

デジタルメディア処理

担当: 井尻 敬

カメラ



一眼レフ(D7000 + zoom lens kit)

画像の取得方法・人間の視覚

達成目標

- ・デジタル画像の取得方法に関する基礎的な用語を正しく利用できる
- ・デジタルカメラの基礎的な構造と機能を説明できる
- ・人間の視覚系の基礎的な構造と機能を説明できる

Contents

- ・デジタルカメラ
- ・人間の視覚

カメラとは

- ・光を計測・記録する装置
- ・一般に、外部からの光を集めレンズ、と、光の強度を記録する装置（フィルム/撮影素子）から構成される

・フィルムカメラ

集めた光をフィルム上に記録
撮影後フィルムに化学処理を施しネガに（現像）
ネガから写真をプリントする（銀塗プリント）



CC0
<https://pixabay.com>



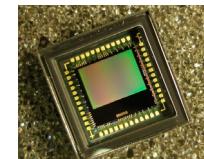
© FUJIFILM, 2017
<http://fujifilm.jp/>

・デジタルカメラ

集めた光を撮影素子(CCD・CMOS)により電気的に記憶
センサ上にフォトダイオードが配列されておりこの数
が解像度を決める（8M画素なら、8M個のフォトダイオード）



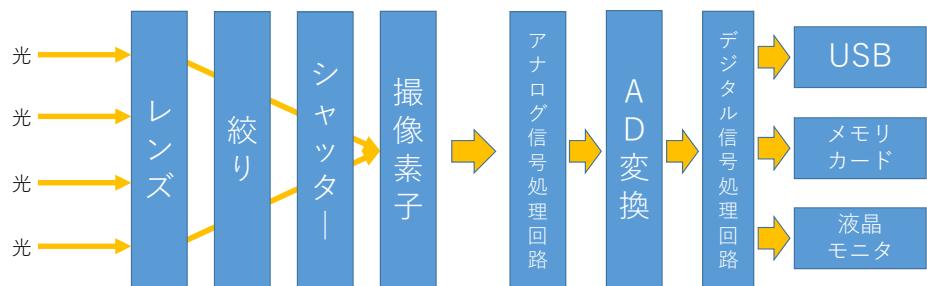
Nikon D7000 とズームレンズ



CMOS Image Sensor
By Filya1 [CC-BY-SA 3.0]
from wikipedia

デジタルカメラの構造

- 光はレンズを通り撮像素子上に像を結ぶ
- 光の量を調整するための、絞りとシャッターが存在
- 撮像素子 (CCD/CMOS) にて得られた信号は、A/D変換後、画像処理される
- 画像処理部では、ノイズ除去や階調・色調補正処理が行われ、画像が生成される



デジタルカメラの(大まかな)種類



COOLPIX W300
1/2.3型
6.2×4.7



Nikon 1 AW1
1型
13.2×8.8



D5300
APS-C
23.5×15.6



D5
フルサイズ
35.9×23.9

コンパクト
デジタルカメラ
レンズ交換不可
撮像素子は小さい

ミラーレス一眼
レンズ交換可
撮像素子は中~大
ミラーを持たない

一眼レフデジタルカメラ
レンズ交換可
内部にミラーを持ち、撮影される写真をファインダーから確認できる

画像は<http://www.nikon-image.com/products/>より引用
© 2017 Nikon Corporation / Nikon Imaging Japan Inc.

デジタルカメラの(大まかな)種類



Sony DSC-W830
1/2.3型
6.2×4.7



Sony ZV-E10
APS-C
23.5×15.6



Sony α 6400
APS-C
23.5×15.6



Sony α 99 II
フルサイズ
35.9×23.9

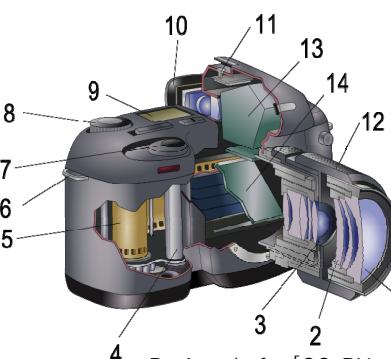
コンパクト
デジタルカメラ
レンズ交換不可
撮像素子は小さい

ミラーレス一眼
レンズ交換可
撮像素子は中~大
ミラーを持たない

一眼レフデジタルカメラ
レンズ交換可
内部にミラーを持ち、する映像
をファインダーから確認できる

画像はwww.sony.jpより引用
© 2025 Copyright 2025 Sony Marketing Inc.

一眼レフカメラの内部構造



By Anuskafm [CC-BY-SA-3.0],

- 一眼レフカメラ (Single-lens reflex camera) は、反射鏡によりレンズを通過した光をファインダースクリーンに結像させる
- これにより見たままの写真を撮影できる
- 撮影時には、ミラーが上がりシャッターを切る

参考→ <http://www.nikon-image.com/enjoy/phototech/manual/01/01.html>

- Photographic frontal glass lens
- Internal glass lenses
- Diaphragm
- Focal plane shutter
- Photographic film
- Securing strap
- Shutter release
- Shutter speed selector
- Expose counter
- Viewfinder
- Flash socket
- Focus ring
- Pentaprism/pentamirror
- Reflex Mirror

