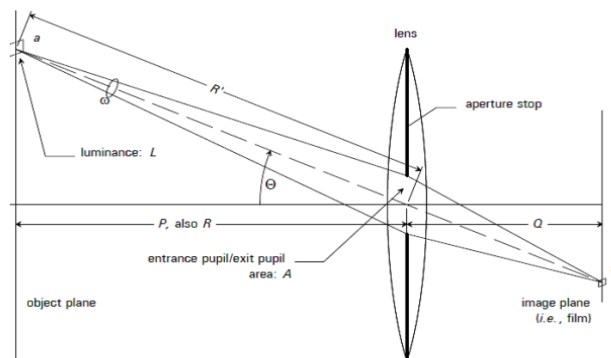


Рис. 6.21. Условный фотоаппарат

На рисунке 6.21 показан условный фотоаппарат и некоторая точка поверхности, площадка площади a . Допустим, мы все знаем про неё. При помощи алгоритмов глобального освещения мы посчитали то, как эта площадка излучает в том или ином направлении. Нас интересует, какая освещённость будет на соответствующей площадке в соответствующем пикселе

плоскости изображения. Это основная задача. Зная это, по формулам, которые были приведены в начале, можно вычислить цвет.

Рассмотрим тонкую линзу. Есть апертура определённой площади A , она будет определять, сколько света проходит на матрицу. Апертурой ограничен некоторый телесный угол ω . Площадка a фокусируется линзой в некоторой точке плоскости a' . Нужно посчитать освещённость, которая будет здесь возникать.

Обратим внимание на то, что энергия, входящая в телесный угол ω , исходит не с исходной площади a , а с проекции площадки, которая стоит перпендикулярно направлению излучения. Угол θ определяет наклон площадки. Если площадка стоит под большим углом к проекции, то через диафрагму будет проходить небольшое количество света. Поэтому нас интересует площадь проекции на P , она будет равна $A_p = A \cos \theta$.

Если мы для простоты предположим, что поверхность объекта ламбертова, то его яркость L будет постоянна для любых углов наблюдения. Таким образом, если взять силу света, излучаемую с этой площадки суммарно в направлении центра апертуры, то она будет равна $I = La_p$. Сила света — это, по сути, яркость точки, но с учетом площади, которой она излучается. Чтобы перейти к силе света, нужно яркость домножить на эту площадь.

Площадь A_p соответствует некоторой площадке, которая находится не на единичной сфере. Чтобы получить явно телесный угол, нам нужно произвести такое преобразование:

$$R' = \frac{R}{\cos \theta} \quad (6.15)$$

$$\omega = \frac{A_p}{R'^2} \quad (6.16)$$

Подставим выраженные величины, получим:

$$\omega = \frac{A \cos^3 \theta}{R^2} \quad (6.17)$$

Энергетический поток от площадки a в угол ω равен $\Phi = I\omega$ по определению. Подставляем сюда найденные значения I , ω и получаем:

$$\omega = \frac{L \cos^4 \theta}{R^2} \quad (6.18)$$

Заметим, что весь этот поток оказался сфокусирован на площадке a' . Вся яркости площадки a перешла в a' . Нужно применить соотношение для увеличения a' относительно a .

$$M = \frac{Q}{R} \quad (6.19)$$

Площади относятся как линейные размеры в квадрате.

$$a' = m^2 a \quad (6.20)$$

$$M = \frac{aQ^2}{R^2} \quad (6.21)$$

Чему равна освещённость? Освещённость — это плотность потока. Это отношение потока, который проходит через дифференциальную площадку, к её площади.

$$E = \frac{\Phi}{a'} = \frac{L \cos^4 \theta}{Q^2} \quad (6.22)$$

Чем дальше находится объект, тем меньше освещённость. Чем больше угол θ , тем меньше освещённость. Чем больше яркость L исходной точки в направлении линзы, тем больше освещённость. Чем больше апертура, тем больше освещённость.

Для линз, сфокусированных на бесконечность, $Q = F$ по определению. Поэтому можно сюда подставить R , помня, что это будет справедливо лишь в случае, когда объект находится достаточно далеко. Площадь A можно выразить через размер диафрагмы: $A = \frac{\pi}{4} D^2$.

