

# デジタルメディア処理

担当: 井尻 敬

## ○ 講義の概要:

画像処理は、産業・自然科学・エンタテインメントなど、多種多様な分野の発展に関わる非常に重要な技術です。本講義では、画像処理の基本となる、フィルタ処理・幾何変換・フーリエ変換に関するトピックを紹介します。それぞれの技術に関して、コーディング可能な深さで理解できるよう、ソースコードを交えながら詳細な技術解説を行います。また、講義中に紹介した画像処理技術に関して、Pythonを用いたプログラミング演習を行ないより深い理解を目指します。

## ○ 達成目標:

1. デジタル画像 : デジタル画像の取得方法・データ形式に関する基礎的な用語を正しく利用できる
2. フィルタ処理 : 線形/非線形/周波数フィルタといったフィルタ処理の計算法と効果を説明できる。
3. 幾何変換 : 剛体変換やAffine変換といった画像の幾何学変換を計算でき、その効果を説明できる。
4. 画像圧縮 : 画像圧縮の基本的な仕組みを理解し、その内容を説明できる。
5. プログラミング演習: フィルタ処理など画像処理に関する基礎的なプログラムを作成できる。

## ○ 成績評価:

小テスト(20%), 筆記試験 (40%) , プログラミング演習 (40%) に基づき評価します。

## ○ 講義資料:

講義で利用する資料・ソースコードは可能な限りWeb上に公開します。

<https://takashiiiri.com/classes/>

<https://github.com/Takashiiiri/PythonOpenCVPPractice>

## ○ 実施方法:

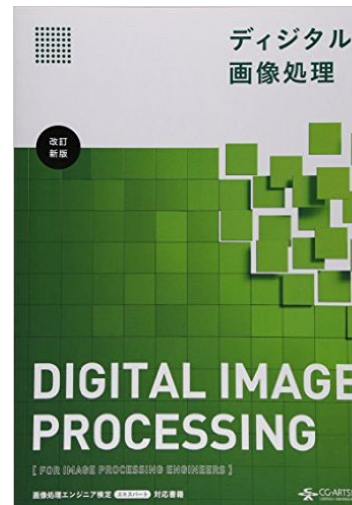
- 前半 8回: 座学
  - 講義室にて対面実施
  - 講義最後の20分に小テストを実施 (scombz利用、持ち込み可)
  - お手洗いなど許可不要、水分補給・飴ガム程度であればご自由に
  - 周りの迷惑になる程度の私語は控えてください
- 9回目に筆記試験を実施 (持ち込み不可)
- 後半5回: 演習
  - PC室にて対面実施
  - 課題は <https://takashiiiri.com/classes/> へアップロード予定
  - あらかじめ自身のPC and/or 大学のPCでpythonを実行できる環境を整えておいてください (資料は上記web pageへ)

## 参考資料

- CG-Arts協会 (画像情報教育進行委員会)
- デジタル画像処理[改訂新版] 大型本

- 日本語で読める画像処理の教科書です
- 画像や例が多く入門者には最適だと思います
- 網羅性が高い反面、説明不足かなと思う部分も多少あります
- 3年前期コンピュータビジョンもこの参考資料を利用します

注) 講義では私の用意した資料を中心に利用し、この参考資料は講義中にはほとんど利用しません。講義内容やその周辺を学修するための資料として利用してください



## スケジュール

- 01回    イントロダクション：デジタル画像とは，量子化と標本化，Dynamic Range
- 02回    フィルタ処理1：トーンカーブ，線形フィルタ ※ オンデマンド
- 03回    デジタルカメラ，人間の視覚，(参考: 表色系)
- 04回    フィルタ処理2：非線形フィルタ，ハーフトーニング
- 05回    フィルタ処理3：離散フーリエ変換と周波数フィルタリング
- 06回    画像の幾何変換：アファイン変換と画像補間
- 07回    ConvolutionとDe-convolution
- 08回    画像圧縮
- 09回    筆記試験
- 10回    画像処理演習1
- 11回    画像処理演習2
- 12回    画像処理演習3
- 13回    画像処理演習4
- 14回    画像処理演習5

