

Дейдре, которая позволила мне заниматься рукописью даже в наш медовый месяц.

М. Ф.

Олесе, которая подумала, как это мило, что моя любимая книга – компьютерная программа.

В. Дж.

Изабель и Куинн, двум самым необыкновенным людям, которых я когда-либо встречал. Пусть ваши пиксели никогда не будут маленькими квадратиками.

Гр. Х.

СОДЕРЖАНИЕ

ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА	16
ОБ АВТОРАХ	17
ПРЕДИСЛОВИЕ	18
ГЛАВА 01 ВВЕДЕНИЕ	30
1.1 Грамотное программирование	30
1.2 Фотореалистический рендеринг и алгоритм рейтрейсинга	33
1.2.1 Камеры и пленка	35
1.2.2 Пересечения луч–объект	37
1.2.3 Распределение света	38
1.2.4 Видимость	40
1.2.5 Поверхности, рассеивающие свет	41
1.2.6 Непрямое пропускание света	41
1.2.7 Распространение луча	44
1.3 Обзор системы pbrt	45
1.3.1 Этапы выполнения	46
1.3.2 Функция main() системы pbrt	47
1.3.3 Интерфейс Integrator	51
1.3.4 ImageTileIntegrator и основной цикл рендеринга	53
1.3.5 Реализация RayIntegrator	57
1.3.6 Интегратор случайного блуждания	60
1.4 Как изучать материал этой книги	65
1.4.1 Упражнения	66
1.4.2 Просмотр изображений	67
1.4.3 Онлайн-версия	67
1.5 Понимание и использование кода	67
1.5.1 Организация исходного кода	67
1.5.2 Соглашение по наименованиям	68
1.5.3 Указатель или ссылка?	68
1.5.4 Абстрактность или эффективность?	69
1.5.5 Пространство имен pstd	69
1.5.6 Аллокаторы	69

1.5.7	Динамическая диспетчеризация	70
1.5.8	Оптимизация кода	71
1.5.9	Отладка и регистрация	71
1.5.10	Параллелизм и безопасность потоков	72
1.5.11	Расширение системы	73
1.5.12	Программные ошибки	73
1.6	Краткая история рендеринга на основе законов физики	73
1.6.1	Исследования	74
1.6.2	Производство	76
	Дополнительная литература	78
	Упражнения	80

ГЛАВА 02 ИНТЕГРИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

2.1	Метод Монте-Карло: основы	83
2.1.1	Обзор предпосылок и теории вероятностей	83
2.1.2	Ожидаемые значения	85
2.1.3	Оценка Монте-Карло	85
2.1.4	Ошибка в статистических оценках Монте-Карло	87
2.2	Повышение эффективности	89
2.2.1	Стратифицированный семплинг	89
2.2.2	Семплинг по значимости	91
2.2.3	Семплинг по множественной значимости	93
2.2.4	Русская рулетка	96
2.2.5	Расщепление	97
2.3	Семплинг методом инверсии	97
2.3.1	Дискретный случай	97
2.3.2	Непрерывный случай	100
2.4	Преобразование между распределениями	101
2.4.1	Преобразование в нескольких измерениях	102
2.4.2	Семплинг с многомерными преобразованиями	103
	Дополнительная литература	105
	Упражнения	106

ГЛАВА 03 ГЕОМЕТРИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

3.1	Системы координат	108
3.1.1	Направленность системы координат	109
3.2	Базовые классы n -кортежей	110
3.3	Векторы	113
3.3.1	Нормализация и длина вектора	114
3.3.2	Скалярное и векторное произведения	116
3.3.3	Система координат из одного вектора	118
3.4	Точки	119
3.5	Нормали	120
3.6	Лучи	121
3.6.1	Дифференциалы лучей	123
3.7	Ограничивающие боксы	124
3.8	Сферическая геометрия	130
3.8.1	Телесные углы	130
3.8.2	Сферические полигоны	131
3.8.3	Сферические параметризации	133
3.8.4	Ограничивающие направления	140
3.9	Преобразования	144
3.9.1	Однородные координаты	145
3.9.2	Оценка класса преобразования	146
3.9.3	Базовые операции	146
3.9.4	Перемещения (трансляции)	148
3.9.5	Масштабирование	149
3.9.6	Поворот по осям x , y и z	150

3.9.7	Поворот вокруг произвольной оси	152
3.9.8	Поворот одного вектора к другому	153
3.9.9	Преобразование точки зрения	154
3.10	Применение преобразований	155
3.10.1	Точки	156
3.10.2	Векторы	156
3.10.3	Нормали	156
3.10.4	Лучи	157
3.10.5	Ограничивающие боксы	157
3.10.6	Композиция преобразований	158
3.10.7	Преобразования и направленность системы координат	158
3.10.8	Векторные фреймы	159
3.10.9	Анимированные преобразования	160
3.11	Взаимодействия	162
3.11.1	Взаимодействие с поверхностью	164
3.11.2	Взаимодействие со средой	166
	Дополнительная литература	167
	Упражнения	168

ГЛАВА 04 РАДИОМЕТРИЯ, СПЕКТРЫ И ЦВЕТ

4.1	Радиометрия	171
4.1.1	Базовые величины	172
4.1.2	Функции падающего и исходящего излучений	175
4.1.3	Радиометрические спектральные распределения	177
4.1.4	Яркость и фотометрия	177
4.2	Работа с радиометрическими интегралами	178
4.2.1	Интегралы по проекции телесного угла	178
4.2.2	Интегралы по сферическим координатам	179
4.2.3	Интегралы по площади	180
4.3	Отражение от поверхности	181
4.3.1	BRDF и BTDF	182
4.3.2	BSSRDF	184
4.4	Излучение света	184
4.4.1	Излучение черного тела	186
4.4.2	Стандартные источники света	188
4.5	Представление спектральных распределений	189
4.5.1	Интерфейс спектра	190
4.5.2	Общие спектральные распределения	191
4.5.3	Встроенные спектральные данные	194
4.5.4	Семплированные спектральные распределения	195
4.6	Цвет	200
4.6.1	Цветовое пространство XYZ	201
4.6.2	Цвет RGB	205
4.6.3	Цветовые пространства RGB	207
4.6.4	Почему именно спектральный рендеринг?	210
4.6.5	Выбор количества длин волн для семплинга	211
4.6.6	От RGB к спектрам	214
	Дополнительная литература	224
	Упражнения	227

ГЛАВА 05 КАМЕРЫ И ПЛЕНКА

5.1	Интерфейс камеры	230
5.1.1	Пространства координат камеры	232
5.1.2	Класс CameraBase	235
5.2	Модели проекционных камер	238
5.2.1	Ортографическая камера	240
5.2.2	Перспективная камера	243
5.2.3	Модель тонкой линзы и глубина резкости	246

