



Спецкурс ОСФИ

Лекция 6

30 марта 2011

Изображения широкого динамического диапазона

Алексей Игнатенко, к.ф.-м.н.

Лаборатория компьютерной графики и
мультимедиа ВМК МГУ

На лекции

- Введение. Зачем нужны изображения широкого диапазона (ИШД) и что это такое
- Получение ИШД-изображений
- Кодирование ИШД-изображений
- Преобразование ИШД -> ИНД
 - Tone mapping
- Применение ИШД для освещения

На лекции

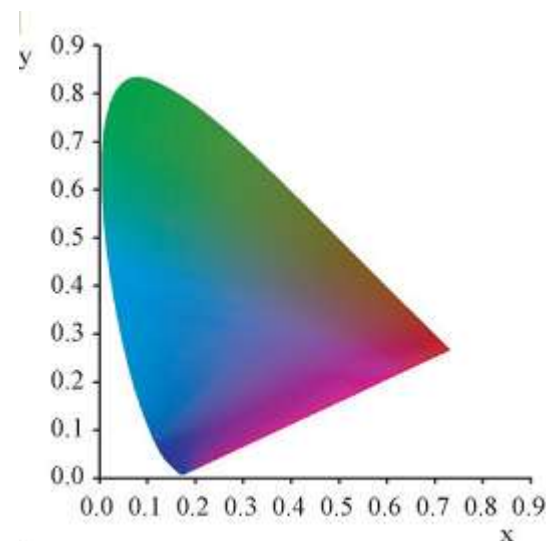
- Введение. Зачем нужны изображения широкого диапазона (ИШД) и что это такое
- Получение ИШД-изображений
- Кодирование ИШД-изображений
- Преобразование ИШД -> ИНД
 - Tone mapping
- Применение ИШД для освещения

Дискретизация изображения

- Достаточно ли типичных параметров дискретизации изображения?

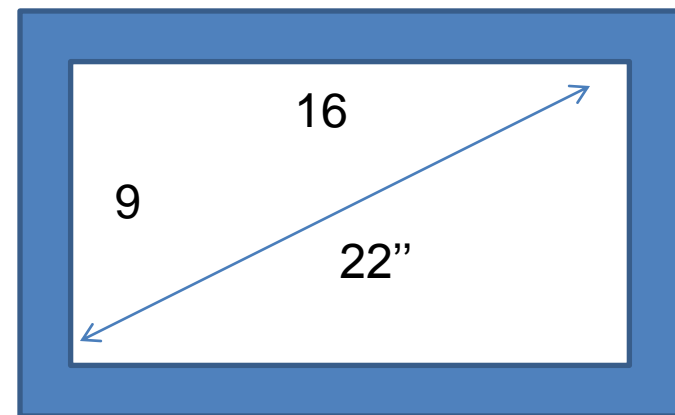
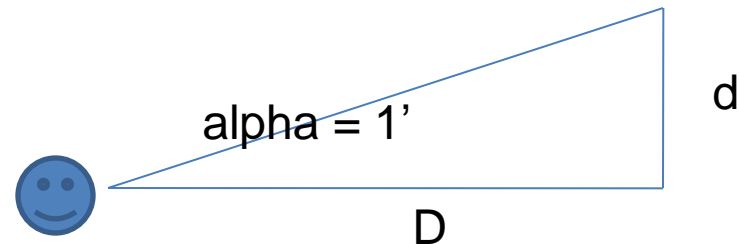


- Разрешение
- Цвет
- Яркость



Дискретизация изображения: разрешение

- Считается, что разрешение зоркого глаза – 1 угловая минута ($1 / 60$ градуса)
- На расстоянии 1м человек может различить квадратики размером $\text{tg}(1/60)\text{м} \sim 0,3\text{мм}$
- Какое разрешение должно быть у монитора 16х9 диагональю 22'', чтобы человек не различал пиксели?
- Размер экрана $\sim 50 \times 30\text{см}$.
- Размер пикселя: 1666х1000
- Вполне по силам современным дисплеям!



Дискретизация изображения:

разрешение: цвет

- Цвет характеризуется:
 - Тон
 - Насыщенностью
 - Светлотой
- Что можно сказать про тон и насыщенность?
- В разных источниках – разные данные!
- Можно считать, что около 150 оттенков тона + 25 по насыщенности можно различить
 - В.В.Мешков и А.Б.Матвеев "Основы светотехники" (М., Энергоатомиздат, 1989)
 - "Физическая энциклопедия" под ред. А.М.Прохорова в 5 томе (М., Большая Российская энциклопедия", 1998)
- Грубо: несколько тысяч цветов, не считая светлоты (яркости).
- В модели RGB нормируем значение цвета $R+G+B=1$. Получается $255*255 = 65025$ оттенков.
- 8 бит на канал достаточно для кодирования цвета!

Дискретизация изображения:

разрешение: яркость

- Человеческий глаз в состоянии адаптироваться к освещению в пределах 10-ти порядков изменения яркости!
- При этом одновременно (сцена) до 5-ти порядков изменения яркости
- Мониторы – макс. 2 порядка
 - Поэтому для обычных мониторов 8 бит вполне хватает
- Но этого не хватает для описания динамического диапазона яркостей

Что такое динамический диапазон?

- Отношение между минимальным и максимальным значением возможных значений некоторой измеряемой величины
- Минимум часто определяется минимальным различимым значением, шумом, помехами и т.п.
- Часто применяются для различных систем, динамика определяется сигналом во времени
- Измеряется как
 - Отношение
 - Двоичный логарифм отношения (стопы)
 - Яркость, часто в фотографии
 - Десятичный логарифм отношения (децибеллы)
 - Звук

Примеры статического и динамического диапазона

- Человеческий глаз в состоянии адаптироваться к освещению в пределах 10-ти порядков изменения яркости! = **динамический диапазон**
- При этом одновременно (сцена) до 5-ти порядков изменения яркости = **статический диапазон**
- Мониторы – макс. 2 порядка = **статический диапазон**
- Технология dynamic contrast = **динамический диапазон**

Статический и динамический контраст

- Контраст (монитора) – отношение максимальной и минимальной яркости
- Динамический контраст – в разное время
- Статический контраст – одновременно