## Pythonプログラミング演習

第10回～第14回はプログラミング演習を実施

場所：PC室（詳細未定）

言語：Python + OpenCV

内容：Pythonの初歩的な内容，フィルタ，フーリエ変換，ハーフトーニングなど

## ある手法を『理解する』とは？

- 教科書をおぼえた：×
- 人にその手法を説明できる：△
- 例を挙げて人に説明できる：○
- プログラムとして記述できる：◎

→ コードを書こう！

※井尻の偏見に基づきます。異論は認めます。  
※困ったことに，実装できて動いているけど原理の詳細はよくわからない。。。という事実は結構あります

## イントロダクション：デジタル画像とは

### 到達目標

- デジタル画像のデータ形式に関する基礎的な用語を正しく利用できる
- キーワード：ラスタ画像・ベクタ画像・量子化・標本化・階調数・エイリアシング・ダイナミックレンジ・HDRI

### Contents

- デジタル画像とは
  - ラスタ画像とベクター画像
  - 量子化と標本化
  - 階調数
- HDRI合成

# Vector Graphics と Raster Graphics

画像をデジタルデータとして表現する場合

「Vector Graphics」と「Raster Graphics」の2通りが存在する



## Vector Graphics

画像を数式(スプライン等)で表現  
計算機で描いたイラスト

例 wmf/ai/cdr/cgm/dfx等

## Raster Graphics

画像をグリッド状の画素で表現  
写真/CT/MRI等の観察画像

例 jpg/png/bmp/gif/tif/等

両者を含む: pdf/DjVu/eps/pict/ps/swf/xaml等

# Vector Graphics と Raster Graphics



## Vector Graphics

制御点のみを保持するため  
データが小さい

拡大しても輪郭がスムーズ

計算機で描いたイラストに向く

## Raster Graphics

画素情報を保持するため  
データが大きい

拡大したらギザギザ

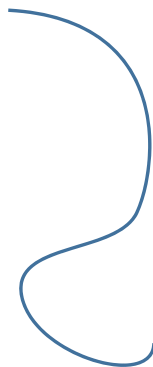
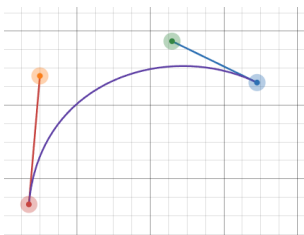
風景など観測画像に向く

## スプライン曲線

- Vector graphicsで自由曲線を描くために使われる
- 配置された制御点を通るように曲線を生成する技術
- 多くの種類が存在
  - B-Spline / ベジエ / NURBS などなど

例)3次 ベジエ曲線

$$\mathbf{b}(t) = (1-t)^3 \mathbf{p}_0 + 3(1-t)^2 t \mathbf{p}_1 + 3(1-t)t^2 \mathbf{p}_2 + t^3 \mathbf{p}_3$$



パワポの自由曲線ツールもこれ

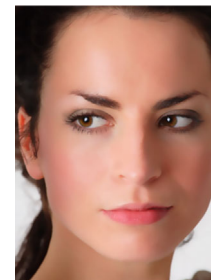
## Raster → Vector 変換 (Vectorization)

ラスタ画像をベクタ画像に変換する手法が研究されている

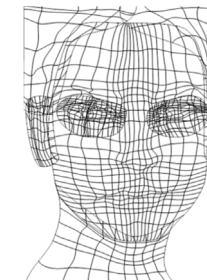
※ Vector → Rasterは簡単に変換できる (例Print Screenキー)

### Gradient mesh (Adobe Photoshop)

画像の特徴線に沿うメッシュを構築し、頂点に色情報を保持  
各パッチ (四角形) で頂点の色を滑らかに混ぜる



Raster Image



Vector image (Mesh構造 + 各cellの色情報)



画像の出典 [Jian Sun et. al. Image vectorization using optimized gradient meshes, TOG 2007]