5.3	Сферическая камера.....	252
5.4	Пленка и изображение.....	254
5.4.1	Уравнение измерения камеры.....	254
5.4.2	Моделирование отклика световоспринимающего сенсора.....	255
5.4.3	Фильтрация семплов изображения.....	264
5.4.4	Интерфейс пленки.....	267
5.4.5	Общая функциональность пленки.....	269
5.4.6	RGBFilm.....	271
5.4.7	GBBufferFilm.....	275
	Дополнительная литература.....	276
	Упражнения.....	279
ГЛАВА 06 ФОРМЫ.....		282
6.1	Базовый интерфейс формы.....	282
6.1.1	Ограничивающие объемы.....	282
6.1.2	Пересечения лучей с границами.....	283
6.1.3	Проверки пересечения.....	286
6.1.4	Пространство координат пересечений.....	287
6.1.5	Односторонность.....	288
6.1.6	Диффузные источники.....	288
6.1.7	Семплинг.....	288
6.2	Сферы.....	290
6.2.1	Ограничивающие боксы.....	293
6.2.2	Проверки пересечения.....	293
6.2.3	Площадь поверхности.....	300
6.2.4	Семплинг.....	301
6.3	Цилиндры.....	306
6.3.1	Площадь и границы.....	307
6.3.2	Проверки пересечения.....	308
6.3.3	Семплинг.....	310
6.4	Диски.....	311
6.4.1	Площадь и ограничение.....	312
6.4.2	Проверки пересечения.....	313
6.4.3	Семплинг.....	315
6.5	Сетки из треугольников.....	315
6.5.1	Представление и хранение сетки.....	317
6.5.2	Класс Triangle.....	321
6.5.3	Пересечение луч–треугольник.....	322
*6.5.4	Семплинг.....	332
6.6	Билинейчатые патчи.....	344
6.6.1	Тестирование пересечений.....	349
6.6.2	Семплинг.....	355
*6.7	Кривые.....	362
6.7.1	Ограничивающие кривые.....	365
6.7.2	Проверки пересечения.....	366
*6.8	Управление ошибкой округления.....	374
6.8.1	Арифметика чисел с плавающей запятой.....	375
6.8.2	Консервативные пересечения луч–ограничение.....	386
6.8.3	Точные квадратичные дискриминанты.....	387
6.8.4	Надежные пересечения с треугольником.....	389
6.8.5	Ошибка точки пересечения с границей.....	390
6.8.6	Надежные инициированные источники лучей.....	397
6.8.7	Избежание пересечений позади источников лучей.....	400
6.8.8	Обсуждение.....	402
	Дополнительная литература.....	403
	Упражнения.....	407

* Звездочкой отмечены разделы с продвинутым содержанием, которые можно пропустить при первом чтении.

ГЛАВА 07	ПРИМИТИВЫ И УСКОРЕНИЕ РЕНДЕРИНГА НА ПЕРЕСЕЧЕНИЯХ	413
7.1	Интерфейс Primitive и геометрические примитивы	414
7.1.1	Геометрические примитивы	414
7.1.2	Инстансирование объекта и примитивы в движении	418
7.2	Агрегаты	421
7.3	Иерархии ограничивающих объемов	422
7.3.1	Конструкция BVH	423
7.3.2	Эвристика площади поверхности	430
7.3.3	Линейные иерархии ограничивающих объемов	435
7.3.4	Компактный BVH для обхода	443
7.3.5	Тесты ограничения и пересечения	445
	Дополнительная литература	449
	Упражнения	455
ГЛАВА 08	СЕМПЛИРОВАНИЕ И РЕКОНСТРУКЦИЯ	459
8.1	Теория семплирования	459
8.1.1	Частотный интервал и преобразование Фурье	461
8.1.2	Идеальный семплинг и реконструкция	463
8.1.3	Алиасинг	466
8.1.4	Понятие пикселя	467
8.1.5	Семплинг и алиасинг при рендеринге	468
8.1.6	Спектральный анализ шаблонов семплинга	470
8.2	Семплинг и интегрирование	473
*8.2.1	Дисперсный анализ Фурье	474
8.2.2	Низкое расхождение и квази-Монте-Карло	478
8.3	Интерфейс семплирования	481
8.4	Независимый семплер	484
8.5	Стратифицированный семплер	485
*8.6	Семплер Халтона	491
8.6.1	Точки Хаммерсли и Халтона	491
8.6.2	Рандомизация через скремблинг	494
8.6.3	Реализация семплера Халтона	498
8.6.4	Оценка	502
*8.7	Семплеры Sobol'	506
8.7.1	Стратификация по элементарным интервалам	508
8.7.2	Рандомизация и скремблирование	509
8.7.3	Генерация семплов Sobol'	511
8.7.4	Глобальный семплер Sobol'	512
8.7.5	Заполненный семплер Sobol'	515
8.7.6	Семплер синего шума Sobol'	517
8.7.7	Оценка	523
8.8	Реконструкция изображения	525
8.8.1	Интерфейс Filter	527
8.8.2	FilterSampler	529
8.8.3	Прямоугольный фильтр	531
8.8.4	Треугольный фильтр	533
8.8.5	Фильтр Гаусса	534
8.8.6	Фильтр Митчелла	535
8.8.7	Оконный фильтр Sinc	537
	Дополнительная литература	539
	Упражнения	545
ГЛАВА 09	МОДЕЛИ ОТРАЖЕНИЯ	547
9.1	Представление BSDF	549
9.1.1	Геометрические установки и соглашения	549
9.1.2	Интерфейс VxDF	550