一眼レフカメラの構造

撮影時のミラーとシャッターの動きを高速度カメラで撮影してみると…



一眼レフカメラの前に
高速度カメラを配置



露光時間1/10のシャッターを 960fpsで撮影

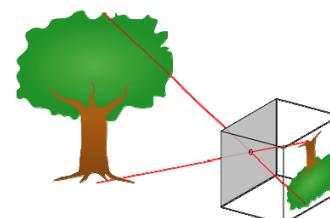
ピンホールカメラ

暗箱に小さな針穴（ピンホール）をあけると、被写体から出た光が針穴を通り、案箱の面に像を作る

この現象を利用したカメラを**ピンホールカメラ**と呼ぶ

※レンズではなく針穴を利用した撮影法

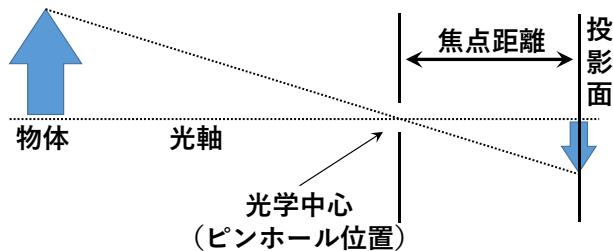
光軸・光学中心・焦点面は下図の通り定義される



CC0, Wikipediaより

光軸とは光学中心を通り
投影面に垂直な直線

ピンホールモデルでは光学中心と
投影面の距離が**焦点距離**とよぶ



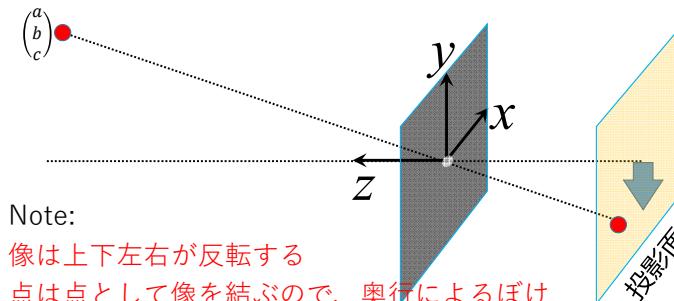
画像生成の幾何学モデル

- ・カメラによる撮影では、3次元物体を2次元画像として記録する
- ・3次元空間から発せられる光を集め、2次元平面状の撮像素子に像を結ばせる
- ・3D → 2D 変換に関する2種の幾何学モデルを紹介する
 - ・ピンホールカメラモデル
 - ・薄肉レンズモデル

ピンホールカメラの投影モデル

練習) 光学中心を原点にとる下図のような3次元空間において投影面を $z = -f$ に配置する (f は焦点距離)

このとき、点 $A: (a, b, c)$ が投影される投影面上の座標 (X, Y, Z) を求めよ

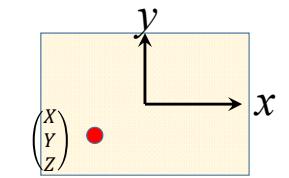


Note:

像は上下左右が反転する

点は点として像を結ぶので、奥行によるぼけ
は生じない（ピント調節不要）

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} =$$



投影面

透視投影モデル

ピンホールモデルでは投影像の上下左右が反転

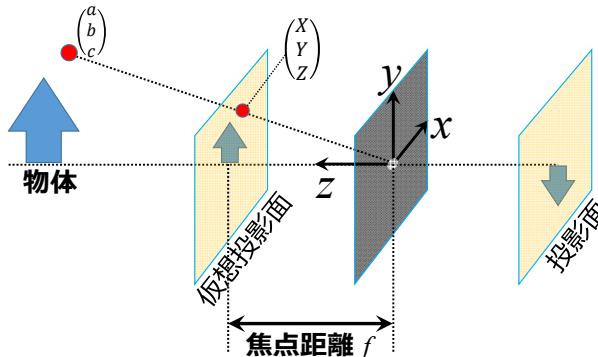
- アルゴリズム設計・実装時・論文執筆時にややこしい
- 透視投影モデルが利用される

透視投影モデル

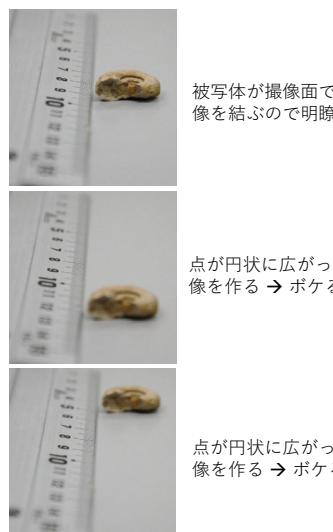
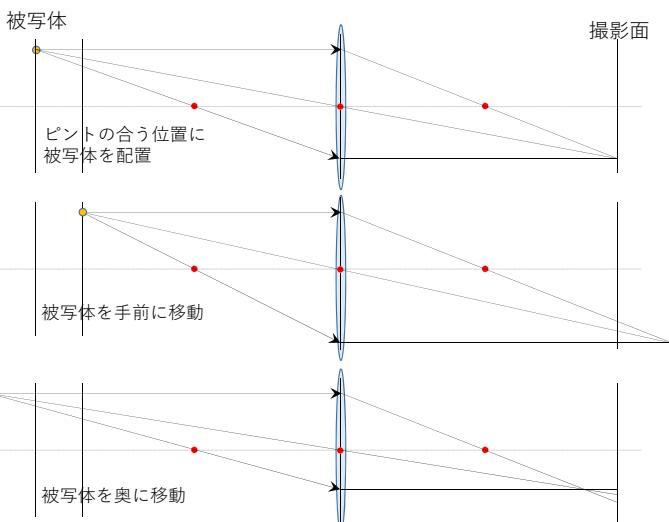
仮想的な投影面をピンホール手前に配置、ここに像が映ると仮定する

練習) 点(a, b, c) の仮想投影面上の座標は?

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} =$$



ピンボケの仕組み: レンズと撮影面を固定し、被写体を前後に動かすと、、、



薄肉(うすにく)レンズモデル

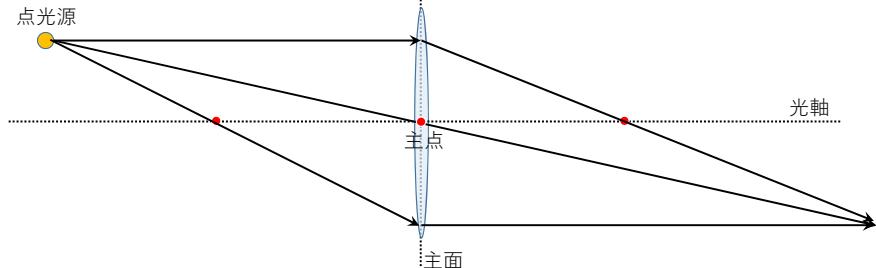
- 薄肉レンズモデル: 厚みを無視できるレンズモデル

※ 通常 光線はレンズ入射時・出射時に屈折する

※ 薄肉レンズモデルでは、厚みを無視し「主面」にて一度だけ屈折すると仮定する

- 薄肉レンズモデルには**焦点距離f**が定義され、光は以下の法則に従う

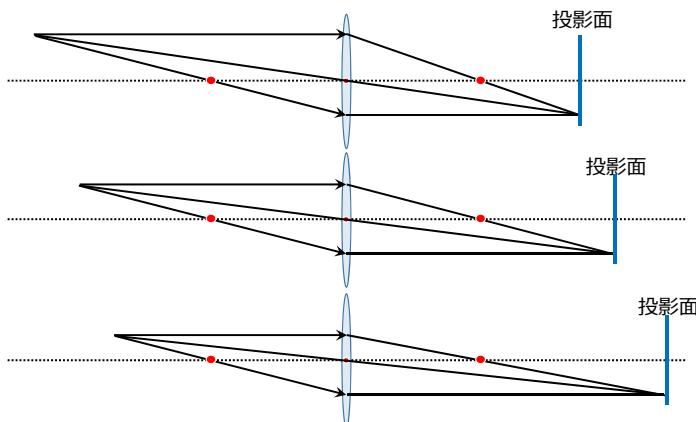
- 特徴1: 光軸に平行な光線は、レンズ通過後、焦点で光軸と交わる
- 特徴2: **主点**（主面と光軸の交点）を通る光線は直進する
- 特徴3: 焦点で光軸と交わる光線は、レンズを通過後、光軸と平行に