# 標本化と量子化

デジタル画像（ラスタ画像）とは『離散値を持つ画素が格子状に並んだデータ』  
アナログ情報（レンズに入ってくる光）からデジタル画像を取得するとき

空間の離散化：標本化

値の離散化：量子化

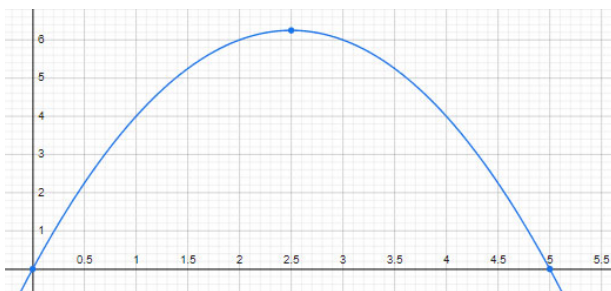
の必要がある



画像を拡大すると格子状に並んだ画素(pixel)が見える

## 練習問題

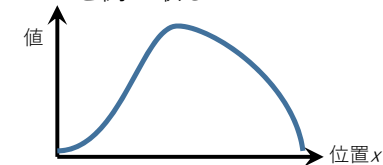
関数  $f(x) = -x^2 + 5x$  を、『標本化間隔1』『量子化レベル8』で標本化・量子化せよ。  
標本化の際、定義域は  $x \in [0, 5]$ 、関数値は画素の中心で評価すること  
量子化の際、整数値となるよう小数点を切り捨て、出力値を  $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$  のいずれかとせよ。



# 標本化と量子化

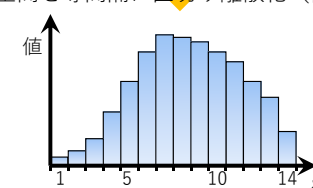
アナログデータは、標本化・量子化を経て、  
計算機にて保持可能なデジタル画像データになる

1次元のアナログデータを例に取る



※空間的に連続なので計算機では保持できない

空間を等間隔に区切り離散化（標本化）

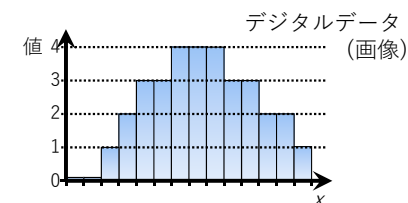


値を等間隔  
に区切り  
離散化  
量子化

標本点の間隔：標本化間隔

画像においては、標本点が画素に対応

※各点は連続値を持つため計算機では表現できない



各画素がとる値の数：階調数・量子化レベル  
上記の例では階調数 5

## 標本化に伴うエイリアシング

※概要のみ説明します

by Maksim / CC BY-SA 3.0

### 標本化定理

周波数  $f_{max}$  に帯域制限されたアナログ信号は、  
 $2f_{max}$  以上の周波数で標本化すれば再構成可能

一方、

周波数  $f_{max}$  に帯域制限されたアナログ信号を、  
 $2f_{max}$  より小さい周波数で標本化すると、元信号  
には含まれない偽信号(alias)が現れることがある

※ 標本化の細かさ（周波数）が不十分だとエイ  
リアスが生じるということ



レンガの壁の写真を、不十分な周波数  
で標本化した結果モアレが生じた

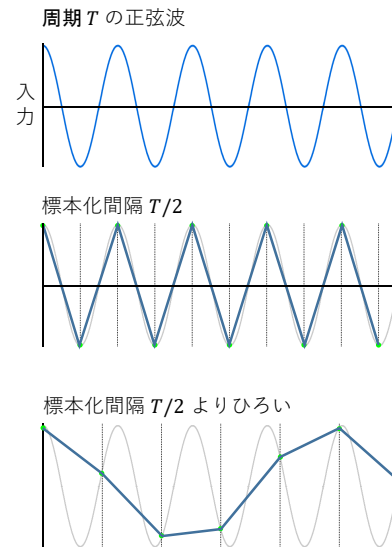
## 標本化に伴うエイリアシング

元信号が含む正弦波の最大周波数が  $f_{max}$  なら  
周波数  $2f_{max}$  以上で標本化すれば元信号を復元可

↓ これを周期  $T$  で考える

元信号が含む正弦波の最小周期が  $T_{min}$  なら間隔  
 $T_{min}/2$  以下で標本化すれば元信号を復元可能

より詳しくは  
『金谷健一:これなら分かる応用数学教室』  
を参照



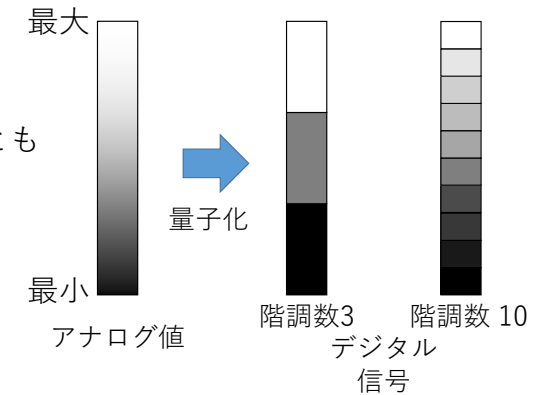
## 量子化レベル（階調数・画素深度・色深度）

量子化レベルとは

- アナログ値の分割数
- 各画素の色数のこと
- 階調数・画素深度・色深度とも

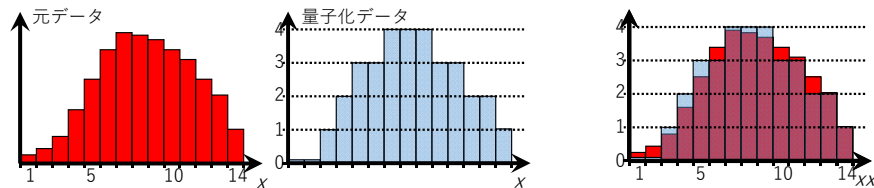
量子化レベルが大きいと…

- 微妙な色の変化を表現可能
- データが大きくなる



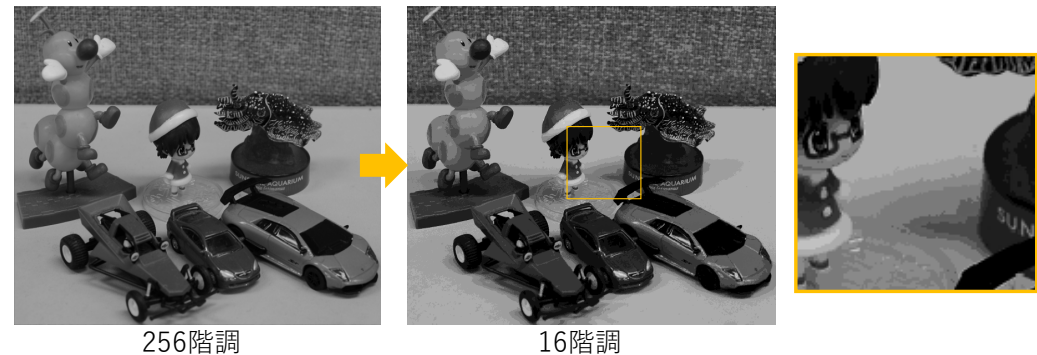
## 量子化誤差

量子化では、連続値が離散値に置き換わるので、誤差が生じる  
これを**量子化誤差**と呼ぶ



## 量子化による擬似輪郭

階調数が極端に小さい場合、疑似的な輪郭が生まれることがある  
※自然科学・医用画像などでは大きな影響が出る場合もありうるので注意





## 実際の画像フォーマットの階調数

### ビットマップ(.bmp)

1bit bitmap : モノクロ画像  
8bit bitmap : 256色のカラーパレット(インデックスカラー)  
24bit bitmap : RGB毎に 8-bit 階調  
※他のフォーマットも存在

### Portable Network Graphics (.png)

グレースケール : 1, 2, 4, 8, 16-bit階調  
カラー : 24bit (RGB毎に8bitの階調数), 48bit  
インデックスカラー: 1, 2, 4, 8個のカラーパレット

### Nikon D7000(一眼レフカメラの生データ)

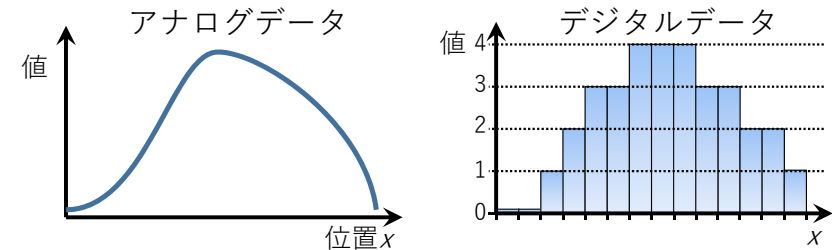
14bit (JPG等の画像データにする前はより大きなデータを持っている)