9.1.3	Полусферическое отражение.....	553
9.1.4	Дельта-распределения в BSDF.....	554
9.1.5	BSDF	555
9.2	Рассеянное отражение.....	557
9.3	Зеркальное отражение и пропускание.....	559
9.3.1	Физические обоснования	559
9.3.2	Коэффициент преломления	560
9.3.3	Закон зеркального отражения.....	562
9.3.4	Закон Снелла	563
9.3.5	Уравнение Френеля.....	567
9.3.6	Уравнение Френеля для проводников	568
9.4	BRDF проводника.....	571
9.5	BSDF диэлектрика.....	573
9.5.1	BSDF тонкого диэлектрика	577
*9.5.2	Несимметричное рассеяние и преломление.....	579
9.6	Моделирование шероховатости с использованием теории микрограней	581
9.6.1	Распределение микрограней.....	583
9.6.2	Маскирующая функция	585
9.6.3	Функция маскирования-шейдинга.....	588
9.6.4	Семплинг распределения видимых нормалей	589
9.6.5	Модель Торренса–Спэрроу.....	592
9.7	BSDF шероховатого диэлектрика	597
*9.8	Измеренные BSDF.....	601
9.8.1	Базовые структуры данных	607
9.8.2	Уравнение измеренной BRDF.....	609
*9.9	Рассеяние от волос	611
9.9.1	Геометрия волос	611
9.9.2	Рассеяние от волос	613
9.9.3	Продольное рассеяние	616
9.9.4	Поглощение в волокнах	618
9.9.5	Азимутальное рассеяние	621
9.9.6	Оценка модели рассеяния	624
9.9.7	Семплинг	626
9.9.8	Коэффициент поглощения волос	628
	Дополнительная литература.....	629
	Упражнения.....	637
ГЛАВА 10 ТЕКСТУРЫ И МАТЕРИАЛЫ.....		641
10.1	Семплинг текстур и антиалиасинг	642
10.1.1	Определение частоты семплинга текстуры	643
10.1.2	Лучевые дифференциалы на переходе границы между двумя средами ...	650
*10.1.3	Лучевые дифференциалы для зеркального отражения и пропускания.....	651
10.1.4	Фильтрующие функции текстур.....	655
10.2	Генерация текстурных координат	657
10.2.1	UV-маппинг	658
10.2.2	Сферический маппинг.....	659
10.2.3	Цилиндрический маппинг	660
10.2.4	Планарный маппинг	661
10.2.5	3D-маппинг	662
10.3	Текстурный интерфейс и базовые текстуры.....	663
10.3.1	Текстура Constant	664
10.3.2	Текстура Scale	664
10.3.3	Текстуры Mix.....	666
10.4	Текстуры-изображения	668
10.4.1	Управление текстурной памятью	669
10.4.2	Оценка текстуры изображения	671
10.4.3	Текстуры MIP	672
10.4.4	Фильтрование изображений-текстур	675

10.5	Интерфейс материалов и его реализации	681
10.5.1	Реализации Material.....	685
10.5.2	Вычисление BSDF на поверхности.....	688
10.5.3	Нормальный маппинг.....	691
10.5.4	Рельефный маппинг.....	693
	Дополнительная литература.....	697
	Упражнения.....	701
ГЛАВА 11 ОБЪЕМНОЕ РАССЕЯНИЕ		704
11.1	Процессы объемного рассеяния	704
11.1.1	Поглощение	706
11.1.2	Эмиссия.....	707
11.1.3	Рассеяние на выходе и затухание	708
11.1.4	Внутреннее рассеяние	709
11.2	Пропускание	711
11.2.1	Нулевое рассеяние.....	714
11.3	Фазовые функции	716
11.3.1	Фазовая функция Хеньи–Гринштейна.....	718
11.4	Передающие среды.....	721
11.4.1	Интерфейс Medium	723
11.4.2	Однородная среда	726
11.4.3	Мажорантный итератор DDA	728
11.4.4	Среда с однородной сеткой	734
11.4.5	Среда с сеткой RGB.....	737
	Дополнительная литература.....	740
	Упражнения.....	742
ГЛАВА 12 ИСТОЧНИКИ СВЕТА.....		745
12.1	Интерфейс источника света.....	746
12.1.1	Характеристики фотометрических источников света	750
12.1.2	Класс LightBase	750
12.2	Точечные источники света.....	752
12.2.1	Прожекторы.....	754
12.2.2	Источники света, проецирующие текстуры.....	756
12.2.3	Гониофотометрические источники света	760
12.3	Отдаленные источники света	763
12.4	Протяженные источники света.....	765
12.5	Бесконечные протяженные источники света	769
12.5.1	Бесконечные источники с однородным светом	770
12.5.2	Бесконечные источники света, проецирующие изображение	772
*12.5.3	Бесконечные источники света, проецирующие изображения, ограниченные порталом	777
12.6	Семплинг источников света.....	785
12.6.1	Однородный семплинг источников света	786
12.6.2	Семплирование по мощности света	787
*12.6.3	Семплинг источника света с BVH	790
	Дополнительная литература.....	809
	Упражнения.....	813
ГЛАВА 13 СВЕТОВОЙ ПЕРЕНОС I: ПОВЕРХНОСТНОЕ ОТРАЖЕНИЕ		816
13.1	Уравнение светового переноса.....	816
13.1.1	Основной вывод	817
13.1.2	Аналитические решения для LTE.....	818
13.1.3	Поверхностная форма LTE.....	819
13.1.4	Интегралы по пути.....	820
13.1.5	Подынтегральная дельта-функция	822
13.1.6	Разделение подынтегральной функции.....	822
13.2	Трассировка пути.....	823

13.2.1	Обзор.....	824
13.2.2	Семплинг пути.....	825
13.2.3	Конструкция восходящего пути.....	826
13.3	Простой трассировщик пути.....	827
13.4	Улучшенный трассировщик пути.....	832
13.4.1	Регуляризация пути.....	843
	Дополнительная литература.....	845
	Упражнения.....	851

ГЛАВА 14 СВЕТОВОЙ ПЕРЕНОС II: ОБЪЕМНЫЙ РЕНДЕРИНГ..... 854

14.1	Уравнение переноса.....	854
14.1.1	Обобщение нулевого рассеяния.....	856
14.1.2	Расчет уравнения переноса.....	857
14.1.3	Семплинг мажорантного пропускания.....	858
*14.1.4	Обобщенное пространство путей.....	863
*14.1.5	Оценка объемного интеграла пути.....	866
14.2	Интеграторы объемного рассеяния.....	868
14.2.1	Простой объемный интегратор.....	868
*14.2.2	Совершенствование методов семплинга.....	873
*14.2.3	Улучшенный объемный интегратор.....	877
14.3	Рассеяние на слоистых материалах.....	890
14.3.1	Одномерное уравнение переноса.....	891
14.3.2	Слоистая VxDF.....	893
14.3.3	Проводники и диффузные материалы с покрытием.....	906
	Дополнительная литература.....	907
	Упражнения.....	912