ピント調節

投影面を動かすと結像する位置（ピントの合う位置）が変化する

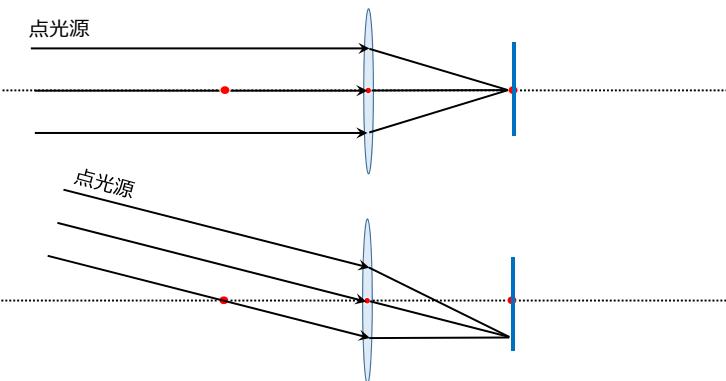
- 投影面が遠いほど近くのものにピントが合う
- 投影面がレンズに近いほど遠くにピントが合う



ピント調節

焦点位置に投影面を配置すると、、、

- 平行光線にピントが合う
- 無限遠にある点光源は平行光線なので
- 焦点位置に投影面を配置すると無限遠にピントが合うということ

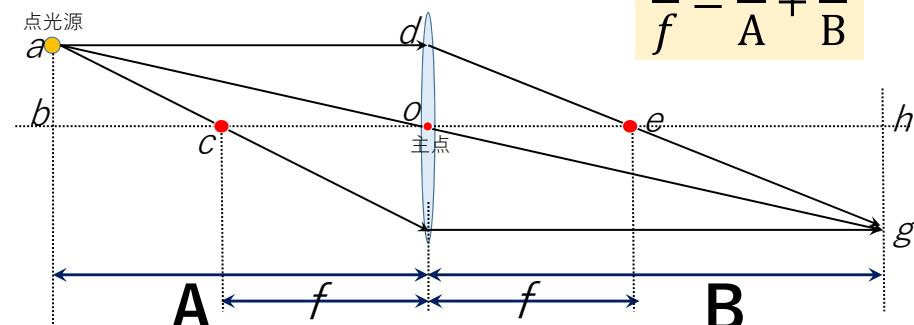


薄肉レンズモデル：ガウスのレンズ公式

焦点距離 f の薄肉レンズモデルについて、レンズから A の距離にある物体が、レンズから B の距離にある投影面にて像を結ぶ

f, A, B には次の関係が成り立つ

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{A} + \frac{1}{B}$$



(参考) ガウスのレンズ公式を証明せよ

- $ado : gho$ が相似なので
- $A:B = ab : gh \rightarrow A * gh = B * ab \rightarrow gh / ab = B/A$
- $doe : ghe$ が相似なので
- $do : hg = f : B-f \rightarrow ab * (B-f) = hg * f \rightarrow hg / ab = (B-f) / f$
- $do = ab$ の関係を利用した
- $\rightarrow Bf = AB - Af$
- $\rightarrow 1/A + 1/B = 1/f$
- $A = BF / (B-f)$
- $f=24\text{ mm} B=30\text{ mm}$ の場合
- $A = BF / (B-f) = 720/6 = 120\text{ mm}$
- $f=24\text{ mm} B=24.1\text{ mm}$ の場合
- $A = BF / (B-f) = 5784\text{ mm}$

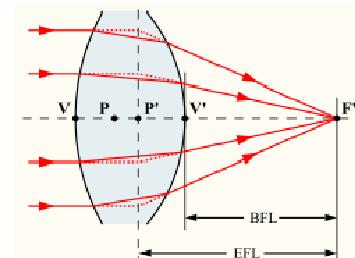
(参考) 厚肉レンズモデル

レンズ厚みを無視できないレンズモデル

主点（主平面）が 2 つ存在

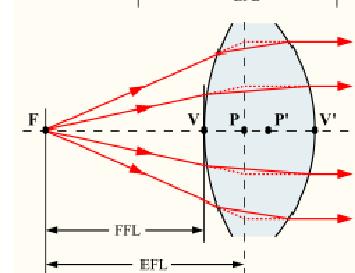
後側主平面・後側主点・後側焦点 ※読み方はこうそく

- レンズ左側から来る平行光の入射光と出射光の交点が成す面を後側主平面（後側主点 P' ）と呼ぶ
- レンズ左側から来る平行光が集まる位置を後側焦点 F' と呼ぶ



前側主平面・前側主点・前側焦点 ※読み方はぜんそく

- レンズ右側から来る平行光の入射光と出射光の交点が成す面を前側主平面（前側主点 P' ）と呼ぶ
- レンズ右側（撮像素子側）から入射した平行光が集まる位置を前側焦点と呼ぶ



FFL (front focal length): レンズ面(左)から前側焦点までの距離

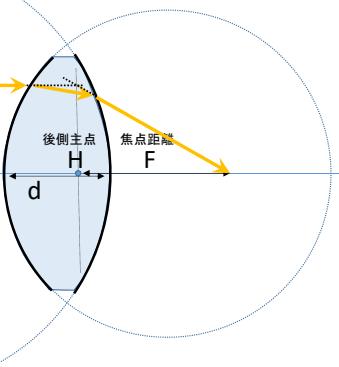
BFL (back focal length): レンズ面(右)から後側焦点までの距離

EFL (Effective Focal Length): レンズの前側主点から前側焦点までの距離 or 後側主点から後側焦点までの距離（前後で等しい）

By en:User:DrBob
[CC-BY-SA, 3.0]

(参考) Lens maker's formula

球面レンズの焦点距離を導出のため レンズメーカーの公式が知られる



$$\frac{1}{F} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \left(\frac{d}{n} \right) \left(\frac{(n - 1)^2}{R_1 R_2} \right)$$

n : レンズの屈折率
R1: 左側のレンズの曲率半径
R2: 右側のレンズの曲率半径
d : レンズの厚み
F : 焦点距離
薄肉レンズでは $d=0$ となる

参考: 薄肉レンズに関する導出

<https://www.youtube.com/watch?v=NIA0ZY50Hm0>

<https://www.youtube.com/watch?v=JRvYTvjzbSA>

練習問題

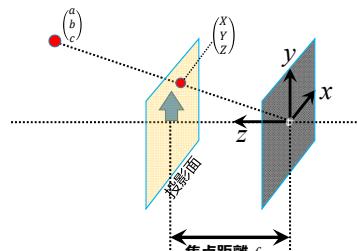
ピンホールカメラ/ 薄肉レンズに関する説明のうち正しいものを選択せよ

- ・ピンホールカメラは被写界深度がほぼ無限大になる
- ・ピンホールカメラの被写界深度は有限でピンボケが起こる
- ・ピンホールカメラでは、投影面とピンホールの距離を調整することでピントを調整できる
- ・ピンホールカメラでは、投影面とピンホールの距離を調整することで像の大きさを調整できる
- ・薄肉レンズモデルでは、被写界深度がほぼ無限大になる
- ・薄肉レンズモデルの被写界深度は有限でピンボケが起こる
- ・薄肉レンズモデルでは、投影面とレンズの距離を調整することでピントを調整できる
- ・薄肉レンズモデルでは、レンズの口径を絞る(小さくする)ことで被写界深度が深くなる

透視投影モデルを仮定しカメラ座標系における点A (50mm, 40mm, 500mm)を考える。

※カメラ座標系：カメラ位置を原点、垂直上向きをy軸、光軸をz軸とする座標系
(1) 焦点距離 $f = 25\text{mm}$ の時の点Aの投影面上での3D座標を示せ

(2) 焦点距離 $f = 50\text{mm}$ の時の点Aの投影面上での3D座標を示せ



まとめ：デジタルカメラ

- ・最も一般的な画像取得装置であるデジタルカメラの基本について紹介
- ・デジタルカメラの種類
 - ・コンデジ, ミラーレス一眼, 一眼レフ
- ・画像生成の幾何モデル
 - ・ピンホールカメラ
 - ・薄肉レンズ
 - ・参考: 厚肉レンズ



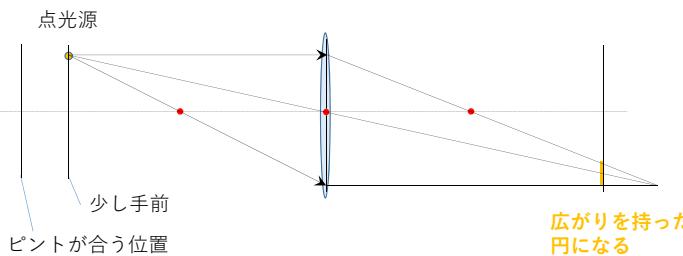
焦点ボケと被写界深度

被写界深度

被写界深度: ピントが合って見える深度（奥行き）のこと
結像する位置から前後に被写体を動かすと、点が広がりを持つ円として像を結ぶ

この円が十分小さければピントが合って見える

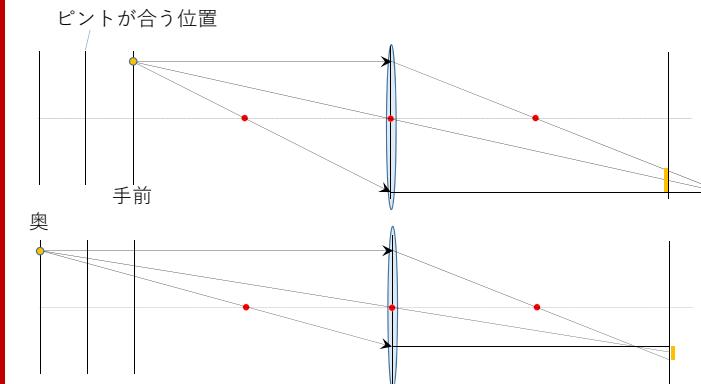
- この円を**錯乱円**と呼ぶ
- 十分小さい→センサの画素よりも小さい



7.5mm~8.5mm位の範囲はピントが合って見える

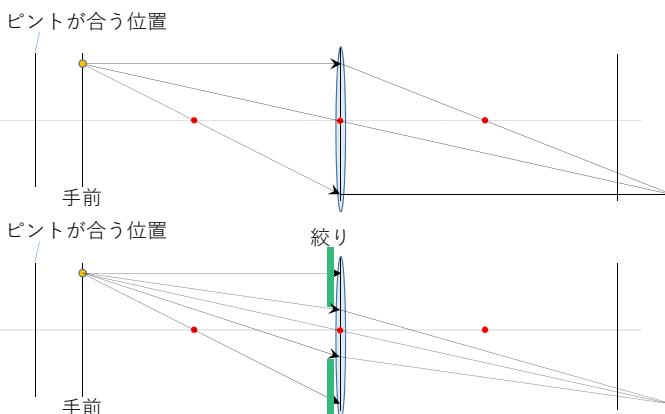
手前と奥の被写界深度

被写体を、ピントが合う位置から、同じ距離だけ手前/奥に動かすと
手前のほうが錯乱円が大きくなる → 手前のほうがボケやすい（被写界深度が浅い）



絞りと被写界深度

レンズには入射光を中心付近のみに制限する**絞り**が存在
→ 錯乱円が小さくなり、被写界深度が深くなる



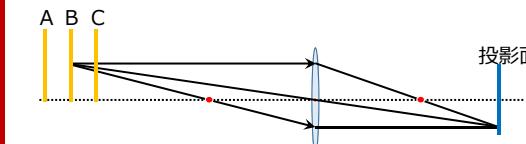
F=5.8



F=36

練習問題

薄肉レンズモデルにおいて、下図の通りBに焦点が合うよう投影面を配置したとき、Bの奥Aと手前Cではどちらがよりぼけかかるか？その理由を簡潔に説明せよ。



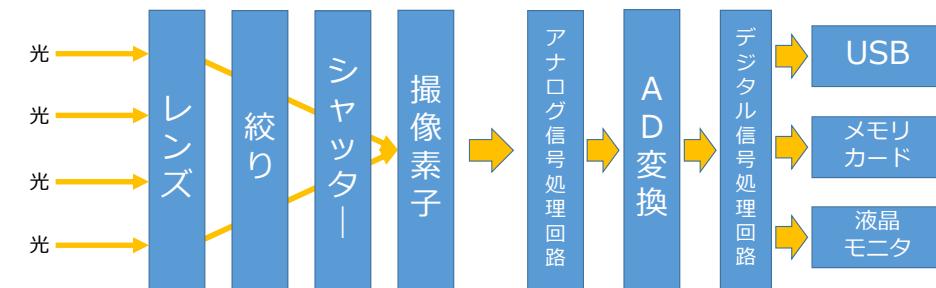
集合写真の撮影を任されました。撮影対象は4列に並んでおり、ピントをマニュアルで合わせる必要があります。
全員の顔がピンボケしないためには、どこにピントを合わせるべきですか？またその理由はなぜですか？