Типичные яркости излучения

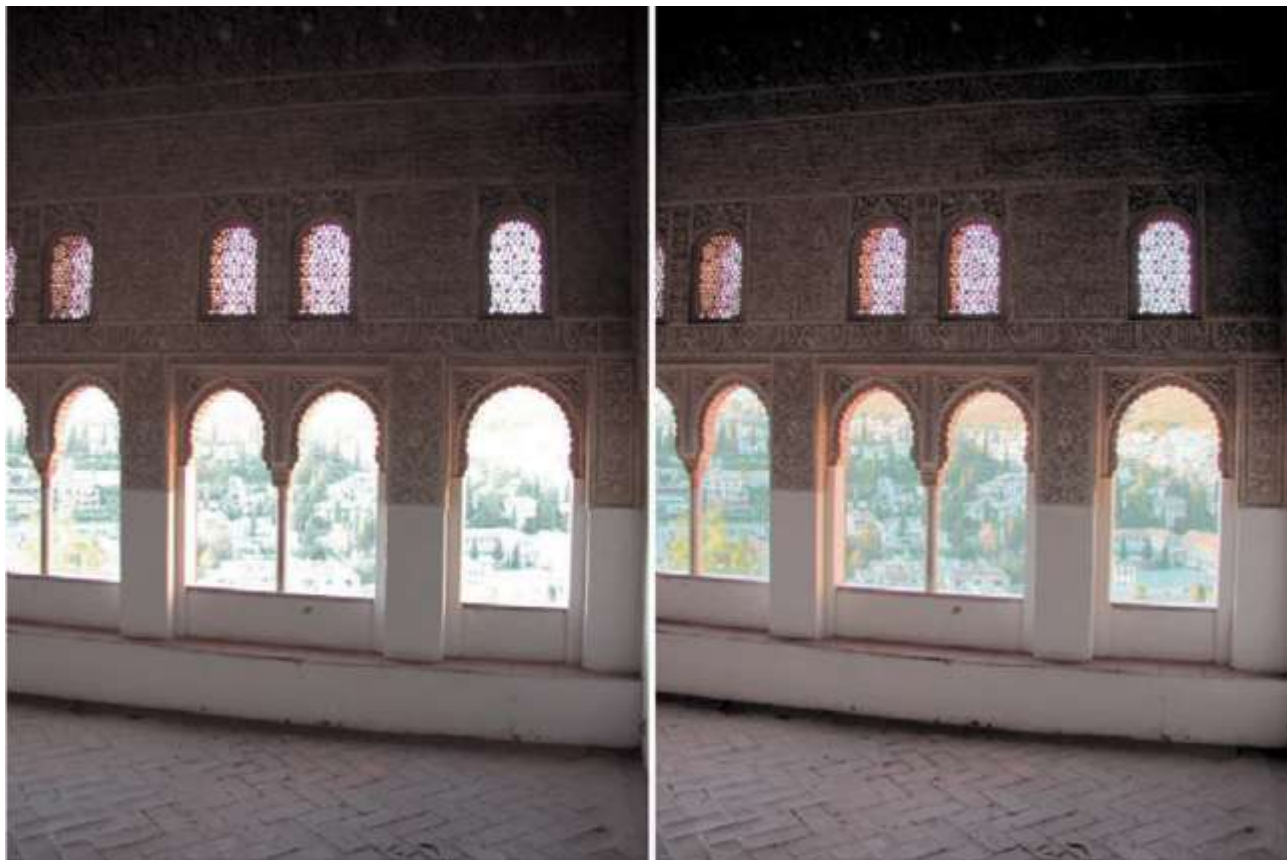
Фон	Яркость ($\text{cd} * \text{m}^{-2}$)
Ночное небо (без луны)	0.00001
Ночное небо (луна)	0.001
Ясный день	1000
Ясный день (солнце)	10000
Макс. стат. яркость обычного монитора (CRT, LCD)	1000

Этого не хватает для описания динамического диапазона яркостей

Изображения широкого диапазона

- Изображения с глубиной цвета более 8 бит называются Изображениями Широкого (Динамического) Диапазона
 - HDR – High Dynamic Range Images
- Обычные 8бит изображения = Изображения Узкого (Динамического) Диапазона
 - LDR – Low Dynamic Range Images
- Задачи, связанные с ИШД:
 - Получение ИШД
 - Хранение ИШД
 - Визуализация ИШД

ИУД vs ИШД



ИУД vs ИШД



ИУД vs ИШД



На лекции

- Введение. Зачем нужны изображения широкого диапазона (ИШД) и что это такое
- Получение ИШД-изображений
- Кодирование ИШД-изображений
- Преобразование ИШД -> ИНД
 - Tone mapping
- Применение ИШД для освещения

Способы получения ИШД

Синтез изображений

- Результат работы алгоритмов визуализации
- Основная задача – визуализация на обычном мониторе

Комбинирование ИНД с разными выдержками

- Получение ИШД с помощью обычных бытовых фотокамер

Аппаратура камер, прямое получение ИШД-данных

- Требуется специальная аппаратура (дорогая)
- Очень перспективный путь

Получение ИШД из набора фотографий с разными выдержками



Получение ИШД из набора фотографий с разными выдержками

- Предполагаем, что отклик сенсоров камеры линейный по отношению к яркости излучения, попадающей на сенсоры
- $T_1=1\text{сек}$ $T_2=2\text{сек}$, рассмотрим пиксель P_{ij}
- $\Rightarrow P_{ij2} = 2 * P_{ij1}$
 - Необходимо знание экспозиции для каждой фотографии
- $I_1 = P_{ij1} / T_1$
- $I_2 = P_{ij2} / T_2$
- В идеале $I_1 = I_2$ для P внутри передаваемого диапазона

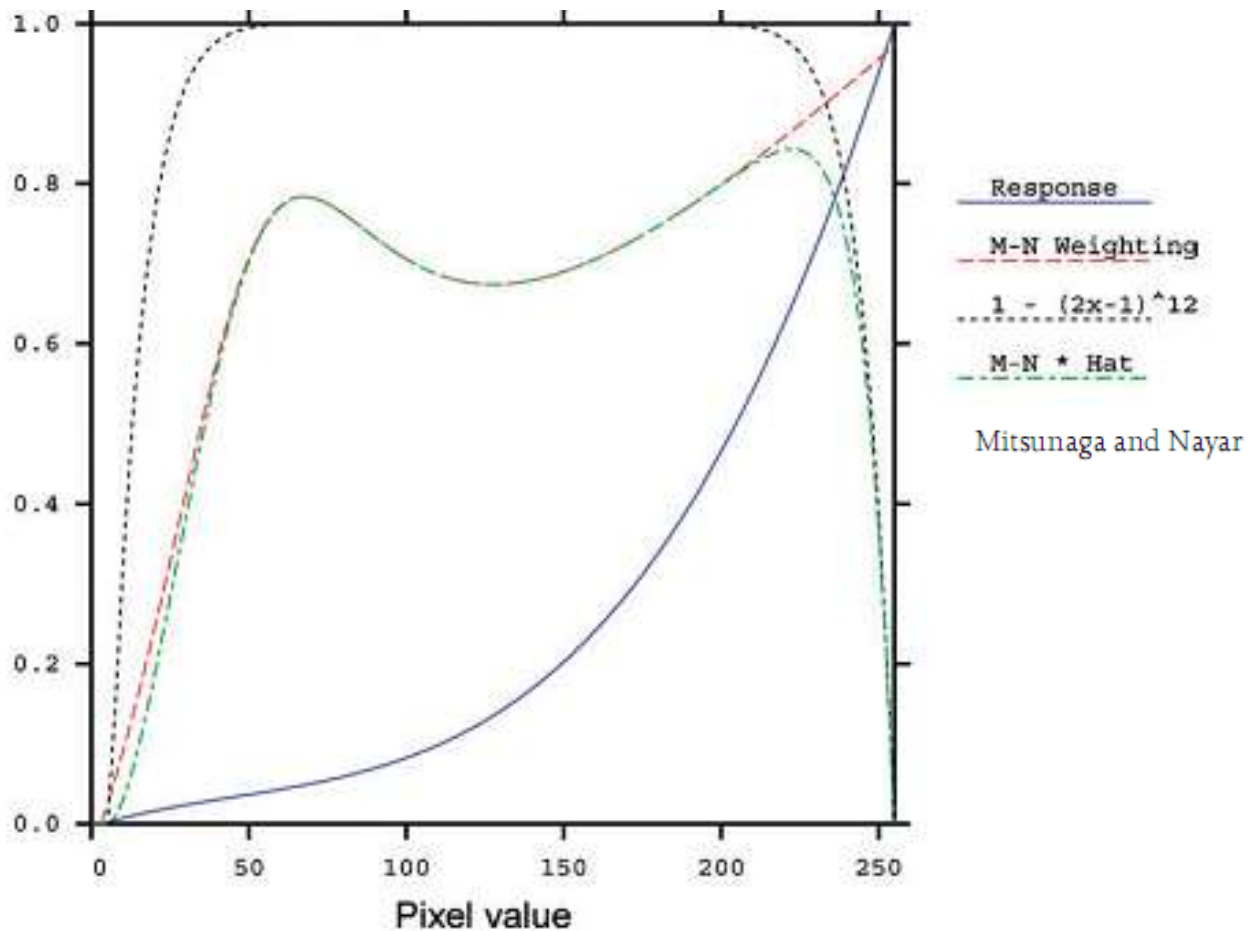
Общий алгоритм построения ИШД из набора фотографий

- 1) для каждой фотографии делаем гамма-коррекцию
 - В общем случае — линеаризация отклика камеры
- 2) приводим яркости всех пикселей в единое пространство (нормализуем)
- 3) результат — усреднение пикселей

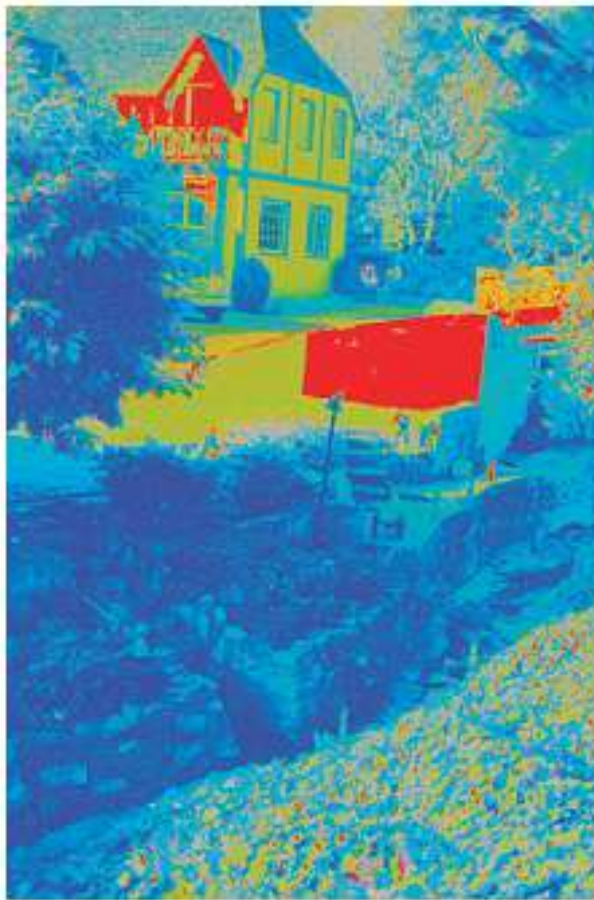
Как усреднять пиксели?

- 0 и 255 – выбросить
- Остальные нужно смешать
- Желательно взять с бОльшим весом те пиксели, яркость которых соответствует диапазону наиболее хорошо передаваемых пикселей

Некоторые возможные функции смешивания



Результат



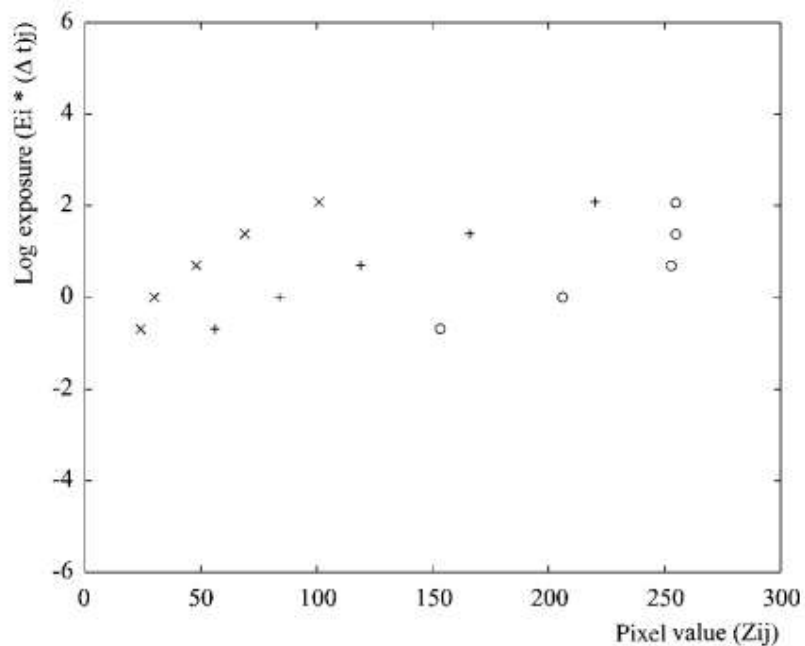
Чего не хватает?

- Кривая отклика камеры может не быть известна
 - Нужно уметь восстанавливать из изображений
- Изображения с разными выдержками могут совпадать не полностью
 - Сдвиг/поворот изображения
 - Двоение изображения (ghosting) – из-за движения в кадре между моментами съемки и во время съемки
 - Ореолы вокруг источников света

Восстановление кривой отклика камеры из изображений

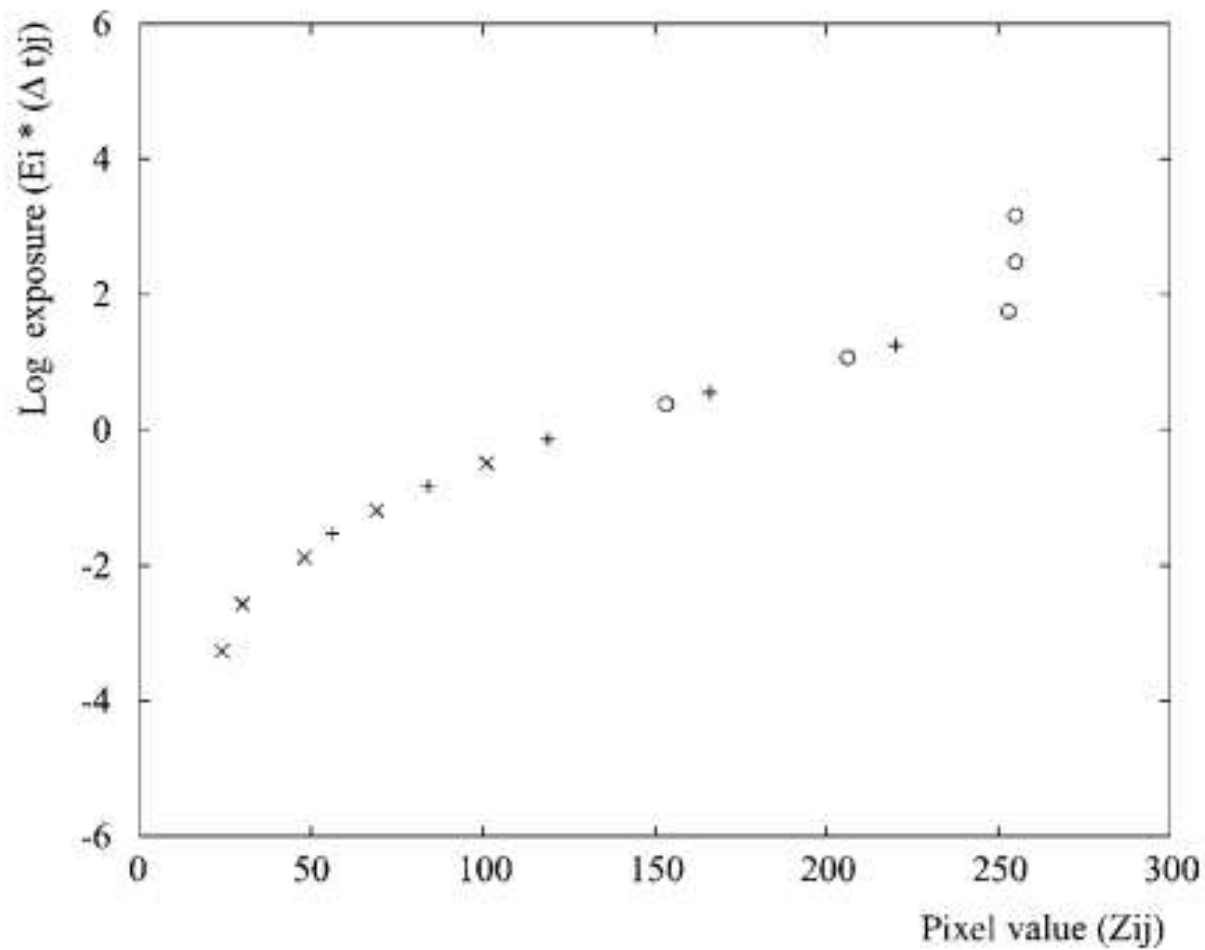
- Можно полагаться на sRGB и считать гамму 2.2 кривой отклика камеры.
- Это наивно т.к. каждый производитель вносит изменения в кривую:
 - Скрывая шум
 - Увеличивая насыщенность
 - Увеличивая контраст
- Основная идея – каждый пиксель статической картинки с разными экспозициями представляет собой набор выборок кривой отклика камеры

Пример



- 3 пикселя
- Пять экспозиций
- Находим гладкую кривую
- Линейная оптимизация среднеквадратичной ошибки

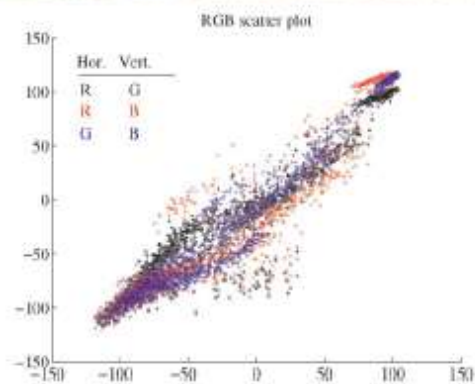
Результат



На лекции

- Введение. Зачем нужны изображения широкого диапазона (ИШД) и что это такое
- Получение ИШД-изображений
- Кодирование ИШД-изображений
- Преобразование ИШД -> ИНД
 - Tone mapping
- Применение ИШД для освещения

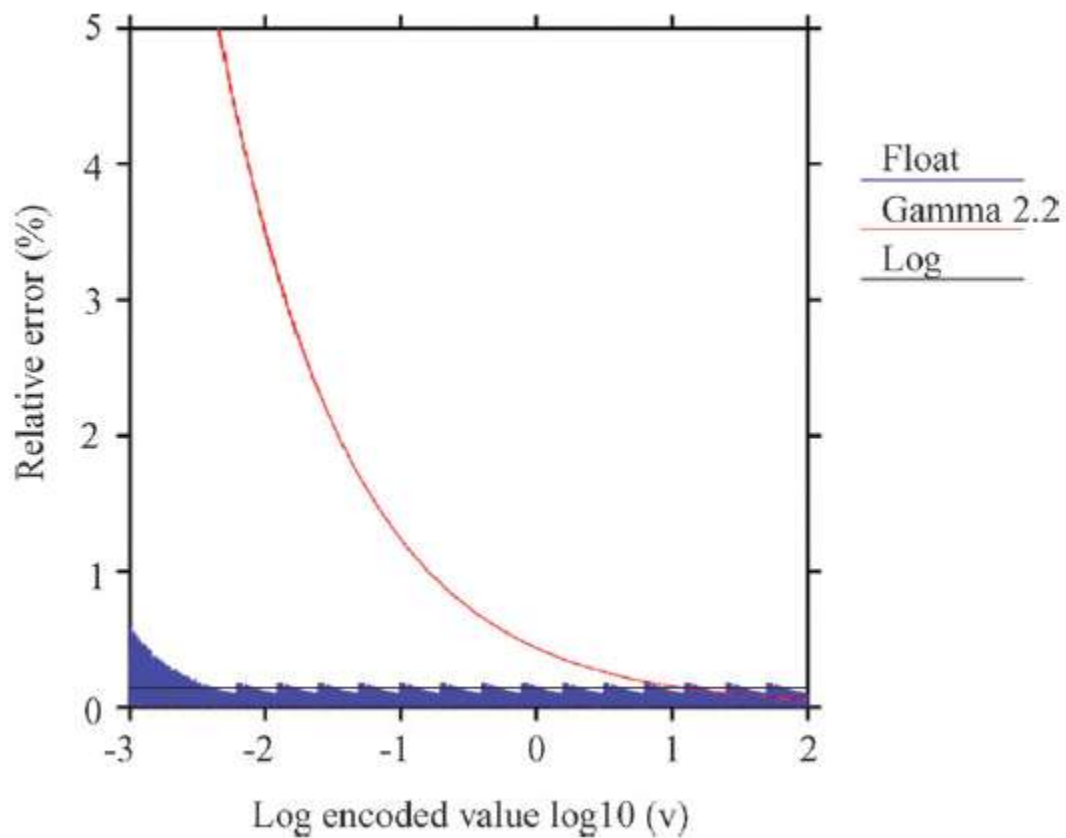
Зависимость яркости и цвета



Кодирование яркости

- Гамма-кодирование (степенное) $I' = I^{\gamma}$
- Логарифмическое кодирование $I' = k^I$
- Мантисса-экспонента (плавающая точка)

Сравнение относительных ошибок



Формат HDR (PIC)

- Появился как часть программного пакета Radiance (1989)
- Самый простой и часто используемый формат
 - Де-факто: Аналог BMP для ИШД

Формат HDR: Кодирование



$$E = \lceil \log_2 (\max (R_W, G_W, B_W)) + 128 \rceil$$

$$R_M = \left\lfloor \frac{256 R_W}{2^{E-128}} \right\rfloor$$

$$G_M = \left\lfloor \frac{256 G_W}{2^{E-128}} \right\rfloor$$

$$B_M = \left\lfloor \frac{256 B_W}{2^{E-128}} \right\rfloor$$

$$R_W = \frac{R_M + 0.5}{256} 2^{E-128}$$



$$G_W = \frac{G_M + 0.5}{256} 2^{E-128}$$

$$B_W = \frac{B_M + 0.5}{256} 2^{E-128}$$

Формат HDR: Сжатие

- Поддерживается RLE
- ~25% сжатие (1:1.3)
- Размер как у 24бит BMP

Формат TIFF

- Tagged Image Format – один из очень старых форматов
- 32-бит на компоненту IEEE-floating point RGB
 - 96 бит на пиксель
-  Сжатие без потерь
 - Идеально для сохранения каких-либо floating-point буферов и т.п.
-  В три раза больше размер файлов, чем формат HDR.

Формат TIFF: LogLuv кодирование

- Идея – преобразовать в тройку: яркость + тон и квантовать яркость
- XYZ -> Luv

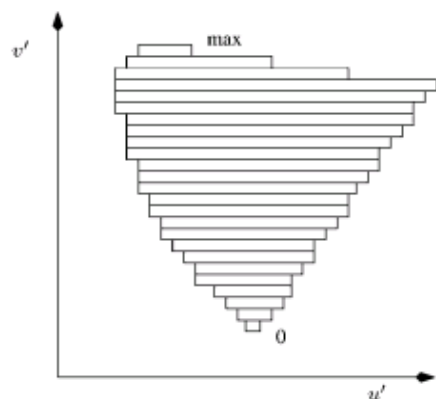
Формат TIFF: LogLuv кодирование

$$L_{15} = \lfloor 256 (\log_2 Y_W + 64) \rfloor$$

$$L_{10} = \lfloor 64 (\log_2 Y_W + 12) \rfloor$$

$$Y_W = 2^{\frac{L_{15} + 0.5}{256} - 64}$$

$$Y_W = 2^{\frac{L_{10} + 0.5}{64} - 12}$$

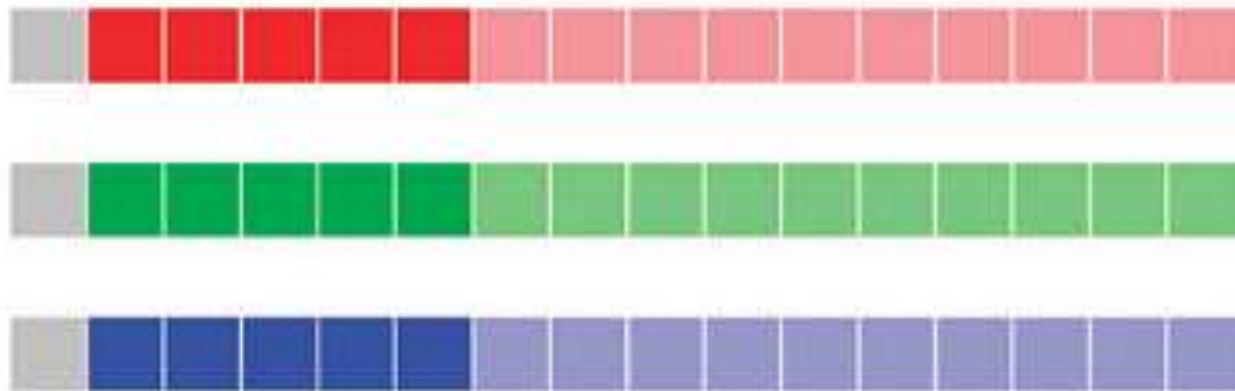


Формат OpenEXR

- 2002 Industrial Light and Magic
 - C++ библиотека (openexr.com)
- Разные форматы поддерживаются
 - 16-бит на канал
 - 24-бит на канал
 - 32-бит на канал

Формат OpenEXR: 16 бит кодирование


$$h = \begin{cases} (-1)^S 2^{E-15} \left(1 + \frac{M}{1024}\right) & 1 \leq E \leq 30 \\ (-1)^S 2^{-14} \frac{M}{1024} & E = 30 \end{cases}$$



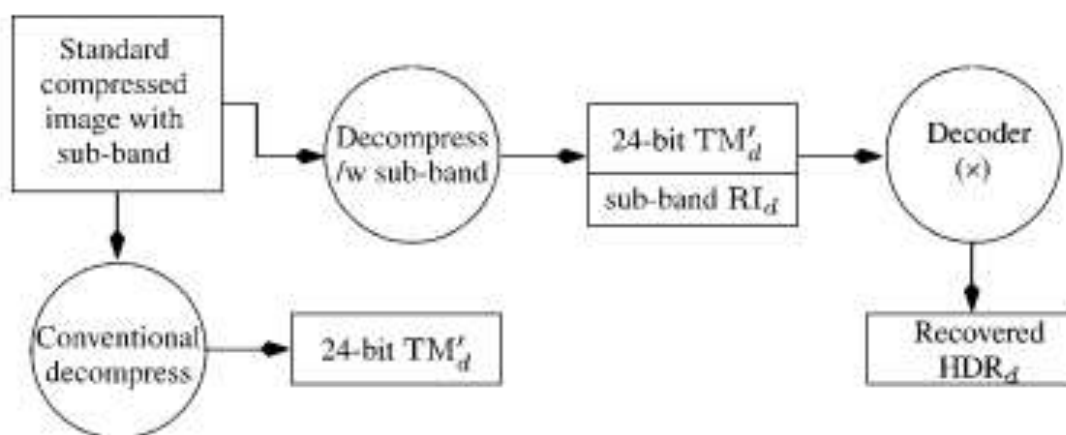
Sign Exponent

Mantissa

Формат OpenEXR: 16 бит кодирование

- Представляемые значения: 0,000061-65,504
- ~9 порядков (включая числа меньше 0,000061)
-  Шаг квантования <0,1%
 - Очень маленькая ошибка! Сравните: у HDR 1%
- Гибкий формат:
 - Сжатие (ZIP, PIZ)
 - PIZ – формат сжатия на основе вейвлетов
 - Произвольные каналы данных
 - Прозрачность и т.п.
 - Атрибуты и т.п.

Другие форматы. Сжатие HDR с потерями



Форматы хранения HDR-изображений

Format	Encoding(s)	Compression	Metadata	Support/Licensing
HDR	RGBE	Run-length	Calibration, color space,	Open source software (<i>Radiance</i>)
	XYZE	Run-length	+user-defined	Quick implementation
TIFF	IEEE RGB	None	Calibration, color space,	Public domain library (<i>libtiff</i>)
	LogLuv24	None	+registered, +user-defined	
	LogLuv32	Run-length		
EXR	Half RGB	Wavelet, ZIP	Calibration, color space, +windowing, +user-defined	Open source library (<i>OpenEXR</i>)

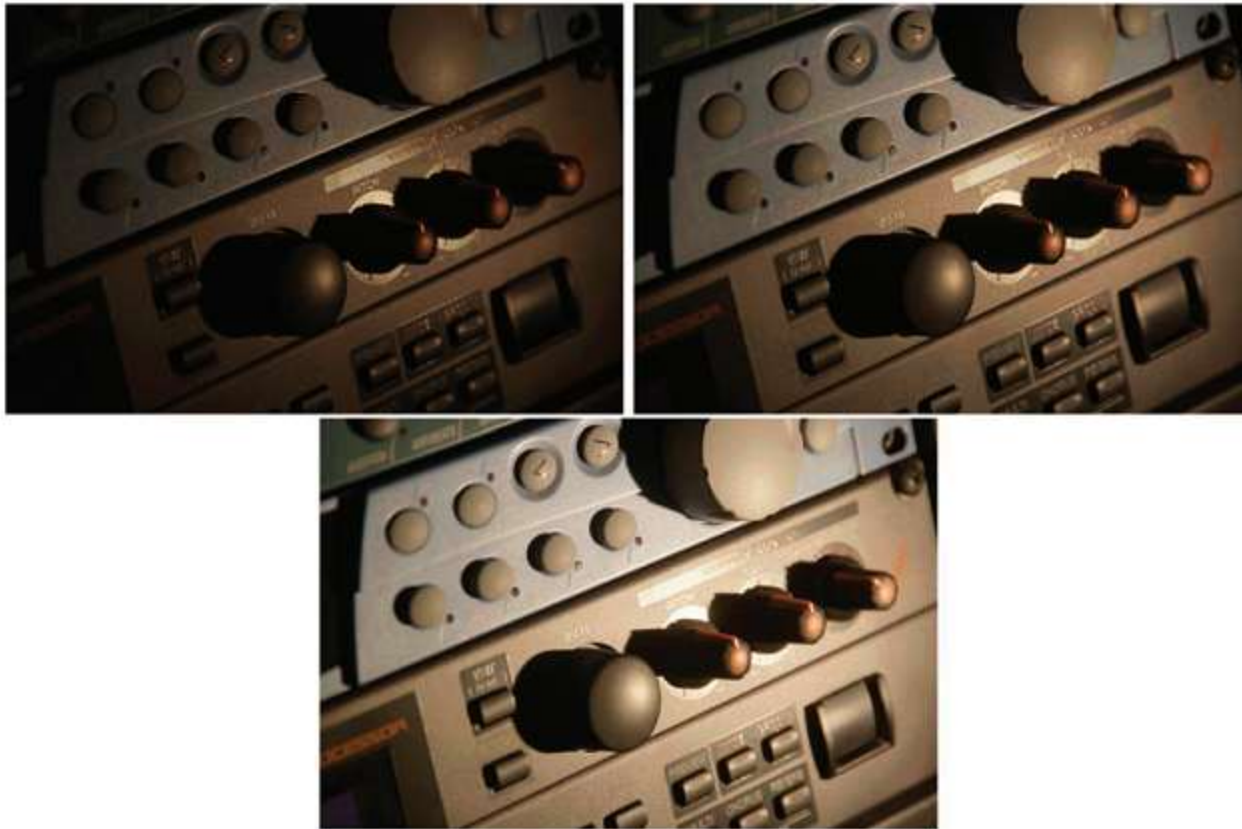
На лекции

- Введение. Зачем нужны изображения широкого диапазона (ИШД) и что это такое
- Получение ИШД-изображений
- Кодирование ИШД-изображений
- Преобразование ИШД -> ИНД
 - Tone mapping
- Применение ИШД для освещения

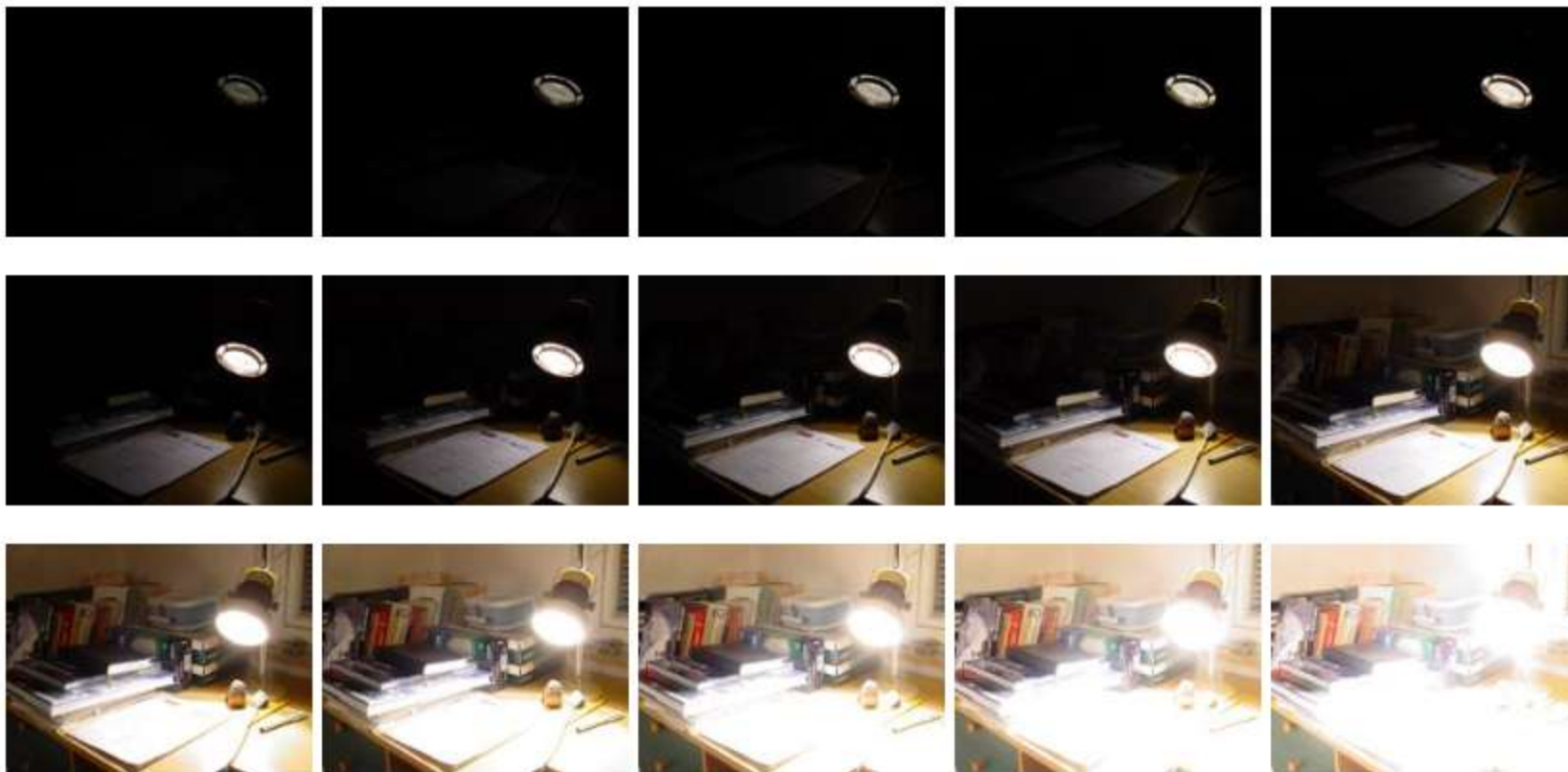
Преобразование ИШД->ИНД

- Глобальные операторы
 - Идентичная нелинейная кривая сжатия для всех пикселей изображения
 - Adaptive Logarithmic Mapping for Displaying High Contrast Scenes
- Локальные операторы
 - Модуляция кривой для каждого пикселя и его окружения
 - Photographic Tone Reproduction for Digital Images
- Частотные операторы
 - Работают в частотной области
 - Fast Bilateral Filtering for the Display of High-Dynamic-Range Images
- Градиентные операторы
 - Работают с производной изображения
 - Gradient Domain High Dynamic Range Compression



Проблемы нормировки изображений



Тестовое изображение



Глобальные операторы

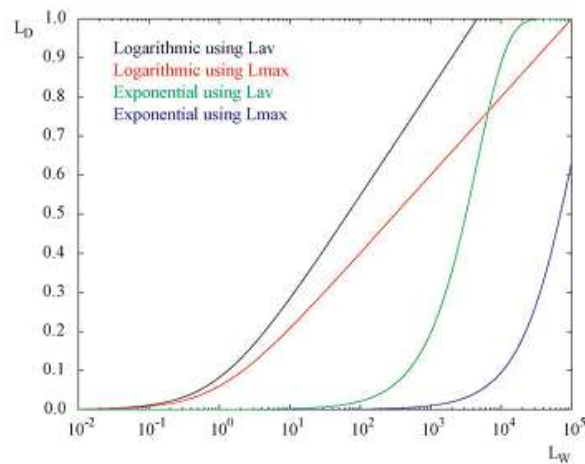
- Идентичная нелинейная кривая сжатия для всех пикселей изображения
- Высокая эффективность
- Проблемы с очень широким диапазоном
 -  Т.е. функция должна быть монотонно возрастающей
 -  Чем больше диапазон, тем больше значений нужно отобразить в 256 значений

Adaptive Logarithmic Mapping for Displaying High Contrast Scenes

Adaptive Logarithmic Mapping for Displaying High Contrast Scenes

F. Drago, K. Myszkowski, T. Annen, and N. Chiba

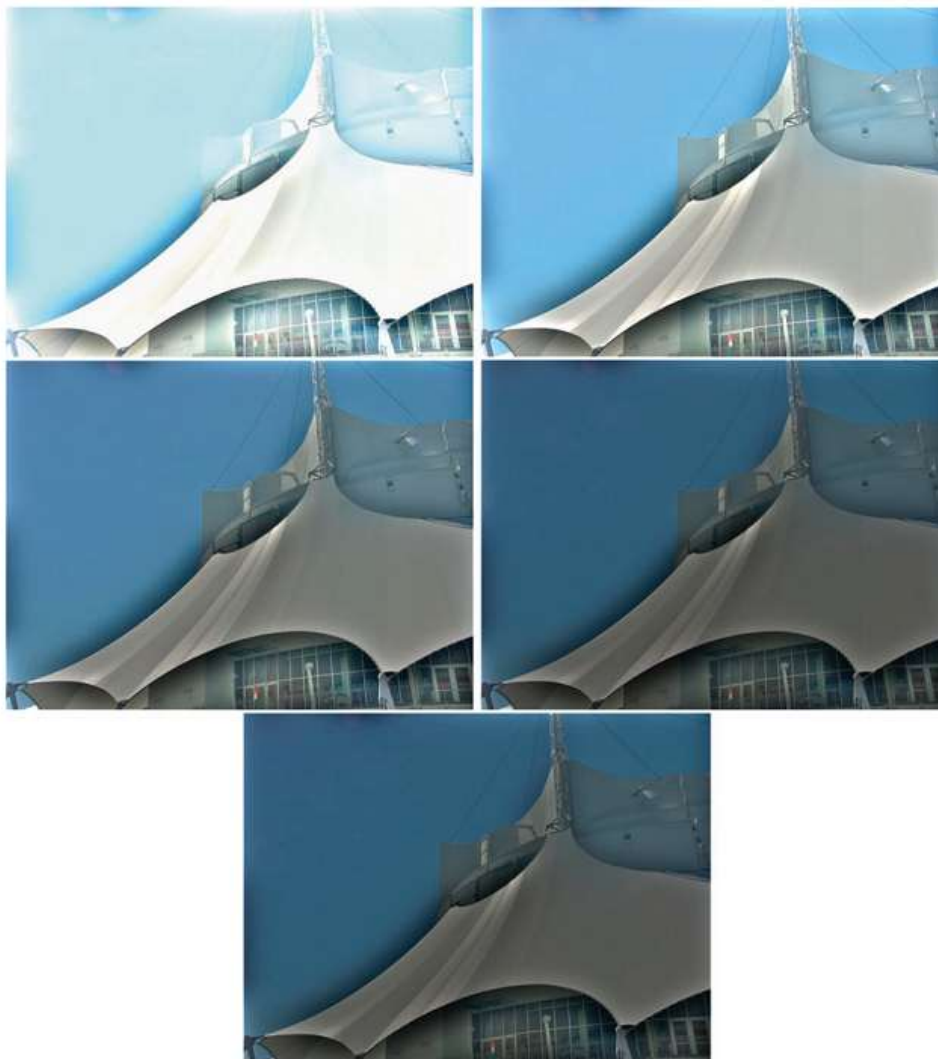
In Eurographics 2003



Общий подход локальных методов. Инвертирование контраста

$$L_d(x, y) = \frac{1}{k L_w^{\text{blur}}(x, y)} L_w(x, y)$$

Влияние коэффициента k



Влияние размера фильтра



Photographic Tone Reproduction for Digital Images

Photographic Tone Reproduction for
Digital Images

E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley, and J.
Ferwerda

In ACM Transactions on Graphics, 2002

Попытка аппроксимации процесса
экспонирования фотографии

1. Линейное экспонирование
2. Селективное высветление /
затемнение участков
фотографии
 1. Для каждого участка
фотографии нужно найти
наибольшую область, не
содержащую контрастных
переходов
 2. Темные пиксели в светлых
областях — затемняются.
 3. Светлые пиксели в темных
областях высветляются



Общий подход градиентных и частотных методов

- Идея 1:
 - Разделение освещенности (illuminance) и отражательности (reflectance)
 - Можно сжимать освещенность
- Идея 2:
 - В областях большой яркости часто большие градиенты
 - Источники света, блики и т.п.
 - Можно дифференцировать картинку и дальше работать в этой области

Пример работы с различными частотами изображения



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

[Fast Bilateral Filtering for the Display of High-Dynamic-Range Images](#)

F. Durand and J. Dorsey

In ACM Transactions on Graphics, 2002



- 2) Применение билатерального фильтра , получили «освещенность» Base
- 3) Деление исходного изображения на «освещенность» $\text{Detail} = \text{Input} / \text{Base}$
- 4) Сжатие диапазона осуществляется за счет деления изображения (Base) до достижения нужного уровня контраста
- 5) Реконструкция изображения и перевод в RGB



Fast Bilateral Filtering for the Display of High-Dynamic-Range Images: Пример



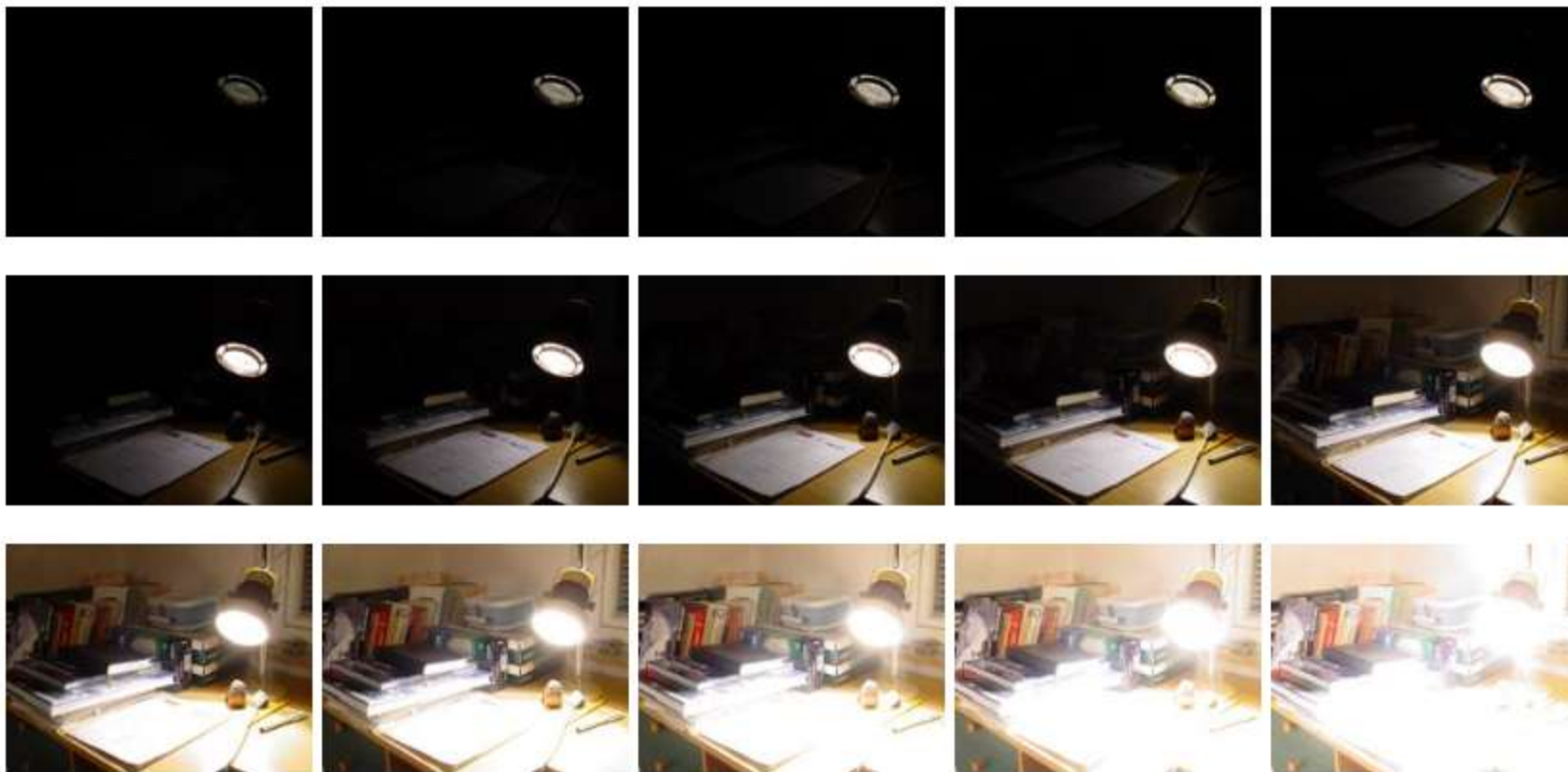
Gradient Domain High Dynamic Range Compression

Gradient Domain High Dynamic Range
Compression

R. Fattal, D. Lischinski, and M. Werman
In ACM Transactions on Graphics, 2002



Еще раз: тестовое изображение



Еще раз: результаты работы разных операторов сжатия диапазона



На лекции

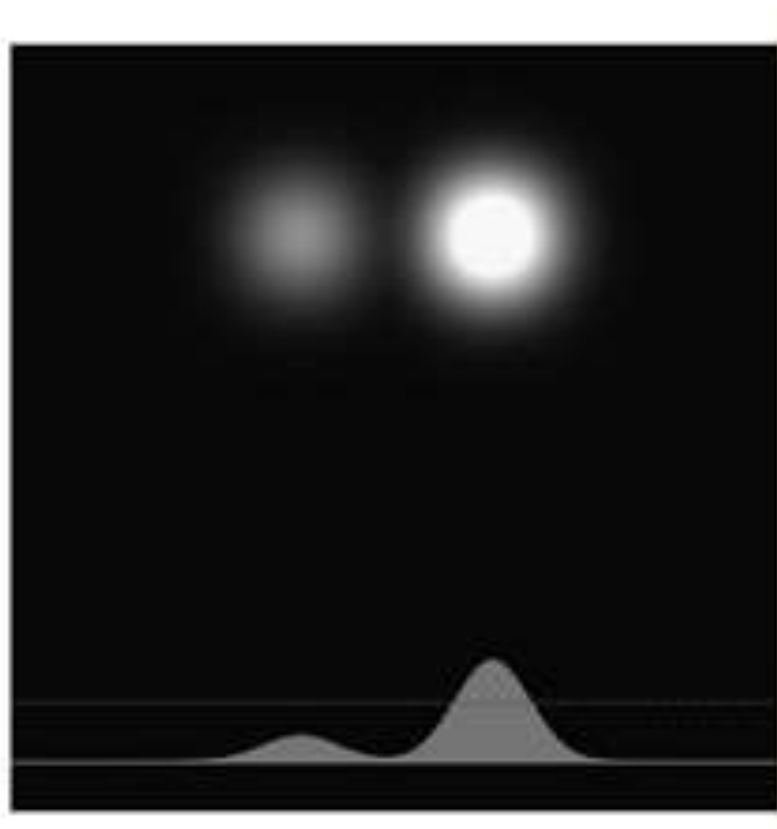
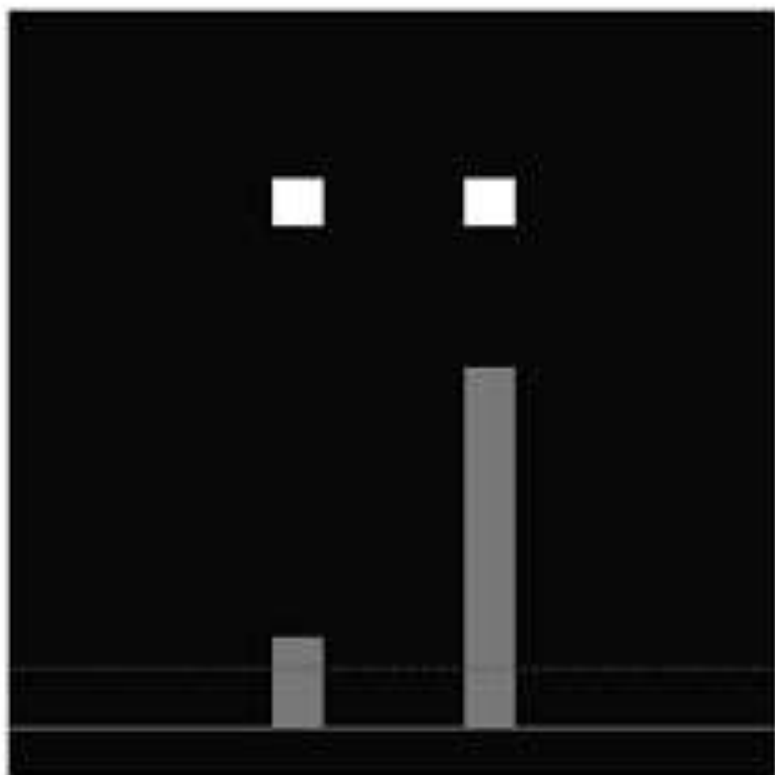
- Введение. Зачем нужны изображения широкого диапазона (ИШД) и что это такое
- Получение ИШД-изображений
- Кодирование ИШД-изображений
- Преобразование ИШД -> ИНД
 - Tone mapping
- Применение ИШД для освещения

Применение HDR в визуализации

- Применение HDR-изображений для освещения
- Применяются различные виды панорам
 - Сферические
 - Цилиндрические
 - Кубические



Размытие ИУД и ИШД



Размытие ИУД и ИШД



(a)



(b)



Сравнение визуализации

Только солнце

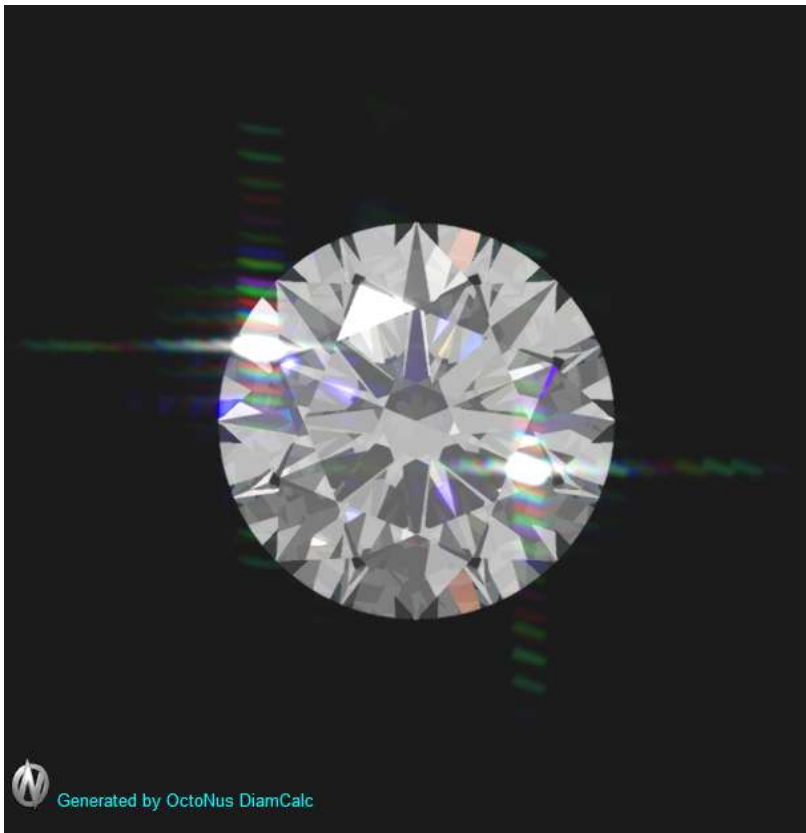


HDR-панорама

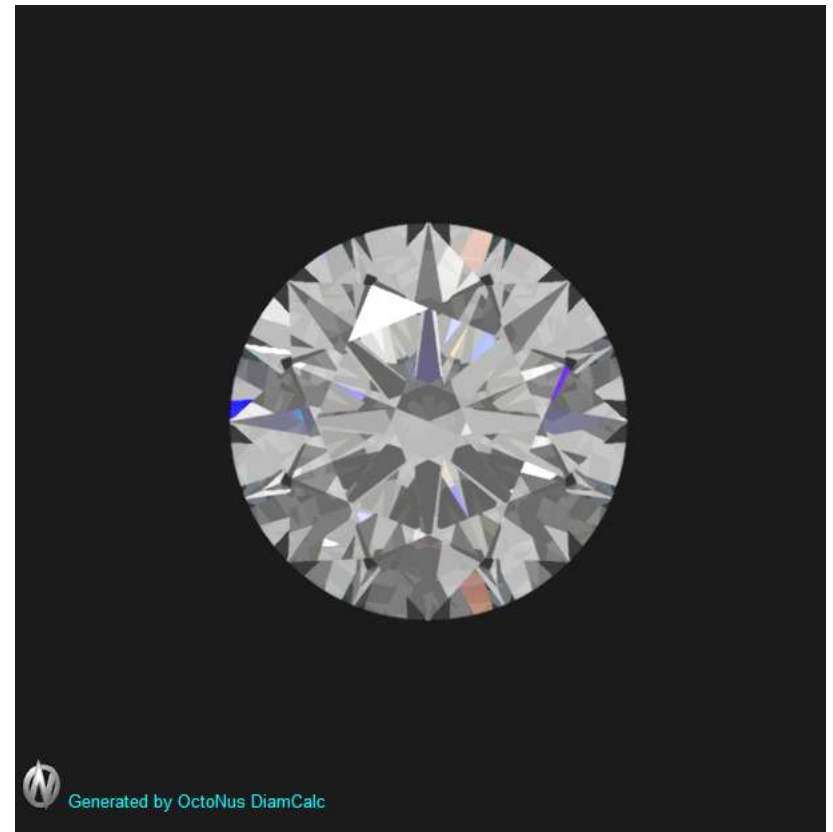


Сравнение визуализации

LDR



HDR



Литература

- **High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting** Erik Reinhard; Greg Ward; Sumanta Pattanaik; Paul Debevec