ГЛАВА *15 РЕНДЕРИНГ ВОЛНОВОГО ФРОНТА НА GPU..... 915

15.1	Отображение трассировки пути на GPU.....	917
15.1.1	Базовая архитектура GPU.....	917
15.1.2	Структуризация вычислений рендеринга.....	923
15.1.3	Обзор системы.....	925
15.2	Фундамент реализации.....	927
15.2.1	Спецификация обработки и пространства памяти.....	927
15.2.2	Запуск ядер на GPU.....	928
15.2.3	Схема массивов структур.....	929
15.2.4	Очереди обработки.....	933
15.3	Реализация трассировщика пути.....	937
15.3.1	Запуск работы.....	939
15.3.2	Метод Render().....	939
15.3.3	Генерация лучей камеры.....	941
15.3.4	Цикл по глубине луча.....	945
15.3.5	Генерация семплов.....	947
15.3.6	Тестирование пересечений.....	949
15.3.7	Передающие среды.....	952
15.3.8	Эмиссия, порожденная лучами.....	953
15.3.9	Поверхностное рассеяние.....	956
15.3.10	Теневые лучи.....	966
15.3.11	Обновление Film.....	967
	Дополнительная литература.....	968
	Упражнения.....	970

ГЛАВА 16 РЕТРОСПЕКТИВА И БУДУЩЕЕ..... 974

16.1	История pbrt.....	974
16.2	Альтернативы.....	976
16.2.1	Внеядерный рендеринг.....	977
16.2.2	Прешейдинг микрополигональных сеток.....	977
16.2.3	Пакетный трейсинг.....	978

16.2.4	Интерактивный и анимационный рендеринг	980
16.2.5	Специализированная компиляция	980
16.3	Новейшие темы	981
16.3.1	Обратный и дифференцируемый рендеринг	981
16.3.2	Машинное обучение и рендеринг	986
16.4	Будущее	989
16.5	Заключение	990

ПРИЛОЖЕНИЕ А АЛГОРИТМЫ СЕМПЛИНГА 991

A.1	Метод псевдонима	991
A.2	Резервуарный семплинг	995
A.3	Метод отбраковки	998
A.4	Семплинг одномерных функций	999
A.4.1	Семплинг треугольной функции	1000
A.4.2	Семплинг экспоненциальных распределений	1000
A.4.3	Семплинг функции Гаусса	1001
A.4.4	Семплинг логистической функции	1002
A.4.5	Семплинг функции на интервале	1003
A.4.6	Семплинг неинвертируемых CDFS	1004
A.4.7	Семплинг кусочно-постоянных одномерных функций	1005
A.5	Семплинг многомерных функций	1009
A.5.1	Семплинг единичного диска	1009
A.5.2	Однородный семплинг полусфер и сфер	1012
A.5.3	Косинусно-взвешенный семплинг полусферы	1013
A.5.4	Семплинг внутри конуса	1015
A.5.5	Кусочно-постоянные двумерные распределения	1015
A.5.6	Оконные кусочно-постоянные двумерные распределения	1018
	Дополнительная литература	1025
	Упражнения	1027

ПРИЛОЖЕНИЕ В УТИЛИТЫ 1028

V.1	Запуск системы, очистка и опции	1028
V.2	Математическая инфраструктура	1029
V.2.1	Основные алгебраические функции	1030
V.2.2	Целые степени и многочлены	1031
V.2.3	Тригонометрические функции	1032
V.2.4	Логарифмическая и степенная функции	1032
V.2.5	Трансцендентные и специальные функции	1034
V.2.6	Интервальный поиск	1035
V.2.7	Битовые операции	1036
V.2.8	Хеширование и случайные перестановки	1038
*V.2.9	Безошибочные преобразования	1039
V.2.10	Нахождение нулей	1041
V.2.11	Надежная оценка дисперсии	1044
V.2.12	Квадратные матрицы	1045
V.2.13	Безье-сплайны	1047
V.2.14	Генерация псевдослучайных чисел	1050
V.2.15	Интервальная арифметика	1053
V.3	Интерактивность	1056
V.3.1	Работа с файлами	1057
V.3.2	Кодирование символов и Unicode	1057
V.3.3	Печать и форматирование строк	1059
V.3.4	Сообщения о ошибках	1060
V.3.5	Логирование	1060
V.3.6	Оператор контроля и отслеживание ошибок при выполнении	1061
V.3.7	Отображение изображений	1063
V.3.8	Рапорт о процессе выполнения	1063
V.4	Контейнеры и управление памятью	1064

В.4.1	Двумерные массивы	1065
В.4.2	Интернированные объекты.....	1066
*В.4.3	Наборы типов	1067
В.4.4	Тегированные указатели	1068
В.4.5	Трехмерный семплинг.....	1072
В.4.6	Эффективная временная аллокация памяти.....	1073
В.5	Изображения.....	1075
В.5.1	Работа со значениями пикселей	1077
В.5.2	Операции на всем изображении	1079
В.5.3	Чтение и сохранение изображений	1080
В.5.4	Изменение размера изображения	1082
В.5.5	Пирамиды изображений	1086
В.5.6	Кодировки цвета	1089
В.6	Параллельная обработка	1090
В.6.1	Конкуренция потоков данных и координация	1091
В.6.2	Атомики с плавающей запятой.....	1094
В.6.3	Модели с когерентностью памяти и производительность	1095
В.6.4	Пулы потоков и выполнение параллельных задач	1096
В.6.5	Функция Parallel для циклов	1100
В.6.6	Асинхронные задачи.....	1103
В.6.7	Переменные локального потока	1106
В.7	Статистика	1107
В.7.1	Реализация	1109
	Дополнительная литература.....	1110
	Упражнения.....	1111
	ПРИЛОЖЕНИЕ С ОБРАБОТКА ОПИСАНИЯ СЦЕНЫ	1112
С.1	Токенизация и парсинг	1113
С.2	Управление описанием сцены.....	1115
С.2.1	Сущности сцены.....	1116
С.2.2	Словари параметров	1117
С.2.3	Отслеживание графического статуса.....	1121
С.2.4	Создание элементов сцены	1125
С.3	Создание BasicScene и финальных объектов	1126
С.4	Добавление новых реализаций объекта	1129
	Дополнительная литература.....	1130
	Упражнения.....	1130
	ССЫЛКИ	1132
	ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	1182

ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

Отзывы и пожелания

Мы всегда рады отзывам наших читателей. Расскажите нам, что вы думаете об этой книге – что понравилось или, может быть, не понравилось. Отзывы важны для нас, чтобы выпускать книги, которые будут для вас максимально полезны.

Вы можете написать отзыв на нашем сайте www.dmkpress.com, зайдя на страницу книги и оставив комментарий в разделе «Отзывы и рецензии». Также можно послать письмо главному редактору по адресу dmkpress@gmail.com; при этом укажите название книги в теме письма.

Если вы являетесь экспертом в какой-либо области и заинтересованы в написании новой книги, заполните форму на нашем сайте по адресу http://dmkpress.com/authors/publish_book/ или напишите в издательство по адресу dmkpress@gmail.com.