撮影パラメータ

カメラ撮影の際、所望の絵を得るため各種パラメータを調整する

- ・撮影画角
- ・絞り
- ・シャッタースピード（露光時間）
- ・ISO感度
- ・ピント



撮影パラメータ

画角

- ・画角とは、撮影範囲のこと。素子サイズとレンズの焦点距離により定まる
- ・素子サイズは、カメラ本体により定まる
 - ・フルサイズ - APS-C - 1型 - などなど（一般的に大きいと高い）
- ・焦点距離は、レンズにより定まる
 - ・焦点距離を変更できないレンズ → 単焦点レンズ
 - ・焦点距離を変更できるレンズ → ズームレンズ

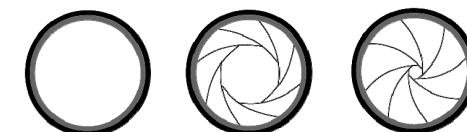


焦点距離が短いと広角に (f=24mmで撮影)



焦点距離が長いと望遠に (f=105mmで撮影)

絞り (F値)



By Allophos
[CC-BY-SA, 3.0]
From Wikipedia

- ・絞りとは、光量調整のためレンズ直径を調整できる機構のこと
 - ・絞る (F値-大) : 光量が減り、被写界深度が深くなる（ボケにくくなる）
 - ・開く (F値-小) : 光量が増え、被写界深度が浅くなる（よくボケる）

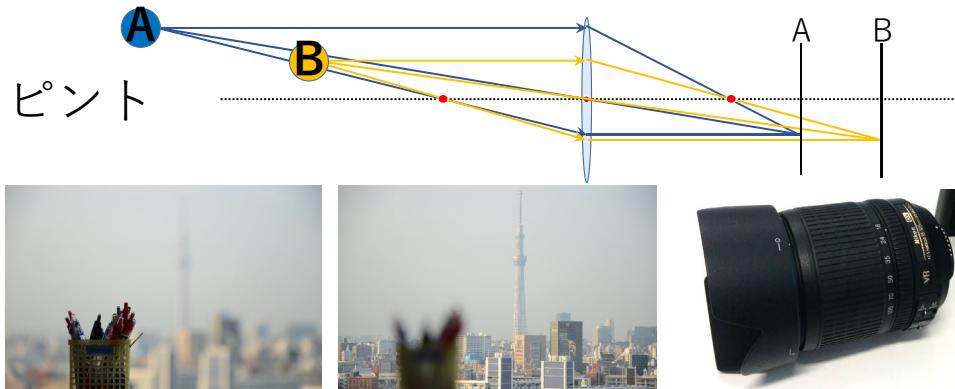
- ・F値 (F-number) とは、レンズの集光性能を表す量

F値 = 焦点距離 / レンズ直径 と定義される

- ・“絞り”により直径Dを小さくすることでF値を調整できる
- ・絞る → 直径が小さく → F値は大（光の量が減り、ボケにくくなる）
- ・開く → 直径が大きく → F値は小（光の量が増え、ボケやすくなる）

シャッタースピード（露光時間）

- ・シャッタースピード（露光時間）とは、撮像素子に光を当てる時間のこと
- ・露光時間を2倍にすると、光量が2倍になり、画像は2倍明るくなる
 - ・メカニカルシャッター：物理的な機構で露光時間を調整
 - ・電子シャッター：電子的な制御で露光時間を調整
- ・露光時間が長い → 画像は明るく、動いているものはボケる
- ・露光時間が短い → 画像は暗く、動いているものもボケにくい



- ・レンズと撮像素子の距離を変化させることでピント調節
 - ・オートフォーカス：画像処理によりカメラが自動でピントを合わせる
 - ・マニュアルフォーカス：フォーカスリングをまわすことでピントを調整できる

※実際のカメラレンズのピント調節はもう少し複雑な機構になっている

ISO感度

- ・ISO感度とは、撮像素子の感度のこと
 - ・もともとはフィルムの感度のこと。
 - ・昼は低い感度のフィルムを使い、夜は高い感度のフィルムを使う、などとして使い分けていた



FUJICOLOR 100

FUJICOLOR SUPERIA
Venus 800

© 富士フイルム株式会社 2017
fujifilm.jpより画像を引用

- ・デジタルカメラはISO感度を設定できるものも多い
- ・ISO100に対してISO400は4倍の感度になる
- ・一般的に感度を上げるとノイズが増える
- ・Sony α 7の感度は ISO400,000以上!
- ・<https://www.youtube.com/watch?v=JjWqI7kfrUM>

ピント調節の(少し特殊な)例

ピンホールカメラと違いレンズは広い面積で光を集めるのでブランドの奥の像も復元できる



ピント調節の(少し特殊な)例

ピンホールカメラと違いレンズは広い面積で光を集めるのでブランドの奥の像も復元できる



似た例

練習問題

1. ピントを合わせるとは、次のどの操作に相当するか？最も適当なものを選択せよ。

- A. レンズの焦点距離を変化させる
- B. レンズ(群)を動かして投影面との距離を変化させる
- C. 紋りを開閉して光量を調整する
- D. ISO感度を変化させる

2. 露光時間を長くした場合に撮影される画像に起こる変化を列挙せよ

3. ISO感度に関する説明として正しいものを選択せよ

- ISO感度を高くすると画像中にノイズが増える
- ISO感度を低くすると画像中にノイズが増える
- ISO感度を高くすると画像が明るくなる
- ISO感度を高くすると画像が暗くなる
- ISO感度を高くすると暗所でも手振れせずに撮影しやすくなる

4. F値を大きくした(絞りを絞った)場合に撮影される画像に起こる変化を列挙せよ

まとめ：撮影パラメータ

- 画角
- 絞り
- シャッタースピード（露光時間）
- ISO感度
- ピント

[参考:撮影パラメータ](#)

練習)

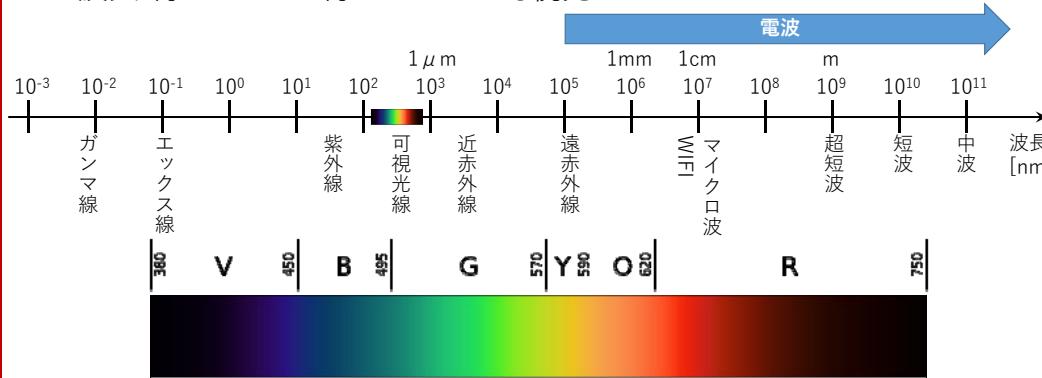
スマホのカメラを起動し、Proモードにして、上記パラメータが変更可能か確認してみてください



人間の視覚

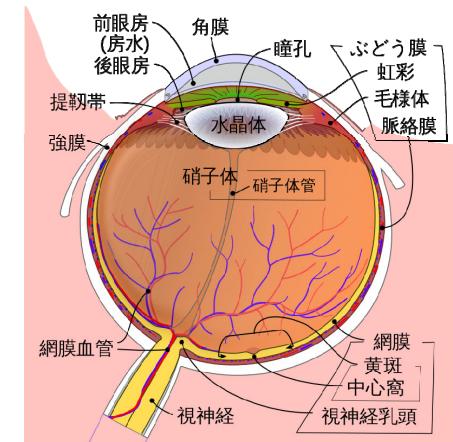
可視光

- 可視光とは電磁波のうち人の目で見えるもの
- 下図は電磁波全体
- 波長 約400nm～約800nmが可視光



人間の視覚

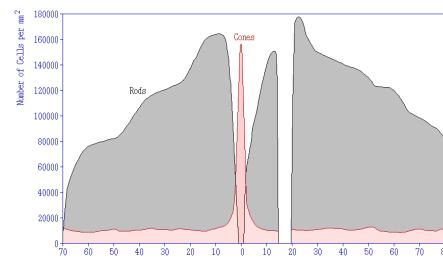
- 人間の眼球は直径約24mmの球状
- 主要な組織と機能は以下の通り
 - 角膜：集光
 - 水晶体：焦点調整
 - 虹彩：光量調整（絞り）
 - 網膜：光を電気的な信号に変換
 - 中心窓：中心視野（注視物はここに結像）
- 網膜には2種類の視細胞が分布する
 - 錐体**：色に関する情報を得る
 - L錐体(赤錐体), M錐体(緑錐体), S錐体(青錐体)
 - 桿体**：弱い光の明るさ情報を得る



By Rhcastilhos (translated by Hatsukari715) [CC0]

錐体細胞(Cone cell)

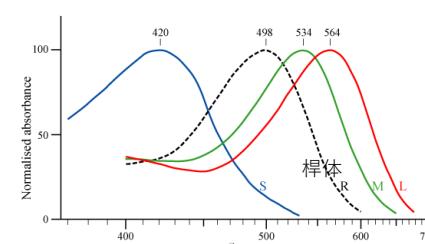
- 680万個程度
- 中心窓周辺2度付近に分布
- 比較的明るい光に反応 ($> 0.01 \text{ cd/m}^2$)
- L錐体(赤錐体), M錐体(緑錐体), S錐体(青錐体)** の三種が存在し、色情報を判別
- 生まれつき3種の錐体を持たない人も多い（日本人男性5%, 女性0.2%）



By Jochen Burghardt [CC-BY-SA 3.0]

桿体細胞(Rod cell)

- 1億2500万個程度
- 中心窓ではなく視覚 10° 付近に分布
- 比較的くらいい光に反応 ($< 3.0 \text{ cd/m}^2$)
- 暗所視**：暗所では桿体のみが働くためものの形は分かるが色は認識できない
- そらし目**：非常に暗いものの（星など）を見る場合、周辺視野を利用すると良く見える

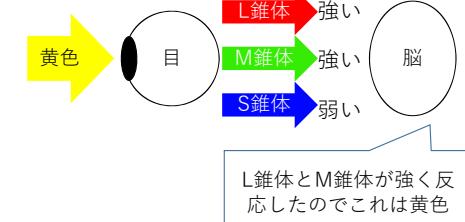
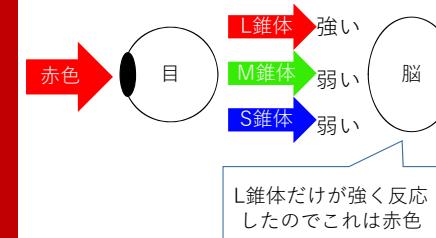
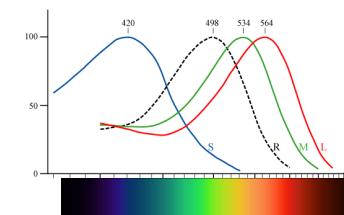


By Maxim Razin based on work by w:User:DrBob and w:User:Zeimus [CC-BY-SA 3.0]

人の色の感じ方

人は **L錐体, M錐体, S錐体** を利用して色を知覚する

これがどういうことかというと。。。



人の感じる明るさ

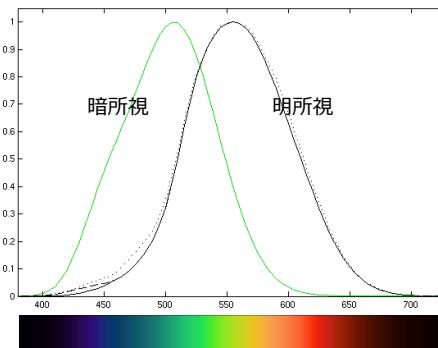
- 人の目は光の波長によって感じる明るさが異なる
 - 紫外線/赤外線: どんなに強くても見えない
 - 緑付近: 明るく見える
 - 青付近: 強い光でも暗く見える
- 感じる明るさは、明所視・暗所視でも変化
 - 明所視の感度のピーク: 555nm付近
 - 暗所視の感度のピーク: 507nm付近

(参考) 放射量と測光量

- ある光源が放出する光のエネルギーを放射量[W]と呼ぶ
- 人が知覚できるのはその一部のみなので、、、
- 照明器具では、放射量に人の視覚感度で重み付けを行なった測光量 [lm(ルーメン)] という単位が利用される

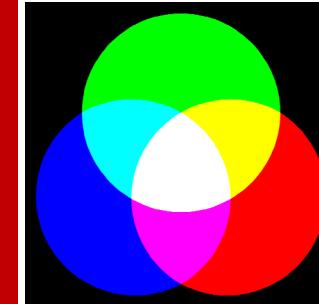
SKIP?

標準分光視感光率



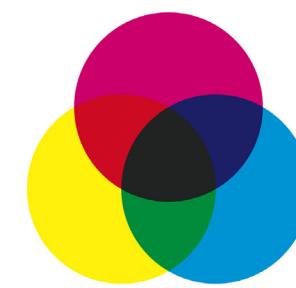
練習問題) 何故、色の三原色はあるのに音の三原音はないか？（両方とも波なのに）色と音の知覚方法の違いを含めて簡潔に説明せよ

[By Quark67(Modified color by Monami) CC3]



光の三原色 (加法混合)
Red/Green/Blueの光を混合すれば
様々な色を作れる

[By Quark67(Modified color by Monami) CC3]



Yellow: Blueを吸収
Magenta : greenを吸収
Cian : Redを吸収

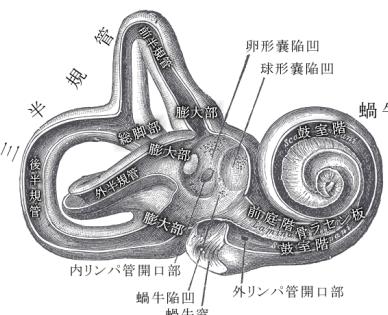
色の三原色 (減法混合)
Cian/Yellow/Magentaの塗料を
混合すれば様々な色を作れる

(参考) 人の聴覚

- 蝸牛内部にある有毛細胞により音を知覚
 - 蝸牛:螺旋状の構造をした器官
 - 有毛細胞: 蝸牛の基底膜に約15000個配置される
- 音の周波数により異なる有毛細胞が反応する→人は異なる周波数を聞き分けることができる

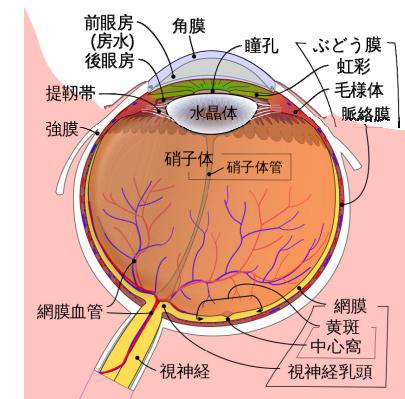
NIHが制作した動画→

https://en.wikipedia.org/wiki/File:Journey_of_Sound_to_the_Brain.ogg



まとめ: 人間の視覚

- 電磁波のうち波長400~800nmの可視光を認識できる
- 目の構造
 - 角膜、水晶体、虹彩、網膜
- 視細胞
 - 錐体: 明るい光に反応し、色の識別を担う
 - 桿体: 暗い光に反応し、明るさを識別する
 - 明所視・暗所視
 - そらし目
 - 色の認識法



By Rhcastilhos (translated by Hatsukari715) [CC0]

表色系

- ・色を定量的に表すことを**表色** (Color specification) といい、表色のための一連の規定と定義を**表色系** (Color System) という。
- ・表色系には、**顯色系**と**混色系**とがある
- ・**顯色系**
 - ・色の見え方に基づいて構築された体系
 - ・例) マンセル表色系
- ・**混色系**
 - ・ある色と等色にするための色の混合割合に基づいて構築された体系
 - ・例) CIE-RGB

表色系（参考資料）

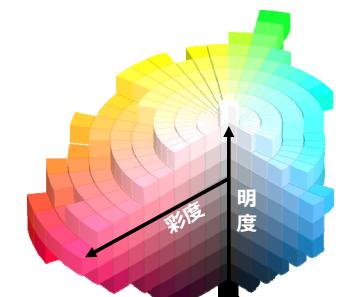
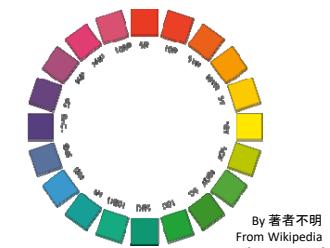
参考文献

「大田登著、色彩工学」
※わかりやすかったのでお勧めです。

マンセル表色系

- ・米国の画家 Munsellが1905年に考案し、米国光学会 (OSA)が1930年代に尺度を修正した表色系
 - ・心理学的な観点から、3属性で定義
- 色相:** 色の違いを表す属性。赤黄緑青緑を円上に配置し、円全体を100等分（色相環）。各色相には“10R”などの名前がつく。
- 明度:** 色の明るさを表す属性で、黒～白を11段階に分割。
- 彩度:** 色の鮮やかさを表す属性で、無彩色から最も鮮やかな色まで等分割に区切る。
- ・ある資料のマンセル記号（色相・明度・彩度）を求めるには、資料と色票を見比べ最も一致する色票を探す
 - ・ある色が（色相1.6YR、明度6.3、彩度3.9）ならば、「1.6YR6.3/3.9」とマンセル記号で表記できる

※色票とぴったり一致しない場合は視感評価で少数第一位を決定
※色票とは、実際の色見本のこと（amazonなどで買える）



By SharkD [CC-BY-SA 3.0]

加法混色と減法混色

・混色

- 複数の色の光を混ぜて別の色の光を作ること
- 赤・緑・青をうまく混ぜると任意の色を作れる

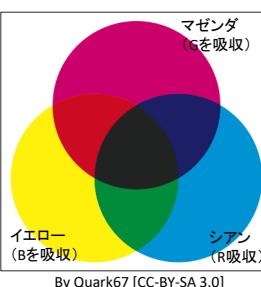
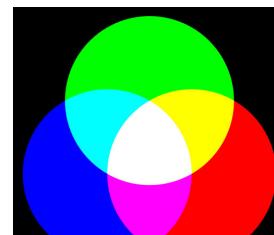
・加法混色

- 複数の色の光が同時に目に入射して生じる混色のこと
- 黒い背景に色を持った光を加えていく
- 通常、赤・緑・青の3色の光を利用する

・減法混色

- 白い紙に複数の塗料を混ぜて色を作る、または、複数重ねた色つきフィルタ越しに白色光を見るような混色
- フィルタや塗料は白色光から特定スペクトルを除去する
- 通常、シアン・マゼンダ・イエローの3色を利用する

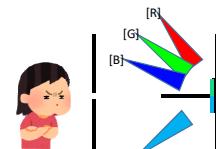
→ 3色の混合で任意の色ができるのって実は結構不思議では？音は混ぜられる？



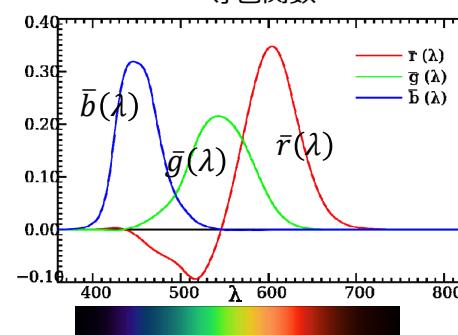
CIE RGB系

・原刺激として以下の単色光を用意

- [R] : 700nm,
- [G] : 546.1nm,
- [B] : 435.8nm
- [R]:[G]:[B] = 1.0 : 4.5907 : 0.0607
で混色すると白色に（測光量単位）



等色関数



・等色実験: 様々な波長の単色光に対し等色となる原刺激の光量を測定する

→ 等色関数 $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ が得られる

・CIE: 国際照明委員会は1931年にGuildのデータ（観測者7人）とWrightのデータ（観測者10人）の平均を取って等色関数を採用

等色 (色合わせ: color matching)

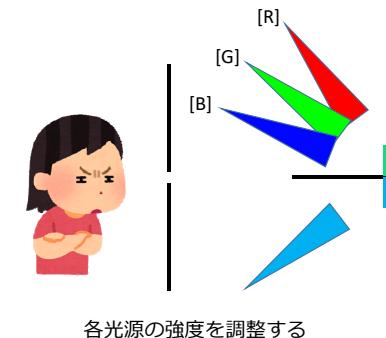
- 試料光[F]と見た目の色が一致するよう、赤色[R], 緑色[G], 青色[B]の混合割合を調整する手法
- [R][G][B]それぞれをr,g,bだけ混合して、試料光[F]と同じ見た目が得られたとき

$$[F] \equiv r[R] + g[G] + b[B]$$

と表記する

※等色は「人が等しく見える」ように混合した割合である

※等号の左辺の色と右辺の色に含まれるスペクトル分布が同じという意味ではない

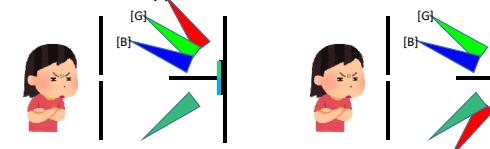


CIE RGB系

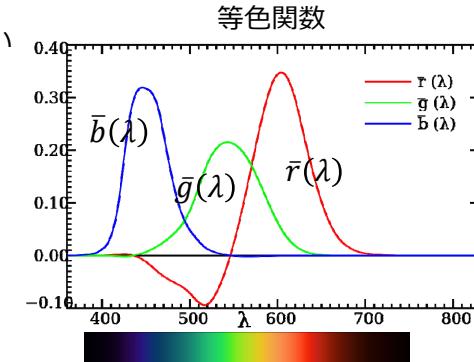
・等色関数 $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ に負値がある…

- 『赤緑青の原刺激で任意の色を表現できる』は正しくなく、どう混ぜても色合せできない単色光があった

・試料光側に色を足して色合せした



等色関数



CIE RGB系

- 等色関数 $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ があると…
- 任意の“単色光”を再現する原刺激の混合割合が分かる
- 単色でない任意の光 F も再現できる

$$r = \int_0^{\infty} F(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda,$$

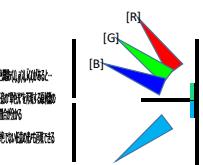
$$g = \int_0^{\infty} F(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda,$$

$$b = \int_0^{\infty} F(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda,$$

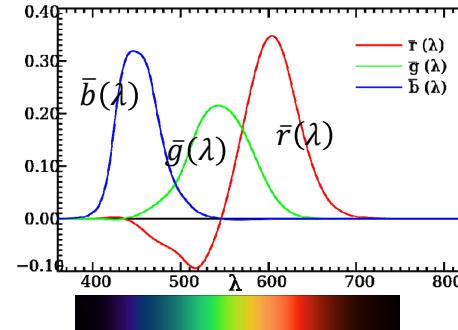
※ $F(\lambda)$ は再現したい光の分光分布

※ r, g, b は $F(\lambda)$ を再現する原刺激の混合量

これで色を (r, g, b) の 3 値で表現できるようになった。



等色関数



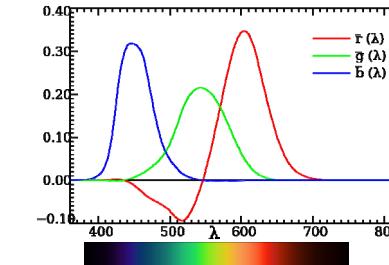
CIE RGB 色度図

等色関数より任意の単色光を表現する
R700nm, G546.1nm, B435.8nm の割合が分かる

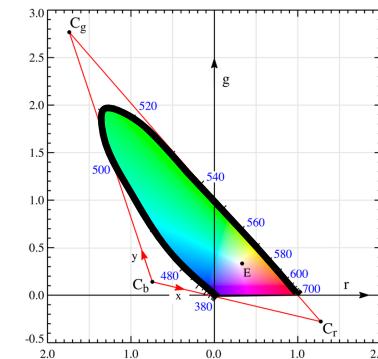
明るさを無視するため下記の通り変換

$$r = R/(R+G+B), \quad g = G/(R+G+B), \quad b = B/(R+G+B)$$

※ $r+g+b=1$ に注意



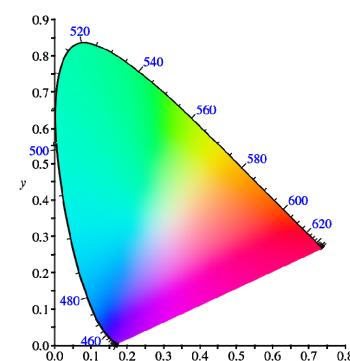
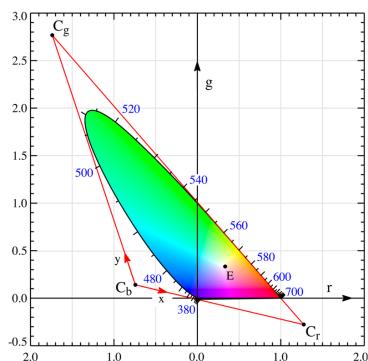
すべての色を $r-g$ 空間にプロットしたものを **色度図** と呼ぶ



- 外縁部分が単色光に対応
- 任意の色は外縁の内側に存在（単色光の混合で表現可能）
- r が負値もとる

CIE RGB → XYZ色度図

- CIE RGB 色度図は r が負値を含むため扱いにくい
- 座標変換を施した CIE XYZ 色度図が広く用いられる、



まとめ：表色系

- 色を定量的に表すことを **表色** といい、表色のための一連の規定と定義を **表色系** という。
- 顯色系：色の見え方に基づいて構築された体系（マンセル表色系）
- 混色系：色の混合割合に基づいて構築された体系（CIE-RGB）
- 加法混色と減法混色
- 等色（色合わせ：color matching）
- CIE-RGB表色系