### 某社 X線マイクロCTの生データ

12bit階調 (階調数 = 濃度分解能)

## まとめ: デジタル画像とは

『Vector Graphics』『Raster Graphics』『標本化』『量子化』  
『量子化レベル』『量子化誤差』『擬似輪郭』について解説した



## 練習問題

Vector GraphicsとRaster Graphicsに関する以下の各説明について、正しいもののみを選択せよ

- ラスタ画像は拡大すると画素が見える一方、ベクタ画像は拡大しても滑らかな輪郭が保たれる。
- ラスタ画像のデータサイズは、圧縮処理をしない場合、画像の解像度に比例して増える
- ベクタ画像のデータサイズは、圧縮処理をしない場合、画像の解像度に比例して増える
- スプライン曲線は、制御点を滑らかに補間する数式で表現された曲線である
- ベクタ画像形式は、制御点や数式により画像を表現するため、表示の際に計算が必要となる

1. ラスタ画像に対するベクタ画像の利点を述べよ。

2. 上記の利点を生かしたベクタ画像の応用例を2つ以上列挙せよ。

3. 標本化と量子化について、その役割を説明せよ。

## 練習問題

以下2つの未圧縮画像のデータサイズを求めよ

### 例1) グレースケール画像

画像幅 W pixel

画像高さ H pixel

量子化レベル 8bit (1Byte) [0,255]

Byte

### 例2) カラー画像

画像幅 W pixel

画像高さ H pixel

量子化レベル RGB各色 8bit [0,255]

Byte

※これは未圧縮bmpの場合。圧縮画像の場合はもっともっとデータサイズは小さくなる。

※画像データはヘッダ情報も含むので上の値よりは少し大きくなる

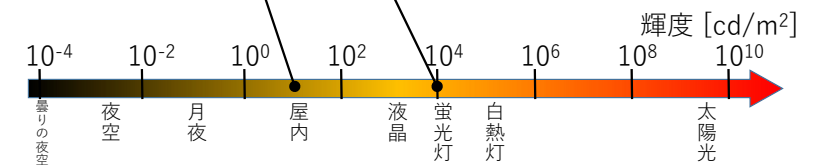
## HDRI合成

## 輝度(Luminance) - とは



人の感じる物体の明るさ

- ある広がりを持つ光源の見かけの単位面積に対して『人が感じる』明るさ
- 単位は $\text{cd}/\text{m}^2$

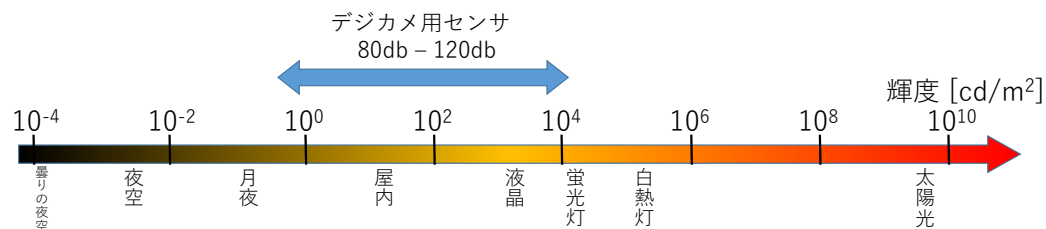


## ダイナミックレンジ - とは

信号をセンサーで計測するとき  
計測可能な最小輝度値 $I_{min}$ と最大輝度値 $I_{max}$ の幅のこと

$$D = 20 \log_{10} \frac{I_{max}}{I_{min}} \text{ (db)}$$

人の視覚のダイナミックレンジはある視野内で100db程度 [奥田: 高ダイナミックレンジ画像, 2010]  
デジカメのセンサも似たダイナミックレンジを持つように設計される



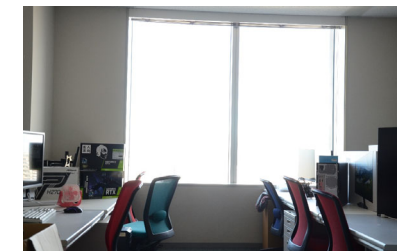
## HDRI : Motivation

デジタルカメラのセンサは、ダイナミックレンジが小さいため  
『凄く明るいところ』と『凄く暗いところ』  
を同時に撮影できない

部屋の中から外を撮影した例



露光時間を短くすると (1/8000 秒)  
部屋の中が黒つぶれ (アンダー)