Список опечаток

Хотя мы приняли все возможные меры для того, чтобы обеспечить высокое качество наших текстов, ошибки все равно случаются. Если вы найдете ошибку в одной из наших книг, мы будем очень благодарны, если вы сообщите о ней главному редактору по адресу dmkpress@gmail.com. Сделав это, вы избавите других читателей от недопонимания и поможете нам улучшить последующие издания этой книги.

Нарушение авторских прав

Пиратство в интернете по-прежнему остается насущной проблемой. Издательство «ДМК Пресс» очень серьезно относится к вопросам защиты авторских прав и лицензирования. Если вы столкнетесь в интернете с незаконной публикацией какой-либо из наших книг, пожалуйста, пришлите нам ссылку на интернет-ресурс, чтобы мы могли применить санкции.

Ссылку на подозрительные материалы можно прислать по адресу электронной почты dmkpress@gmail.com.

Мы высоко ценим любую помощь по защите наших авторов, благодаря которой мы можем предоставлять вам качественные материалы.

ОБ АВТОРАХ

Мэтт Фарр – заслуженный научный сотрудник Nvidia. Ранее он работал в Google, был соучредителем Neoptica, которая была приобретена Intel, и соучредителем Exluna, которая была приобретена Nvidia. У него есть степень бакалавра Йельского университета и докторская степень Стэнфордской графической лаборатории, где он работал под руководством Пэта Ханраhana.

Вензел Джейкоб – доцент Школы компьютерных и коммуникационных наук Федеральной политехнической школы Лозанны (EPFL). Его исследования сосредоточены на инверсной и дифференцируемой графике, моделировании внешнего вида материала и рендеринге, основанном на законах физики. Венцель получил докторскую степень в Корнеллском университете под руководством Стива Маршнера, после чего поступил в Швейцарскую высшую техническую школу Цюриха для обучения в докторантуре под руководством Ольги Соркин-Хорнунг. Венцель также является ведущим разработчиком визуализатора *Mitsuba*, исследовательско-ориентированной системы рендеринга.

Грег Хамфрис в настоящее время работает инженером в стелс-стартапе¹. Он также входил в графическую команду Chrome в Google и в группу рейтрейсинга OptiX GPU в Nvidia. В прошлом был профессором компьютерных наук в Университете Вирджинии, где проводил исследования как в области высокопроизводительной компьютерной графики, так и в области физически корректной графики, а также компьютерной архитектуры и рендеринга. У Грега степень бакалавра Принстона и степень доктора компьютерных наук, полученная в Стэнфорде под руководством Пэта Ханраhana. Когда Грег не занимается рейтрейсингом, его обычно можно найти играющим в спортивный бридж.

¹ Тип стартап-компании, которая работает скрытно, избегая общественного внимания. – Прим. ред.

ПРЕДИСЛОВИЕ

«Информация должна быть доступна для тех, кто хочет учиться и понимать; для программистов исходный код программы является единственным средством учиться искусству у своих предшественников. Было бы немыслимо, чтобы драматурги не позволяли другим драматургам читать тексты своих пьес на театральных представлениях и им было бы запрещено даже делать заметки. Любой достойный автор текста хорошо начитан, и каждый ребенок, который хочет научиться писать, должен читать в сотни раз больше, чем пишет. Вряд ли разумно требовать от будущих программистов, чтобы они сами изобрели алфавит и тут же научились писать большие романы. Программирование не может развиваться, если каждое следующее поколение программистов не будет иметь доступа к знаниям и информации, приобретенным другими программистами, их предшественниками».

– Эрик Наггум

Рендеринг является фундаментальной составляющей компьютерной графики. На самом высоком уровне абстракции рендеринг представляет собой процесс преобразования описания трехмерной сцены в изображение. Алгоритмы анимации, геометрического моделирования, текстурирования и других областей компьютерной графики должны пропускать свои результаты через процесс рендеринга, чтобы их можно было увидеть как изображение. Рендеринг стал вездесущим: от фильмов до игр и других областей; он открыл новые границы для творческого самовыражения, развлечений и рендеринга.

В первые годы исследования в области рендеринга были сосредоточены на решении фундаментальных проблем, таких как определение того, какие объекты видны с данной точки зрения. По мере того, как были найдены эффективные решения этих проблем, и по мере того, как благодаря постоянному прогрессу в других областях графики становились доступными более проработанные и реалистичные описания сцен, рендеринг стал включать в себя идеи из широкого круга дисциплин, в том числе физику и астрофизику, астрономию, биологию, психологию и изучение зрительного восприятия, а также абстрактную и прикладную математику. Междисциплинарный характер рендеринга является одной из причин того, что он стал настолько привлекательной областью для изучения.

В этой книге представлен набор современных алгоритмов рендеринга с помощью документированного исходного кода полной системы рендеринга. Почти все изображения в этой книге, включая изображение на обложке, были созданы описанным в книге

программным обеспечением. Все алгоритмы, которые были объединены для создания этих изображений, описаны на страницах этой книги. Система `rbgt` создана с использованием методологии программирования, называемой *грамотным программированием* (или *литературным программированием*, «*literate programming*»), которая объединяет прозаический текст, описывающий систему, с исходным кодом, который ее реализует. Мы считаем, что грамотное программирование является ценным способом реализации идей в компьютерной графике и информатике в целом. Часто некоторые тонкости алгоритма могут не проявить себя до тех пор, пока он не будет разработан, поэтому просмотр фактической реализации – хороший способ получить четкое представление о его деталях. Действительно, мы считаем, что такое глубокое понимание ряда тщательно отобранных нами алгоритмов обеспечивает лучшую основу для дальнейшего изучения компьютерной графики, чем поверхностное изучение многих из них.

Чтобы лучше продемонстрировать, как алгоритм реализуется на практике, мы представляем эти алгоритмы в контексте полной и нетривиальной программной системы, что также позволяет нам решать проблемы проектирования и реализации систем рендеринга среднего размера. Разработка основных абстракций и интерфейсов системы рендеринга имеет существенные последствия как на элегантность ее реализации, так и на возможность дальнейшего ее расширения, однако компромиссы в этом пространстве разработки обсуждаются редко.

Работа с системой `rbgt`, как и все содержание этой книги, сосредоточена исключительно на *фотореалистичном рендеринге*. Фотореалистичность можно определить по-разному: как задачу создания изображений, не отличимых от тех, что запечатлела бы камера на фотографии, или как создание изображений, реакция на которые у человека, рассматривающего их, не отличима от реакции человека, смотрящего на реальную сцену. Есть много причин сосредоточиться на фотореализме. Фотореалистичные изображения имеют решающее значение для спецэффектов в фильмах, потому что изображения, созданные компьютером, должны составлять естественную часть реального мира фильма. В таких приложениях, как компьютерные игры, где все изображения являются синтетическими, фотореализм выступает эффективным инструментом, позволяющим наблюдателю забыть о том, что он смотрит на сцену, которой на самом деле не существует. Наконец, фотореализм дает четкий критерий оценки качества результата рендеринга.