Обозначим $n = \frac{f}{D}$. Эта величина называется *диафрагменным числом* (или *f-числом*) и является характеристикой оптической системы с точки зрения пропускания ей света. Это число также

называют относительным отверстием, или светосилой, или скоростью объектива. Зная это число, мы можем рассчитать освещённость. Чем меньше диафрагменное число, тем больше света будет попадать на матрицу. Если увеличивается фокусное расстояние, то уменьшается количество света, попадающего на матрицу. Подставляем диафрагменное число в уравнение для E , получаем:

$$E = L \frac{\pi \cos^4 \theta}{4n^2} \quad (6.23)$$

Если нужно увеличить общую чувствительность фотоаппарата, то надо увеличивать или диафрагму, или экспозицию, или чувствительность сенсора.

От $\cos^4 \theta$ можно избавиться. Если мы рассматриваем вариант параксиальной оптики, этот косинус стремится к единице (если угол между лучами и главной осью стремится к нулю). Таким образом, оставаясь в рамках параксиальной оптики, мы его можем убрать и считать, что он всегда равен единице. Однако косинус в четвертой степени довольно сильно убывает. Согласно расчётам, на реальных фотографиях мы должны наблюдать существенное падение освещённости к краям кадра. Но производители фотоаппаратов и оптических систем борются с этим, чтобы мы не видели этого падения освещённости. Для этого применяются так называемые микролинзовые системы, которые специальным образом фокусируют свет перед матрицей, чтобы избавиться от зависимости и создать более равномерное освещение по всему кадру. Таким образом, если мы делаем некоторую виртуальную систему, которая должна получить то же изображение, что и фотоаппарат, мы можем об этом не задумываться (конечно, если задачей не является очень точное моделирование конкретной оптической системы).

6.16. Заключение

Итак, чтобы рассчитать цвет пиксела, нужно знать 2 вещи: кривые отклика и освещённость сенсора. Если у нас нет задачи смоделировать конкретную оптическую систему, мы берем кривые стандартного наблюдателя CIE, которые нужны, чтобы преобразовать произвольный спектр в цвет. Применение этих

кривых позволит сразу получить цвет в нужном пространстве по спектру распределения освещённости данного сенсора.

Освещённость сенсора в точке мы можем рассчитать зная параметры оптической системы. Для этого, в свою очередь, нужно знать яркость всех точек, влияющих на яркость изображения, в направлении диафрагмы. Если мы отдельно хотим построить геометрическое расположение пикселя, нужно знать, какой луч в пространстве внёс в него свой вклад. Соответствующая точкам пространства проекция вычисляется по формуле тонкой линзы. Осталось посчитать яркость для любой точки сцены, вносящей вклад в формирование изображения.

6.17. Вопросы для самоконтроля усвоенных знаний

Следующие вопросы позволят оценить степень усвоения знаний по разделу 6.

1. Опишите модель матрицы камеры. От чего зависит отклик сенсора?
2. Каким образом матрица камеры формирует цветное изображение?
3. Каким образом формируется цветное изображение в задачах рендеринга?
4. Объясните принцип построения изображения в камере-обскуре.
5. Объясните принцип построения изображения в линзовой камере.
6. Как на изображение точки влияет размер диафрагмы?
7. Что такое глубина резкости и от чего она зависит?
8. Рассчитайте ход луча через сферическую поверхность радиуса $r=100\text{мм}$, разделяющую воздух и стекло с показателем преломления $n=1.5$, при условии, что луч падает на поверхность в направлении параллельном оптической оси на высоте 10мм .
9. Определите фокусное расстояние двояковыпуклой линзы с радиусами равными 100мм , толщиной 10мм , и показателем преломления $n=1,6$.
10. Что можно рассчитать с помощью формулы тонкой линзы?
11. В каком случае при моделировании изображения можно пренебречь толщиной линзы?
12. Почему и в какой мере освещенность на фотоприемнике падает от центра к краю?

Список использованной литературы

1. Глухоедов А.В. Компьютерная геометрия и графика: конспект лекций: учебное пособие / А.В. Глухоедов. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. – 117 с.
2. Никулин Е.А. Компьютерная графика. Оптическая визуализация : учебное пособие для вузов / Е. А. Никулин. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2023. — 200 с.
3. Гамбетта Гэбриел Компьютерная графика. Рейтрейсинг и растеризация. — СПб.: Питер, 2022. — 224 с.: ил. — (Серия «Библиотека программиста»).
4. Будак В.П., Макаров Д.Н. Компьютерная графика с приложением в светодизайн: Учебник для высших учебных заведений. – Москва, 2022. – 264 с.
5. Никулин, Е. А. Компьютерная графика. Модели и алгоритмы : учебное пособие / Е. А. Никулин. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 708 с. — ISBN 978-5-8114-2505-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/107948> (дата обращения: 04.09.2023)
6. Курсы научного общества GraphiCon, URL: http://courses.graphicon.ru/files/courses/imagesynt/2010/lectures/osi_lectnotes_radiometry_photometry_draft_100403.pdf (дата обращения: 01.11.2023).
7. McCluney, W. R., “Introduction to Radiometry and Photometry”, Artech House (1994)
8. Зипа К.С., Игнатенко А.В., Волобой А.Г. Алгоритм тональной компрессии видеопоследовательностей // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2016. № 83. 32 с. DOI: [10.20948/prepr-2016-83](https://doi.org/10.20948/prepr-2016-83) URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2016-83>.
9. Свет и цвет в компьютерной графике, URL: <http://docplayer.ru/29581712-Svet-i-cvet-v-kompyuternoy-grafike.html> (дата обращения: 01.11.2023).
10. Свет, URL: <http://bse.uaio.ru/BSE/2301.htm> (дата обращения: 01.11.2023)
11. Ландсберг Г. С. Оптика. Учеб. пособие: Для вузов. — 6-е изд., стереот. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 848 с.
12. Terms, International Commission on Illumination (CIE), URL: <https://cie.co.at/e-ilv>, (17 august, 2023)
13. BRDF, International Commission on Illumination (CIE), URL: <https://cie.co.at/eilvterm/17-25-089>, (17 august, 2023)

14. Radiance coefficient, Luminance Factor, International Commission on Illumination (CIE), URL: <https://cie.co.at/eilvterm/17-24-078>, (17 august, 2023)
15. Kajiya J. T. The rendering equation // Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – 1986. – Pp. 143-150.
16. Andrew S. Glassner. Principles of Digital Images Synthesis. Morgan Kaufman, 1995, vol. 1 and 2.
17. C. Wynn. An Introduction to BRDF-Based Lighting // NVIDIA Corporation, 2000, URL: <https://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall06/cos526/tmp/wynn.pdf>, (дата обращения: 01.11.2023).
18. Lafortune E. P., Willems Y. D. Using the modified phong BRDF for physically based rendering //Dept. Comput. Sci., Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium, Tech. Rep. CW197. – 1994.
19. Cook R. L., Torrance K. E. A reflectance model for computer graphics // ACM Siggraph Computer Graphics. – 1981. – Vol. 15. – Nr. 3. – Pp. 307-316.
20. Cook R. L., Torrance K. E. A reflectance model for computer graphics // ACM Transactions on Graphics (ToG). – 1982. – Vol. 1. – No. 1. – Pp. 7-24.
21. Луизов А. В. Свет и цвет. – Л : Энергоатомиздат, 1989. – 256 с.
22. Janos Schanda, “Colorimetry. Understanding the CIE system”, WILEY-INTERSCIENCE, John Wiley & Sons, Inc., (2007).
23. Gernot Hoffmann “CIELab Color Space”, URL: <http://docs-hoffmann.de/cielab03022003.pdf>, (дата обращения: 01.11.2023).
24. Moroney, Nathan & Fairchild, Mark & Hunt, Robert & Changjun, li & Luo, Ming & Newman, Todd. (2002). The CIECAM02 color appearance model. IS & T/SID Color Imaging Conf. 10. 23-27.
25. Poynton, Charles, 2004. Digital Video and HDTV Algorithms and Interfaces, Morgan Kaufmann Publishers. (See also www.poynton.com.)
26. G., J. Researches on Normal and Defective Colour Vision. *Nature* **159**, 180–181 (1947). <https://doi.org/10.1038/159180a0>
27. Researches on Normal and Defective Colour Vision. By W. D. Wright. Pp. xvi + 383. (London: Henry Kimpton, 1946.) 36s. net. URL: <https://wellcomecollection.org/works/zv7jw3z7> (дата обращения: 01.11.2023).

28. Gregory J. Ward & Francis M. Rubinstein (1988) A New Technique for Computer Simulation of Illuminated Spaces, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 17:1, 80-91, DOI: 10.1080/00994480.1988.10748710
29. Radiance. What is it? URL: <https://radsite.lbl.gov/radiance/framew.html> (дата обращения: 01.11.2023).
30. Gregory Ward Larson, The LogLuv Encoding for Full Gamut, High Dynamic Range Images, URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.178.4716&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения: 01.11.2023).
31. Yuri V. Kuznetsov, Andrey A. Schadenko, Vycheslav V. Vaganov, Tone Reproduction Curve: rendering intents and their realization in halftone printing, *Journal of Graphic Engineering and Design*, Volume 11 (2), 2020, pp. 47-59, https://www.grid.uns.ac.rs/jged/download/v11n2/jged_v11_n2_p6.pdf.
32. Charles Hains; et al. (2003). "[Digital Color Halftones](#)". In Gaurav Sharma (ed.). *Digital Color Imaging Handbook*. CRC Press. ISBN 0-8493-0900-X.
33. N.J. Miller, P.Y. Ngai, and D.D. Miller. The application of computer graphics in lighting design. *Journal of the IES*, 14:6–26, 1984.
34. S.S. Stevens and J.C. Stevens. Brightness Function: Parametric Effects of Adaptation and Contrast, Program of the 1960 Annual Meeting, *Journal of the Optical Society of America*, Volume 53, #11, page 1139, November, 1960.
35. J. Tumblin and H.E. Rushmeier. Tone reproduction for realistic images. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 13(6):42–48, November 1993.
36. G. Ward. A contrast-based scale factor for luminance display. In *Graphics Gems IV*, pages 415–421. Academic Press, Boston, 1994.
37. G.W. Larson, H.E. Rushmeier, and C. Piatko. A visibility matching tone reproduction operator for high dynamic range scenes. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 3(4):291–306, October – December 1997.
38. Tumblin, J., Hodgins, J. K., and Guenter, B. K. Two methods for display of high contrast images. *ACM Transactions on Graphics* 18, 1 (January 1999), 56–94. ISSN 0730-0301.
39. Drago et al. / Adaptive Logarithmic Mapping For Displaying High Contrast Scenes, *EUROGRAPHICS 2003*, Volume 22 (2003), Number 3, URL: <https://resources.mpi-inf.mpg.de/tmo/logmap/logmap.pdf> (дата обращения: 01.11.2023).

40. A. Oppenheim, R. Schafer, and T. Stockham. Nonlinear filtering of multiplied and convolved signals. In Proceedings of the IEEE, volume 56, pages 1264–1291, August 1968.
41. Erik Reinhard, Michael Stark, Peter Shirley, James Ferwerda / Photographic Tone Reproduction for Digital Images, May 2002, ACM Transactions on Graphics 21(3), DOI: [10.1145/566654.566575](https://doi.org/10.1145/566654.566575)
42. K Chiu, M Herf, P Shirley, S Swamy, C Wang, K Zimmerman / Spatially Nonuniform Scaling Functions for High Contrast Images, Proceedings of Graphics Interface 93, pp. 245-244, May 1993, <https://graphicsinterface.org/wp-content/uploads/gi1993-34.pdf>
43. Frédo Durand, Julie Dorsey / Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images, July 2002, ACM Transactions on Graphics 21(3):257-266, DOI: [10.1145/566570.566574](https://doi.org/10.1145/566570.566574)
44. Raanan Fattal, Dani Lischinski, Michael Werman / Gradient Domain High Dynamic Range Compression, July 2002, ACM Transactions on Graphics 21(3), DOI: [10.1145/566570.566573](https://doi.org/10.1145/566570.566573)
45. C. Schlick. Quantization Technique for Visualization of High Dynamic Range Pictures. Proceedings 5th Eurographics Workshop on Rendering, pp.7-20., 1994.
46. D.J. Jobson, Z. Rahman, and G.A. Woodell. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes. IEEE Transactions on Image Processing, 6(7):965–976, July 1997.
47. S.N. Pattanaik, J.A. Ferwerda, M.D. Fairchild, and D.P. Greenberg. A multiscale model of adaptation and spatial vision for realistic image display. In Proceedings of SIGGRAPH 98, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 287–298, Orlando, Florida, July 1998. ACM SIGGRAPH / AddisonWesley.
48. J. Tumblin and G. Turk. Lcis: A boundary hierarchy for detail-preserving contrast reduction. In Proceedings of SIGGRAPH 99, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 83–90, Los Angeles, California, August 1999. ACM SIGGRAPH / Addison Wesley Longman.
49. Tom Mertens, Jan Kautz, Frank Van Reeth. Exposure Fusion, [15th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications \(PG'07\)](https://doi.org/10.1109/PG.2007.17), 29 October 2007 - 02 November, DOI: [10.1109/PG.2007.17](https://doi.org/10.1109/PG.2007.17)
50. J. Cohen, C. Tchou, T. Hawkins, and P. Debevec. Real-Time high dynamic range texture mapping. In 12th Eurographics Workshop on Rendering, pages 313–320. Eurographics, June 2002.

Жданов Дмитрий Дмитриевич
Потемин Игорь Станиславович
Жданов Андрей Дмитриевич

Теоретические основы компьютерной графики и вычислительной оптики

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А