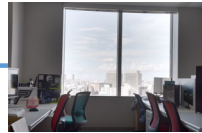


露光時間を長くすると (1/100 秒)  
窓の外が白飛び (オーバー)

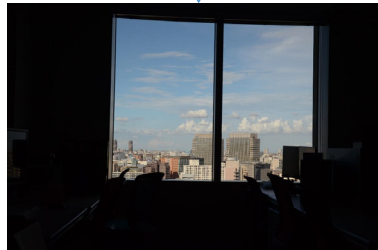
## HDRI でやりたいこと

『凄く明るいところ』と『凄く暗いところ』の情報を持つ画像  
を取得して…

明るいところがよく  
見える画像を合成したい



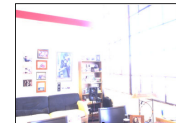
白飛び・黒つぶれの無い  
画像を合成したい



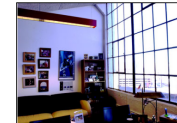
## HDRIの取得

カメラを固定  
露光を変えた写真を撮影し合成する

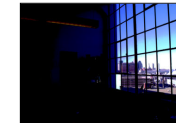
シャッターを長く開ける  
露光大[0,255]



露光中[0,255]



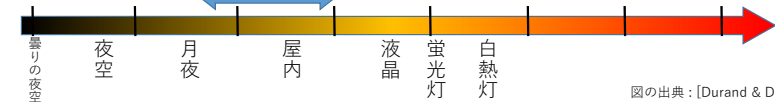
シャッターを短く開ける  
露光小[0,255]



HDRI(実数値)



階調数の大きい  
ファイルで保存する  
.hdr 32bit階調  
.exr 48bit階調



図の出典: [Durand & Dorsey SIGGRAPH 2002]

同時に2種類の露光の撮影が可能なカメラもある

→ HDR動画の撮影が可能になる

• <https://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/201208/12-107/>

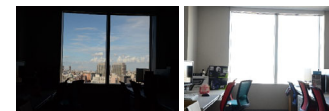
## HDRIを自作してみる

Luminance HDR

露光時間が可変のカメラ - NIKON D7000

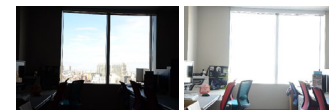
HDRI合成ソフト - Luminance HDR (ver 2.5.1)

1. 露光時間を変え撮影



1/8000秒

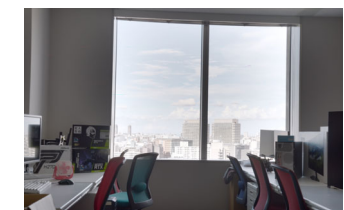
1/100秒



1/1250秒

1/50秒

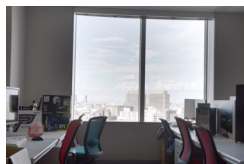
2. 一枚のHDRI画像に合成





## HDRIとトーンマッピング

**HDRI**



黒つぶれ・白飛びがなく  
大きな/小さな値をもつ画像

階調数(RGB毎): 16bit  
輝度値の幅:  $[10^{-1}, 10^4]$



表示のため階調数を落とす処理が必要  
『トーンマッピング』

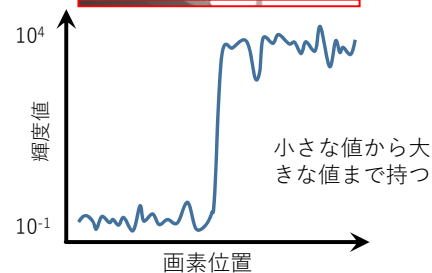
**表示  
デバイス**



液晶モニタ・プロジェクタ等  
階調数(RGB毎): 8bit  $[0, 255]$

## トーンマッピング (線形)

高ダイナミックレンジ画像

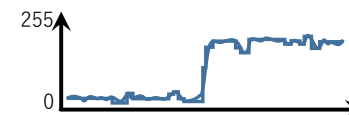


全レンジ  
を量子化

256階調画像

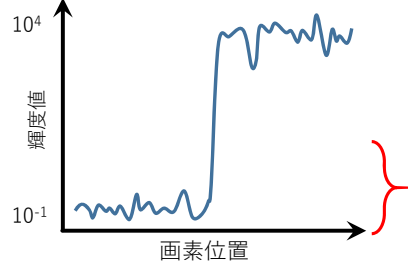


細かな情報が潰れる



## トーンマッピング (線形)

高ダイナミックレンジ画像

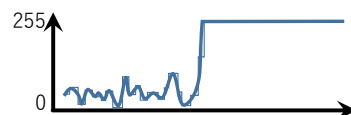


低い部分を  
量子化

256階調画像

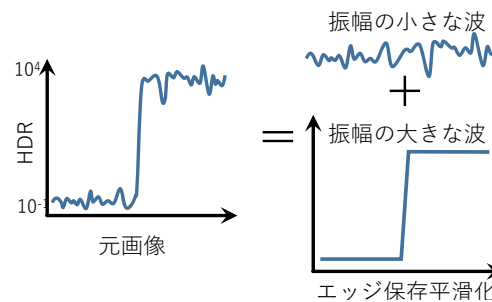
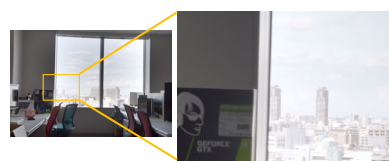


暗い部分が明瞭だが白とび

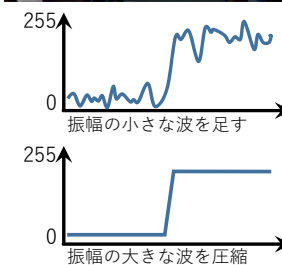


## トーンマッピング (HDR合成)

高ダイナミックレンジ画像



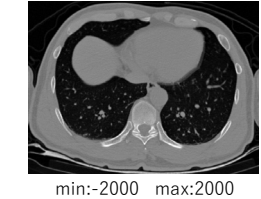
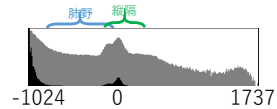
256階調画像



## CT画像のトーンマッピング

### CT画像

階調数 : 12 - 16 [bit]  
レンジ : -1000 - 1500 [HU]  
→ トーンマッピングの必要有



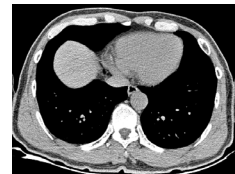
### 肺野条件

Min : -1200.0 Max: 0.0  
Window level : -600 (中心)  
Window size : 1200 (幅)



### 縦隔条件

Min: -110.0 Max: 190.0  
Window level : 40  
Window size : 300



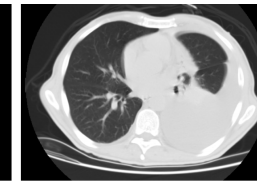
画像は理化学研究所生体力学シミュレーションチームより

## CT / MRI 画像のトーンマッピング

### 縦隔条件



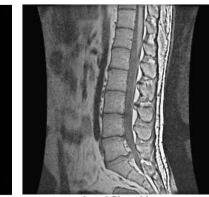
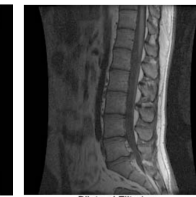
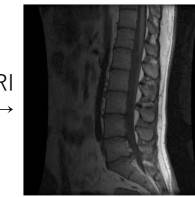
### 肺野条件



### 非線形トーンマッピング



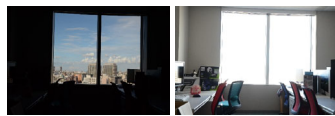
MRI  
→



画像の出典 (上) [F. Edward Boas, "High dynamic range images in radiology 2007" [www.stanford.edu/~boas/science/pub\\_list.html](http://www.stanford.edu/~boas/science/pub_list.html)]

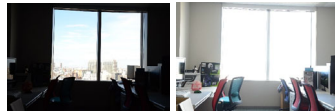
画像の出典 (下) [Park et al. "Evaluating Tone Mapping Algorithms for Rendering Non-Pictorial (Scientific) High-Dynamic-Range Images", JVCIR 2007. ]

## まとめ : HDRI合成



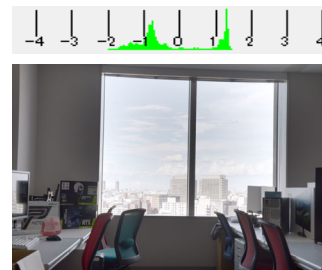
1/8000秒

1/100秒



1/1250秒

1/50秒



- ダイナミックレンジの広い（黒つぶれ白とびのない）写真を取得する方法
  - 露光の異なる写真から合成できる
- トーンマッピング : 表示用にHDRIの階調数を落とす処理のこと

豊洲キャンパスから撮影したスカイツリー  
HDRI合成結果



## ハイダイナミックレンジ画像の構築(1/4)



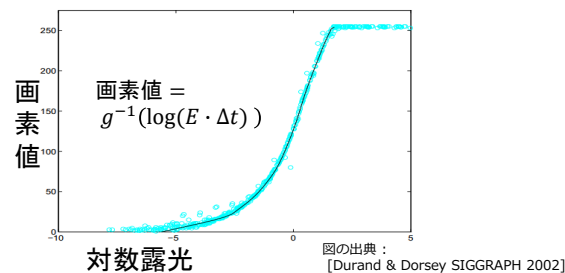
HDRI合成の補足資料  
講義内では取り扱わない予定

## ハイダイナミックレンジ画像の構築(2/4)

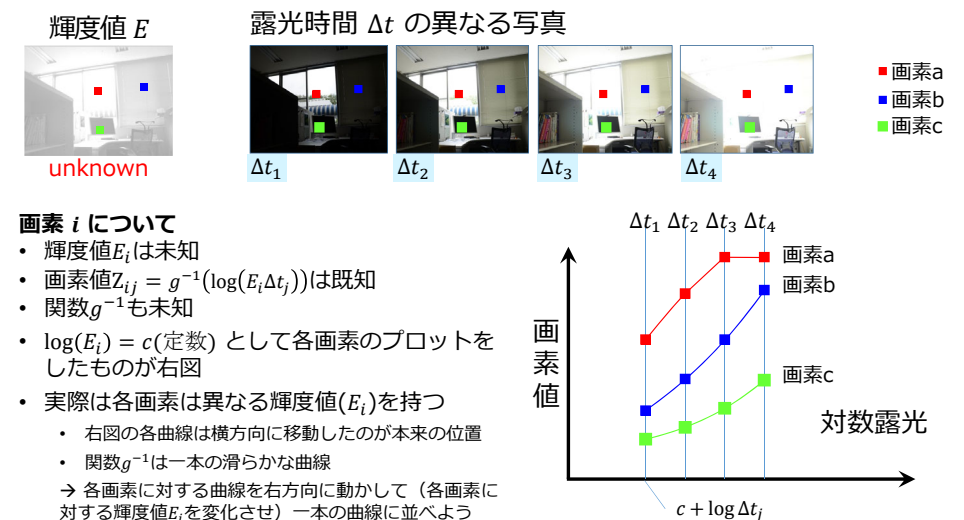


応答関数  $g^{-1}$

『対数露光  $\log(E \cdot \Delta t)$ 』と  
『画素値』には、非線形の  
関係がある

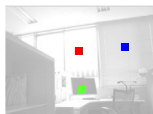


## ハイダイナミックレンジ画像の構築(3/4)



## ハイダイナミックレンジ画像の構築(4/4)

輝度値  $E$

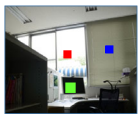


unknown

露光時間  $\Delta t$  の異なる写真



$\Delta t_1$



$\Delta t_2$



$\Delta t_3$



$\Delta t_4$

■ 画素a  
■ 画素b  
■ 画素c

各画素のなすプロットは、  
一本の曲線（応答関数）に乗るはず

全画素のなすプロットが一本の曲線に乗るように  
横軸方向に平行移動（輝度値  $E_i$  の値を定数ではなく  
変数として考える）

→ 各画素の輝度値  $E_i$  が得られる

※カラー画像の場合、R・G・Bチャンネルごとに  
輝度  $E_i$  を計算