АУДИТОРИЯ КНИГИ

Эта книга предназначена для трех основных групп читателей. Первая группа – это аспиранты или студенты старших курсов высших учебных заведений, изучающие компьютерную графику. В этой книге предполагается, что у читателя уже есть знания основ компьютерной графики на уровне колледжа, но здесь будут рассмотрены также некоторые важнейшие понятия, такие как начала векторной алгебры и математические преобразования. Студентам, у которых нет опыта работы с программами, содержащими десятки тысяч строк исходного кода, «грамотное программирование» даст мягкое введение в эти сложности. Мы также уделили особое внимание объяснению некоторых внутренних взаимосвязей и абстракций в системе `rbgt`, чтобы дать читателям представление о том, почему она устроена так, как она есть, а не иначе.

Вторая предполагаемая группа читателей – это далеко продвинувшиеся в компьютерной графике аспиранты и исследователи данной области. Для тех, кто занимается исследованиями в области рендеринга, книга представляет собой широкое введение в эту дисциплину, а исходный код `rbgt` обеспечивает основу, на которой можно строить свои разработки (или, по крайней мере, использовать фрагменты исходного кода). Для тех, кто работает в других областях компьютерной графики, мы уверены, может оказаться полезным глубокое понимание технологии рендеринга.

Наша конечная аудитория – разработчики программного обеспечения в компьютерной индустрии. Хотя многие основные идеи книги им уже знакомы, просмотр комментариев к алгоритмам, представленных в грамотном стиле программирования, может

подсказать новые идеи. Система *rbgt* также содержит в себе тщательно разработанные и отлаженные реализации многих алгоритмов, которые могут быть сложными для корректной реализации; они должны представлять особый интерес для опытных практиков рендеринга. Мы надеемся, что изучение конкретной структуры полной и нетривиальной системы рендеринга может натолкнуть эту аудиторию на размышления.

ОБЗОР И ЦЕЛИ

Система *rbgt* основана на алгоритме *рейтрейсинга* (трассировки лучей). Трассировка лучей – это элегантная техника, которая берет свое начало в производстве линз; Карл Фридрих Гаусс описал прохождение лучей через линзы еще в XIX веке. Алгоритмы трассировки лучей на компьютерах следуют пути лучей света бесконечно малой толщины через сцену, пока они не пересекают какую-либо поверхность. Этот метод дает простой метод нахождения первого объекта, видимого с любой определенной позиции и направления, и является основой для многих алгоритмов рендеринга.

Система *rbgt* была разработана и реализована с учетом трех основных целей: она должна быть *полной, иллюстративной и физически корректной* (соответствующей законам физики).

Полнота подразумевает, что в системе не должно быть недостатка важнейших функций, необходимых для высококачественных коммерческих систем рендеринга. В частности, это означает, что все важные практические вопросы, такие как антиалиасинг (В профессиональном сообществе компьютерной графики очень часто употребляется термин «антиалайзинг». – *Прим.ред.*), надежность, числовая точность и возможность эффективного рендеринга сложных сцен, должны быть детально решены. Было важно рассмотреть эти вопросы с самого начала проектирования системы, поскольку реализация данных функций может иметь отдаленные последствия для всех компонент системы, и их может быть весьма сложно модифицировать на более позднем этапе разработки системы.

Вторая цель определяла наш тщательный выбор алгоритмов, структур данных и методов рендеринга с прицелом на удобочитаемость и ясность. Поскольку их реализации будет изучать больше читателей, чем в случае с другими системами рендеринга, мы попытались выбрать самые элегантные алгоритмы, о которых мы знали, и реализовать их как можно лучше. Эта цель также требовала, чтобы система была достаточно маленькой – она должна быть в меру понятной, чтобы ее целиком мог охватить и один человек. Мы реализовали *rbgt*, используя расширяемую архитектуру, с ядром системы в виде набора тщательно разработанных классов интерфейсов и максимально конкретной функциональностью в реализациях этих интерфейсов. В результате у читателя нет необходимости разбираться во всех конкретных реализациях, чтобы понять базовую структуру системы. Это дает возможность углубиться в интересующие его части и пропустить другие, не теряя из виду работу системы как единого целого.

Существует противоречие между двумя качествами: полнотой и иллюстративностью. Описание и разработка всех возможных полезных техник не только сделали бы эту книгу неприемлемо длинной, но и представили систему *rbgt* чрезмерно сложной для большинства читателей. В тех случаях, когда в *rbgt* отсутствует необходимая функция, мы пытались спроектировать архитектуру таким образом, чтобы эту функцию можно было добавить, не изменяя общее устройство системы.

Основой физически корректного рендеринга являются законы физики и их математическая формулировка. Система *rbgt* была разработана с использованием адекватных физических единиц и понятий для вычисляемых величин и алгоритмов, которые она реализует. Она стремится визуализировать *физически корректные* изображения, которые точно отображают освещение, каким оно было бы в реальном воплощении сцены².

² Конечно, любое компьютерное моделирование физики требует тщательного выбора приближений, которые сочетают требования точности с вычислительной эффективностью. См. раздел 1.2 для дальнейшего обсуждения выбора, сделанного в *rbgt*. – *Прим. авт.*

Одним из преимуществ решения использовать физическую основу является то, что она дает конкретный стандарт корректности программы: если для простых сцен, где результат может быть вычислен в общем виде, `rbgt` не представляет тот же результат, мы знаем, что в разработке есть ошибка. Точно так же если разные основанные на физике алгоритмы освещения в `rbgt` дают разные результаты для одной и той же сцены или если `rbgt` не дает таких же результатов, как другой основанный на законах физики визуализатор, то в одном из них определенно есть ошибка. Наконец, мы считаем, что этот физически обоснованный метод рендеринга является ценным, потому что он строгий. Когда не ясно, как следует выполнять то или иное вычисление, физика дает ответ, гарантирующий адекватный результат.

Эффективности уделялось меньше внимания, чем этим трем целям. Поскольку системам рендеринга часто требуются многие минуты или даже часы для рендеринга изображения, очевидно, что эффективность важна. Однако мы в основном ограничивались *алгоритмической* эффективностью, а не низкоуровневой оптимизацией кода. В некоторых случаях очевидные микрооптимизации уступают место чистому, хорошо организованному коду, и мы приложили усилия для оптимизации частей системы, в которых происходит большая часть вычислений.

В ходе представления `rbgt` и обсуждения его реализации мы надеемся поделить некоторые трудными уроками, усвоенными за годы исследований и разработок в области рендеринга. Написание хорошего средства рендеринга – это нечто большее, чем составление набора быстрых алгоритмов; сделать систему одновременно гибкой и надежной – сложная задача. Производительность системы по мере добавления к ней новых геометрических элементов, источников света или любого другого усложнения сцены должна снижаться плавно.

Вознаграждение за разработку системы, которая решает все эти задачи, огромно – написать новый модуль рендеринга или добавить новую функцию в существующий модуль рендеринга и использовать его для создания изображения, которое раньше нельзя было создать, будет огромным удовольствием. Нашей основной целью при написании данной книги было предоставить эту возможность более широкой аудитории. Читателям рекомендуется использовать систему `rbgt` для рендеринга примеров сцен, содержащихся в дистрибутиве `rbgt`, по мере того как они будут продвигаться в освоении материала книги. Упражнения в конце каждой главы предлагают модификации системы, которые помогут прояснить ее внутреннюю работу, и разработку более сложных проектов по расширению системы путем добавления новых функций.

Веб-сайт данной книги находится по адресу pbgt.org. Этот сайт содержит ссылки на исходный код `rbgt`, а также сцены, которые можно загрузить для рендеринга с помощью `rbgt`, средство трассировки багов и перечень ошибок в тексте. О любых ошибках в этом тексте, которые не указаны в данном списке, можно сообщить по адресу электронной почты authors@pbgt.org. Мы очень ценим ваши отзывы!

ИЗМЕНЕНИЯ МЕЖДУ ПЕРВЫМ И ВТОРЫМ ИЗДАНИЯМИ

Между публикацией первого издания этой книги в 2004 г. и второго издания в 2010 г. прошло шесть лет. За это время были проданы тысячи экземпляров книги, а программное обеспечение `rbgt` было загружено с веб-сайта книги тысячи раз. База пользователей `rbgt` дала нам значительное количество отзывов и рекомендаций, и наш опыт работы с системой повлиял на многие решения, которые мы приняли при внесении изменений между версией `rbgt`, представленной в первом издании, и версией второго издания. В дополнение к ряду исправлений багов мы также внесли несколько существенных изменений и улучшений в реализацию системы:

- *удаление архитектуры подключаемых модулей.* В первой версии `rbgt` использовалась архитектура подключаемых модулей среды выполнения для динамической загрузки при описании таких объектов, как формы, источники света, интеграторы, камеры и другие объекты, которые использовались в сцене, визуализируемой в данный момент. Такой метод позволял пользователям расширять `rbgt` новыми

типами объектов (например, новыми примитивами формы) без перекомпиляции всей системы рендеринга. Этот метод изначально казался элегантным, но он усложнял задачу поддержки `rbgt` на нескольких платформах и усложнял отладку. Единственный новый сценарий использования, который он действительно позволял (только бинарные дистрибутивы `rbgt` или бинарные плагины), на самом деле противоречил нашим педагогическим целям и целям открытого исходного кода. Поэтому в этом издании архитектура плагинов была исключена;

- *удаление конвейера обработки изображений.* В первой версии `rbgt` был интерфейс маппинга, который преобразовывал выходные изображения высокого динамического диапазона (HDR) с плавающей запятой непосредственно в TIFF с низким динамическим диапазоном отображения. Эта функциональность имела смысл в 2004 г., поскольку HDR-изображения еще были редкостью. Однако в 2010 г. достижения в области цифровой фотографии сделали HDR-изображения обычным явлением. Хотя теория и практика тонального маппинга элегантны и заслуживают изучения, мы решили сфокусировать новую книгу исключительно на процессе формирования изображений и пропустить тему его отображения. Заинтересованные читатели могут обратиться к книге, написанной Рейнхардом с соавт. (2010), про современную точную технологию обработки рендеринга HDR для его отображения;
- *параллелизм задач.* Многоядерные архитектуры стали общераспространенными, и мы посчитали, что `rbgt` не будет актуальна без возможности расширения процесса рендеринга на все локально доступные ядра. Мы также надеялись, что детали реализации параллельного программирования, описанные в этой книге, помогут программистам компьютерной графики понять некоторые тонкости и сложности написания масштабируемого параллельного кода;
- *пригодность для «производственного» рендеринга.* Первая версия `rbgt` предназначалась исключительно как педагогический инструмент и трамплин для проведения исследований. Действительно, при подготовке первого издания мы приняли ряд решений, противоречащих его использованию в производственном процессе, таких как ограниченная поддержка фоновое освещения на основе изображений, отсутствие поддержки размытия в движении и ненадежная реализация фотонного маппинга при наличии комплексного освещения. Мы чувствуем, что со значительно улучшенной поддержкой этих функций, а также поддержкой подповерхностного рассеяния и светового переноса Метрополис второе издание `rbgt` стало гораздо более подходящим для рендеринга высококачественных изображений сложных сред.

ИЗМЕНЕНИЯ МЕЖДУ ВТОРЫМ И ТРЕТЬИМ ИЗДАНИЯМИ

По прошествии еще шести лет пришло время обновить и расширить и систему `rbgt`, и книгу. Мы продолжали учиться на опыте читателей и пользователей, чтобы лучше понять, какие темы наиболее важны, дабы их точнее проработать. Кроме того, быстрыми темпами продолжались исследования в области рендеринга; многие части книги должны были быть обновлены, чтобы отразить передовой опыт. Мы внесли значительные улучшения по ряду направлений:

- *двунаправленный световой перенос.* В третьей версии `rbgt` добавлен двунаправленный трассировщик пути, включающий полную поддержку объемного светового переноса и множественный семплинг³ по значимости для взвешивания путей. Совершенно новый интегратор светового переноса Метрополис использовал компоненты двунаправленного трассировщика пути, что позволило реализовать этот алгоритм особенно лаконично;

³ Наряду с «семплингом» также часто применяется термин «выборка», но в контексте данной книги это менее точно соответствует смыслу, так что применяется калька с английского, широко распространенная в профессиональном сообществе. – *Прим. ред.*

- *подповерхностное рассеяние*. Внешний вид многих объектов, особенно кожи и полупрозрачных объектов, – это результат подповерхностного светового переноса. Наша реализация подповерхностного рассеяния во втором издании отражала состояние дел на начало 2000-х; мы тщательно обновили как модели BSSRDF, так и наши алгоритмы подповерхностного светового переноса, чтобы отразить прогресс, достигнутый за десять последующих лет исследований;
- *численно надежные пересечения*. Эффекты ошибки округления чисел с плавающей запятой в вычислениях пересечения геометрических лучей были давней проблемой в рейтрейсинге: они могут привести к небольшим ошибкам, присутствующим по всему изображению. Мы сосредоточились на этой проблеме и получили консервативные (но жесткие) границы данной ошибки, что сделало нашу реализацию более устойчивой к этой проблеме, чем предыдущие системы рендеринга;
- *представление передающих сред*. Мы значительно улучшили способ, каким рассеяние описано и представлено в системе; это позволяет получать более точные результаты с рассеивающими средами сцены. Новая техника семплинга («выборки», «пробы») позволила адекватно отображать гетерогенные среды таким образом, чтобы они были четко интегрированы со всеми другими частями объекта;
- *измеряемые материалы*. В этом издании добавлена новая техника для представления и измерения определенных материалов с использованием разреженной частотно-пространственной базы. Данный метод удобен тем, что позволяет проводить точный семплинг по значимости, что было невозможно при представлении, использовавшемся в предыдущем издании;
- *фотонный маппинг* (метод фотонных карт). Значительным шагом вперед для алгоритмов фотонного маппинга стала разработка переменных, не требующих хранения в памяти всех фотонов. Мы заменили алгоритм фотонного маппинга `rbgt`-реализацией, основанной на стохастическом прогрессивном фотонном маппинге, которая эффективно воспроизводит многие сложные эффекты светового переноса;
- *алгоритмы генерации семплов*. Распределение значений семплов, используемое для цифрового интегрирования в алгоритмы рендеринга, может иметь удивительно большое влияние на качество конечного результата (картинки). Мы тщательно обновили методику этой темы, охватив новые и эффективные методы реализации более подробно, чем раньше.

Многие другие части системы были улучшены и обновлены, чтобы отразить прогресс в соответствующих областях: модели микрофасеточного отражения были проработаны более глубоко, с гораздо лучшей техникой семплинга; добавлена новая форма «*curve*» («кривая») для моделирования волос и другой тонкой геометрии; стала доступной новая модель камеры, которая имитирует объективы реальных производителей оптического оборудования. На протяжении всей книги мы внесли множество небольших изменений, чтобы более четко объяснить и проиллюстрировать главные концепции физически корректных систем рендеринга, таких как `rbgt`.

ИЗМЕНЕНИЯ МЕЖДУ ТРЕТЬИМ И ЧЕТВЕРТЫМ ИЗДАНИЯМИ

Инновации в алгоритмах рендеринга не демонстрируют признаков замедления, поэтому в 2019 году мы начали целенаправленную работу над четвертым изданием книги. Мало того, что почти каждая глава содержит существенные дополнения, мы также изменили порядок представленных глав и идей, выдвинув интегрирование методом Монте-Карло и основные идеи трассировки пути на передний план, переместив их из конца оглавления.

Возможности системы, которые претерпели действительно значительные улучшения, включают:

- *объемное рассеяние*. Мы обновили алгоритмы, которые моделируют рассеяние сред, до современного состояния, добавив поддержку излучающих объемов, эф-

- фективный семплинг объемов с различной плотностью и надежную поддержку хроматических сред, где характер рассеяния зависит от длины волны;
- *спектральный рендеринг*. Мы исключили любое использование цветов RGB для вычислений освещения; `rgb_t` теперь выполняет их исключительно для семплинга спектральных распределений интенсивностей по длине волны. Этот метод не только более физически точен, но и позволяет `rgb_t` точно моделировать такие эффекты, как дисперсия;
 - *модели отражения*. Наше описание основ BSDF и моделей отражения было значительно пересмотрено, и мы расширили диапазон рассматриваемых функций BSDF, включив в него одну, которая точно моделирует отражение от волос, и другую, которая моделирует рассеяние от слоистых материалов. Измеренное значение BRDF следует новому методу, который охватывает широкий набор спектров отражения материалов;
 - *семплинг источников света*. Мы не только улучшили алгоритмы семплинга точек для отдельных источников света, чтобы лучше отражать современное состояние разработок, но эта редакция также содержит поддержку семплинга множественных источников света, что позволяет эффективно визуализировать сцены с тысячами или миллионами источников света, тщательно семплируя лишь некоторые из них;
 - *рендеринг на GPU*. В этой версии `rgb_t` добавлена поддержка рендеринга на GPU (графическом процессоре), который обеспечивает в 10–100 раз более высокую производительность рендеринга, чем CPU. Мы реализовали эту возможность таким образом, что почти весь код, представленный в книге, работает как на центральных процессорах, так и на графических, что позволило перенести обсуждение вопросов, связанных с графическими процессорами, в главу 15.

Система претерпела множество других улучшений и дополнений, в том числе новую билинейчатую форму поверхности (патча), множество обновлений алгоритмов генерации семплов, самой сердцевины интегрирования Монте-Карло, поддержку вывода вспомогательной информации в каждом пикселе о видимой геометрии поверхности и параметрах отражения, а также множество других мелких улучшений системы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Пэт Ханрахан внес в эту книгу больший вклад, чем мы могли надеяться; мы в огромном долгу перед ним. Он неустанно выступал за ясные интерфейсы и поиск правильных абстракций для использования во всей системе, и его понимание и метод рендеринга глубоко повлияли на ее разработку. Его готовность использовать `rgb_t` и эту рукопись в своем курсе рендеринга в Стэнфорде была чрезвычайно полезна, особенно в первые годы, когда она была еще в грубой форме; обратная связь с ним на протяжении всего этого процесса имела решающее значение для приведения текста в его нынешнее состояние. Наконец, группа людей, которую Пэт помог собрать в Стэнфордской графической лаборатории, и созданная им открытая среда общения создали захватывающую, стимулирующую и плодотворную обстановку. Мэтт и Грег чувствуют себя там очень комфортно.

Мы в долгу перед многими студентами, которые использовали ранние варианты этой книги на курсах в Стэнфорде и Университете Вирджинии в период с 1999 по 2004 г. Эти студенты предоставили огромное количество отзывов о книге и `rgb_t`. Особого упоминания заслуживают ассистенты преподавателей этих курсов: Тим Перселл, Майк Каммарано, Ян Бак и Рен Нг в Стэнфорде и Нолан Гуднайт в Вирджинии. Несколько студентов в этих классах дали особенно ценные отзывы и прислали отчеты об ошибках и исправления ошибок; мы особенно хотели бы поблагодарить Эвана Паркера и Фила Битти. Черновик рукописи этой книги использовался на занятиях, которые вели Билл Марк и Дон Фассел в Техасском университете в Остине и Рагу Мачираджу в Университете штата Огайо; их отзывы были бесценны, и мы благодарны им за предприимчивость при включении этой системы в свои курсы, даже когда она еще редактировалась и пересматривалась.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru