

# コンピュータビジョンA

第14回

2025年11月21日

峰松翼

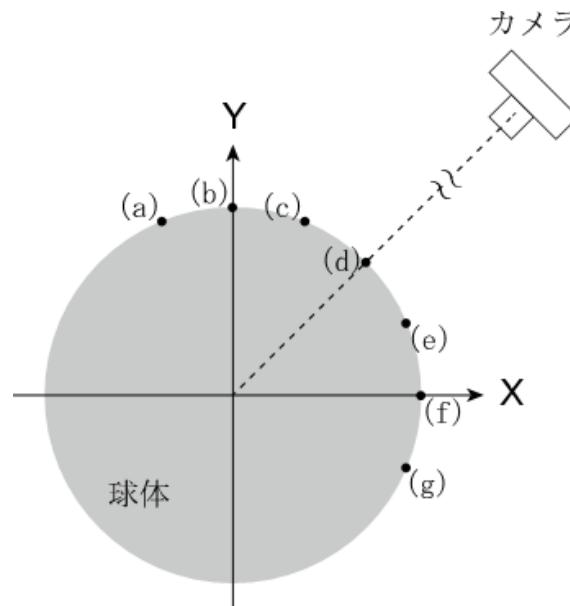
# 前回の内容

- 第16章：光学的解析とシーンの復元
  - 光学的解析
  - 放射量
  - 反射

# 演習2

平行光線に照らされたツヤのある球体をカメラで撮影する。撮影状況を真横から見ると、球体・光源・カメラの関係は下図のようになる。地点(a)～(g)、球体の中心、カメラの光学中心は同一平面(図中のXY平面)にあり、平行光線とカメラの光軸はXY平面に平行であるとする。また、カメラは球体から十分遠方にあるものとする。

(2) 球体がX軸正の方向からの平行光線とY軸正の方向からの平行光線の両方(2つの平行光線の明るさは等しいとする)に照らされているとき、①最も強い拡散反射光が観察される地点、②最も強い鏡面反射光が観察される地点は、球体表面の地点(a)～(g)のどれか。最も適するものをそれぞれ選んで記号で答えよ。複数ある場合は、すべて答えよ。なお、鏡面反射は十分に鋭く、正反射方向から外れると急激に暗くなるものとせよ。



# 今回の内容

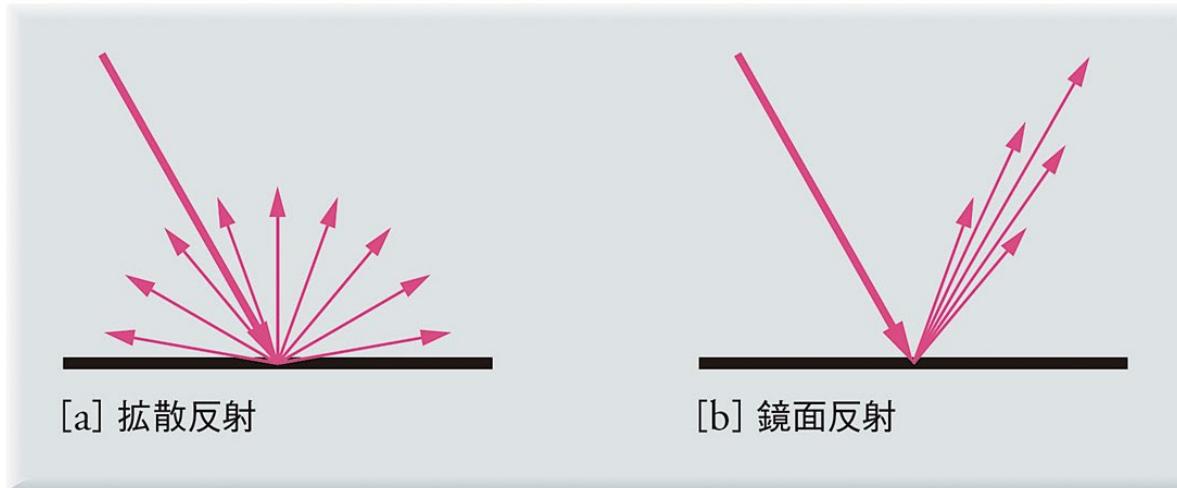
- 第16章:光学的解析とシーンの復元
  - 反射成分の分離
  - 形状の復元
  - 反射特性の復元
  - 照明環境の復元
  - 形状・反射特性・照明環境すべての復元

# 第16章の内容

- 光学的解析とシーンの復元
  - 光学的解析
  - 放射量
  - 反射
  - 反射成分の分離
  - 形状の復元
  - 反射特性の復元
  - 照明環境の復元
  - 形状・反射特性・照明環境すべての復元

# 反射成分の分離

- 2種類の反射
  - 拡散反射と鏡面反射

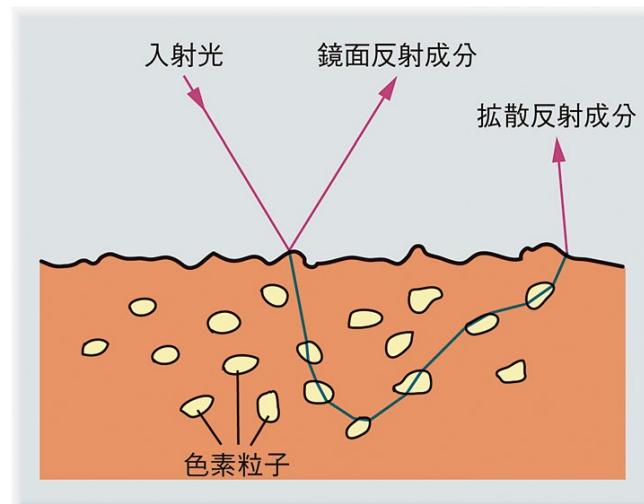


- 様々な手法は拡散反射を仮定  
⇒ 前処理として鏡面反射成分を除去

# 2色性反射モデル

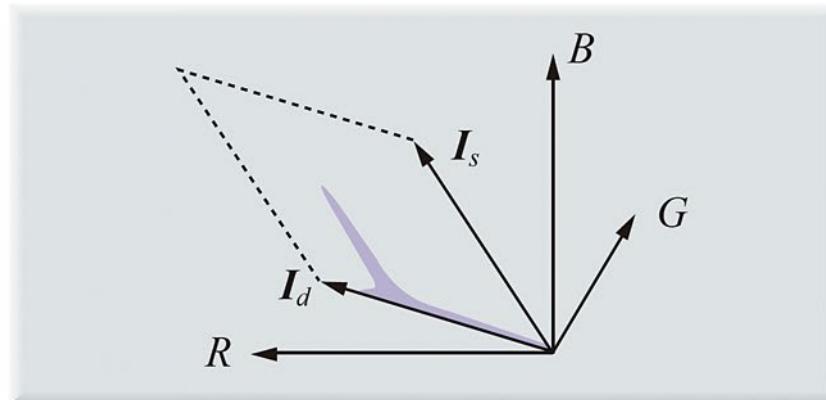
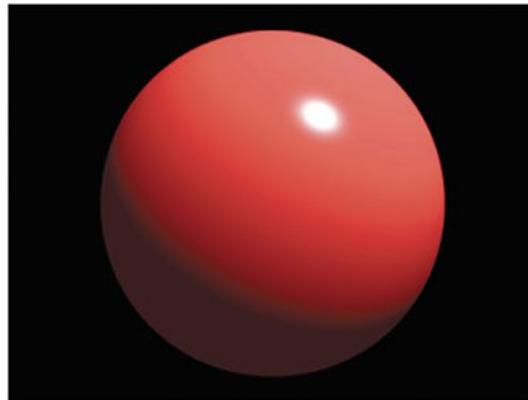
- 鏡面反射の色 ≠ 拡散反射の色
  - 鏡面反射成分: 境界面において直ちに反射  
⇒ 光源と同じ色
  - 拡散反射成分: 物体表面層において散乱  
⇒ 物体固有の色に依存

$$L(\lambda) = I_e(\lambda)K_d(\lambda)\cos\theta + I_e(\lambda)(\cos\alpha)^n$$



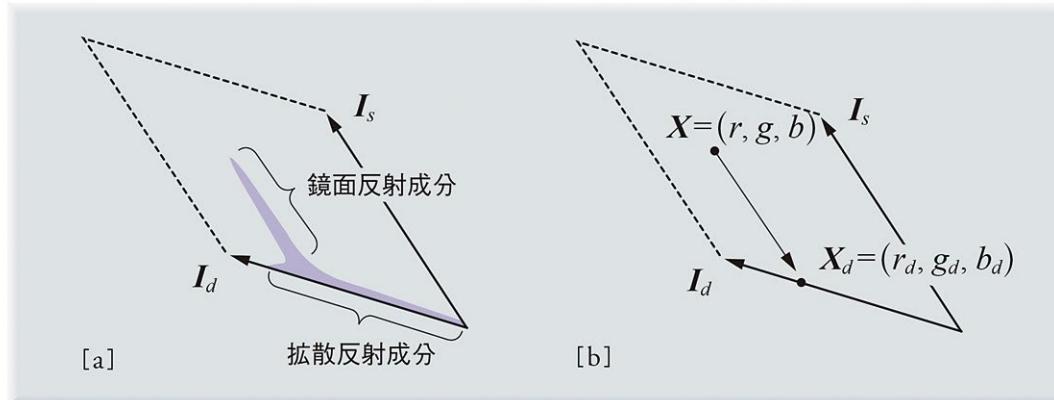
# 色に基づく分離

- 色の違いを利用
  - 物体表面の色は2つのベクトルの線形結合： $w_d \mathbf{I}_d + w_s \mathbf{I}_s$
  - 均質な物体  
⇒ 物体表面上の色はRGB空間内の平面上に存在



# 色に基づく分離の例

- L字型 or T字型の分布
  - 拡散反射成分の軸に射影

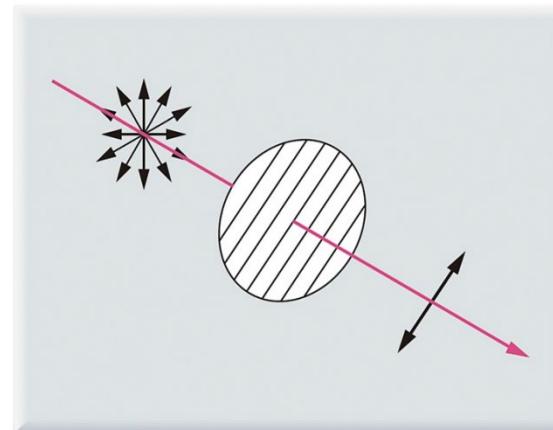
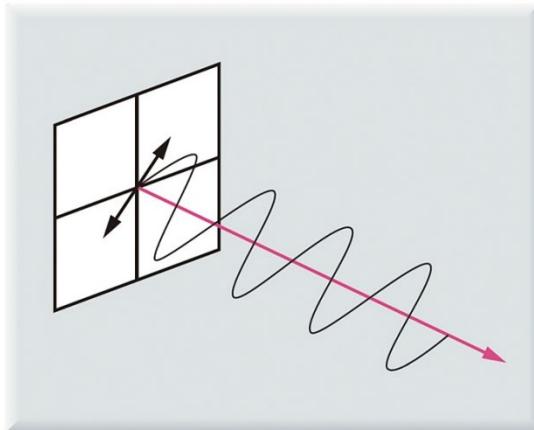


- 物体ごとに反射成分を分離



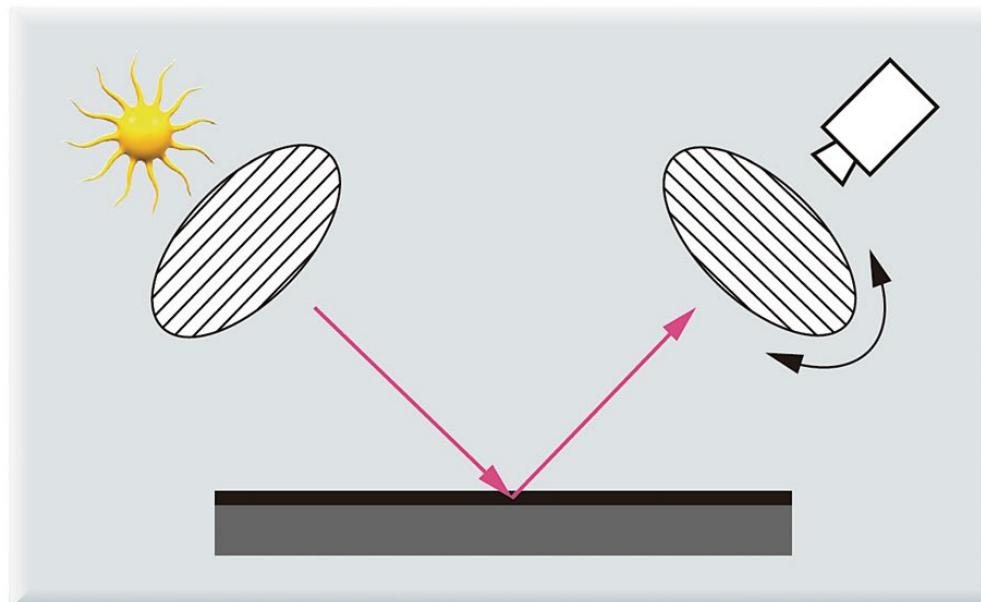
# 偏光

- 波の性質(波動性)
  - 進行方向に垂直な方向に振動
  - 通常の光:  
様々な方向に振動する光が混在(非偏光)
  - 直線偏光板を透過した光:  
特定の方向にのみ振動



# 偏光に基づく分離

- 偏光状態の違いを利用
  - 鏡面反射成分: 偏光状態を保存
  - 拡散反射成分: 非偏光
  - 光源とカメラの前に直線偏光板を置いてどちらかを回転



# 偏光に基づく分離の例

- 明るさの変動を手掛かり
  - 直線偏光板を回転させたときの最大値と最小値

$$L_{\max} = \frac{1}{2} L_d + L_s$$

$$L_{\min} = \frac{1}{2} L_d$$

- 分離結果



[a] 鏡面反射成分と拡散反射成分からなる画像



[b] 鏡面反射成分



[c] 拡散反射成分

# 第16章の内容

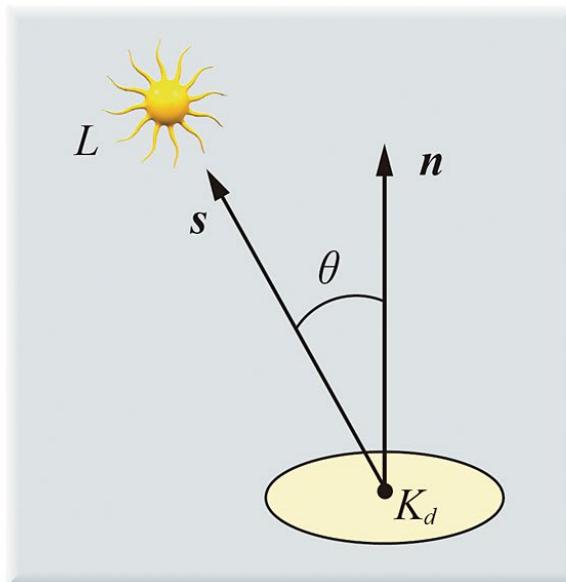
- 光学的解析とシーンの復元
  - 光学的解析
  - 放射量
  - 反射
  - 反射成分の分離
  - 形状の復元
  - 反射特性の復元
  - 照明環境の復元
  - 形状・反射特性・照明環境すべての復元

# 形状・反射特性・照明環境の復元

- 2つを既知として1つを復元
  - 照度差ステレオ(反射特性・照明環境既知)
  - 反射モデルパラメタの推定(形状・照明環境既知)
  - インバースライティング(形状・反射特性既知)
- 3つすべてを復元
  - 幾何学的解析と光学的解析の融合:  
多視点インバースレンダリング(多数の入力画像)
  - データ駆動型アプローチ:  
深層学習(1枚の入力画像+大量の学習画像)

# 明るさに基づく形状復元

- 物体表面の明るさは面の向きに依存
  - ランバートモデル：  
光源方向と面の向き(法線)の内積に依存

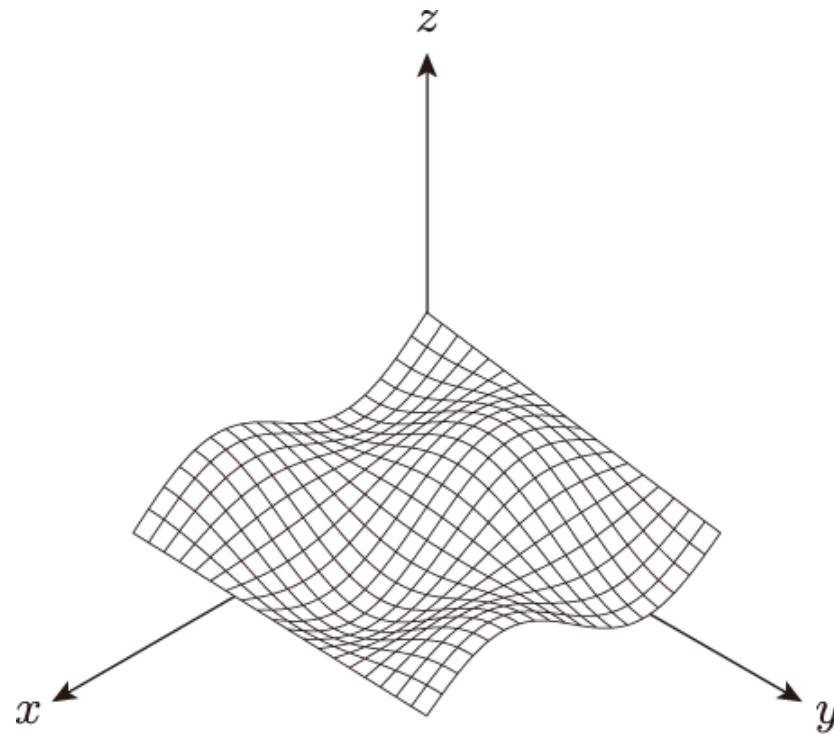


⇒ 明るさを手掛かりにして法線を推定

# 3次元形状の記述：高さ

- 高さ(奥行き)
  - 基準となる  $xy$  平面からの高さ:

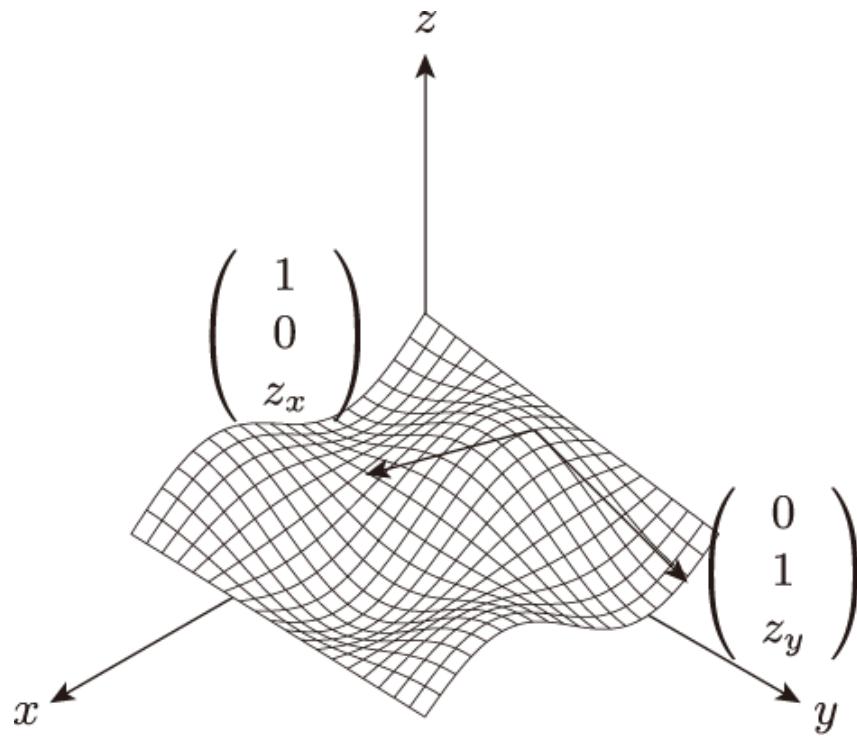
$$z = f(x, y)$$



# 3次元形状の記述：勾配

- 勾配
  - 物体表面の高さの偏微分：

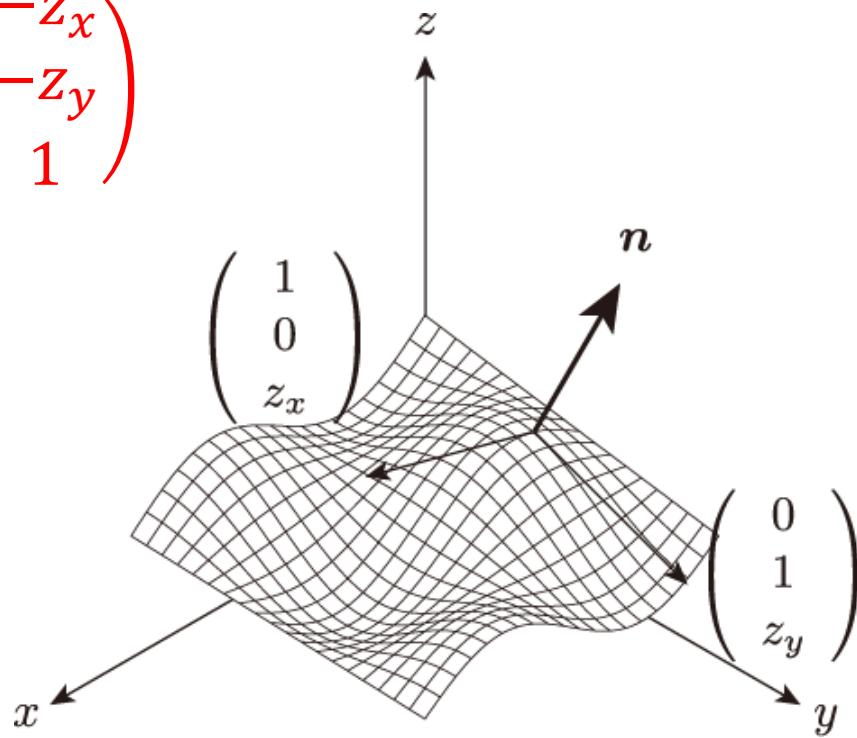
$$\begin{pmatrix} z_x \\ z_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \partial z / \partial x \\ \partial z / \partial y \end{pmatrix}$$



# 3次元形状の記述：法線

- 法線
  - 物体表面に垂直な外向きの単位ベクトル：

$$\begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{z_x^2 + z_y^2 + 1}} \begin{pmatrix} -z_x \\ -z_y \\ 1 \end{pmatrix}$$



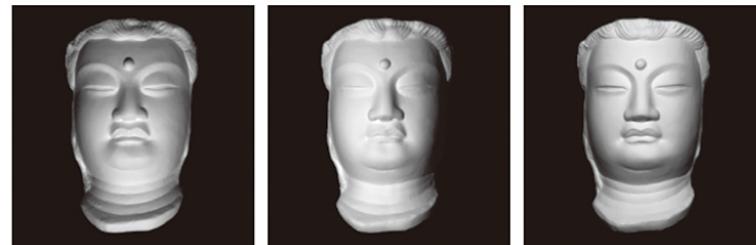
# 位置の推定と法線の推定

- 位置(奥行き)の推定: 第15章
  - 多眼ステレオ:  
視点を変化させたときの対応点を手掛かり(三角測量)
  - 奥行きを微分すると勾配( $\Rightarrow$ 法線)
- 法線の推定: 第16章
  - 照度差ステレオ:  
光源を変化させたときの明るさの変化を手掛かり
  - 勾配( $\Leftarrow$ 法線)を積分すると奥行き

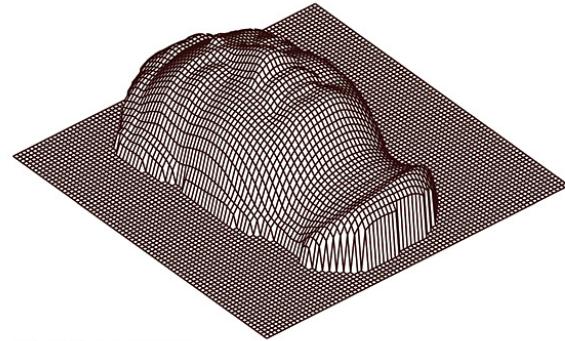
※位置推定と法線推定は相補的

# 照度差ステレオ

- 物体表面の法線を推定する技術
  - 複数枚の入力画像
  - カメラ・被写体は固定、光源方向のみ変化
  - 物体表面の明るさが光源方向に依存することを手掛り



[a] 入力画像



[b] 推定された形状

# 法線の推定方法①

- 最少で3枚の画像から推定

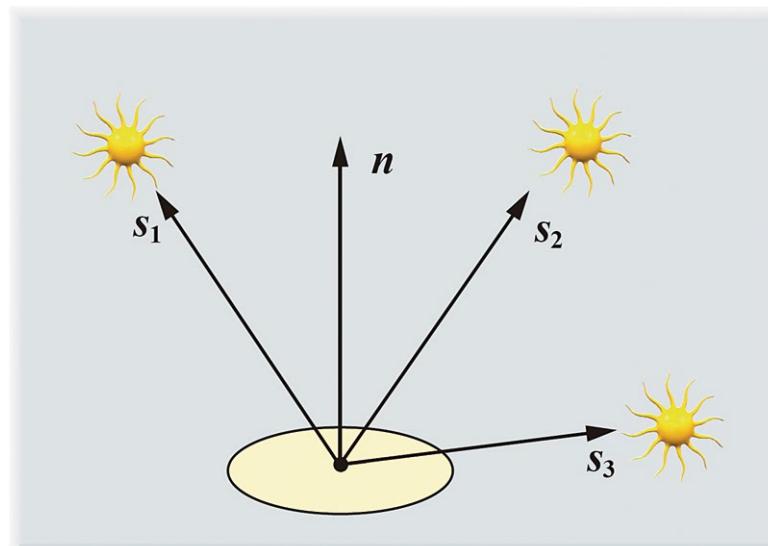
- ランバートモデル:

$$i = K_d L \cos \theta = (L\mathbf{s})^T (K_d \mathbf{n}) = \tilde{\mathbf{s}}^T \tilde{\mathbf{n}}$$

- 連立一次方程式に帰着

$$\mathbf{i} = (i_1, i_2, i_3)^T$$

$$\mathbf{i} = (\tilde{\mathbf{s}}_1, \tilde{\mathbf{s}}_2, \tilde{\mathbf{s}}_3)^T \tilde{\mathbf{n}} = \mathbf{S} \tilde{\mathbf{n}}$$



# 法線の推定方法②

- 逆行列を用いた解法
  - 光源方向が線形独立なとき

$$\tilde{\mathbf{n}} = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{i}$$

- 法線(単位ベクトル)と拡散反射率の計算

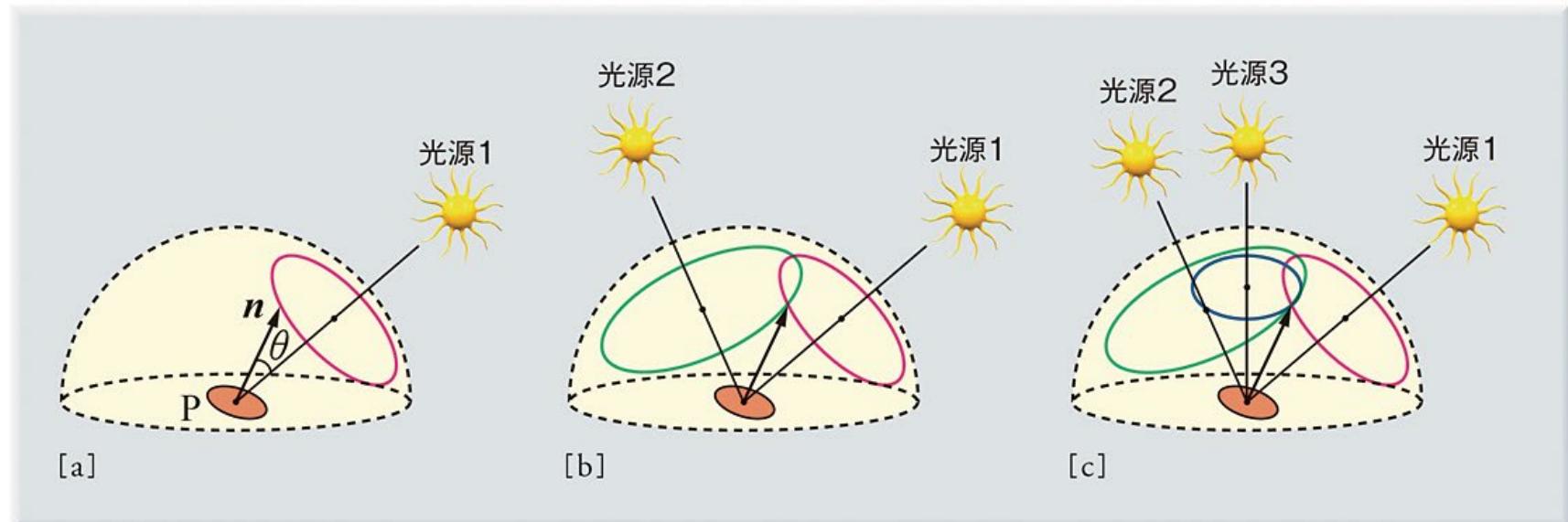
$$\mathbf{n} = \tilde{\mathbf{n}} / |\tilde{\mathbf{n}}|$$

$$K_d = |\tilde{\mathbf{n}}|$$

- 入力画像が4枚以上のとき  
⇒ 擬似逆行列を利用

# 物理的な意味

- なぜ3枚の画像から推定できるのか?
  - 各光源は法線方向を円上に拘束
  - 3枚の画像(3つの光源)から法線が一意に決定

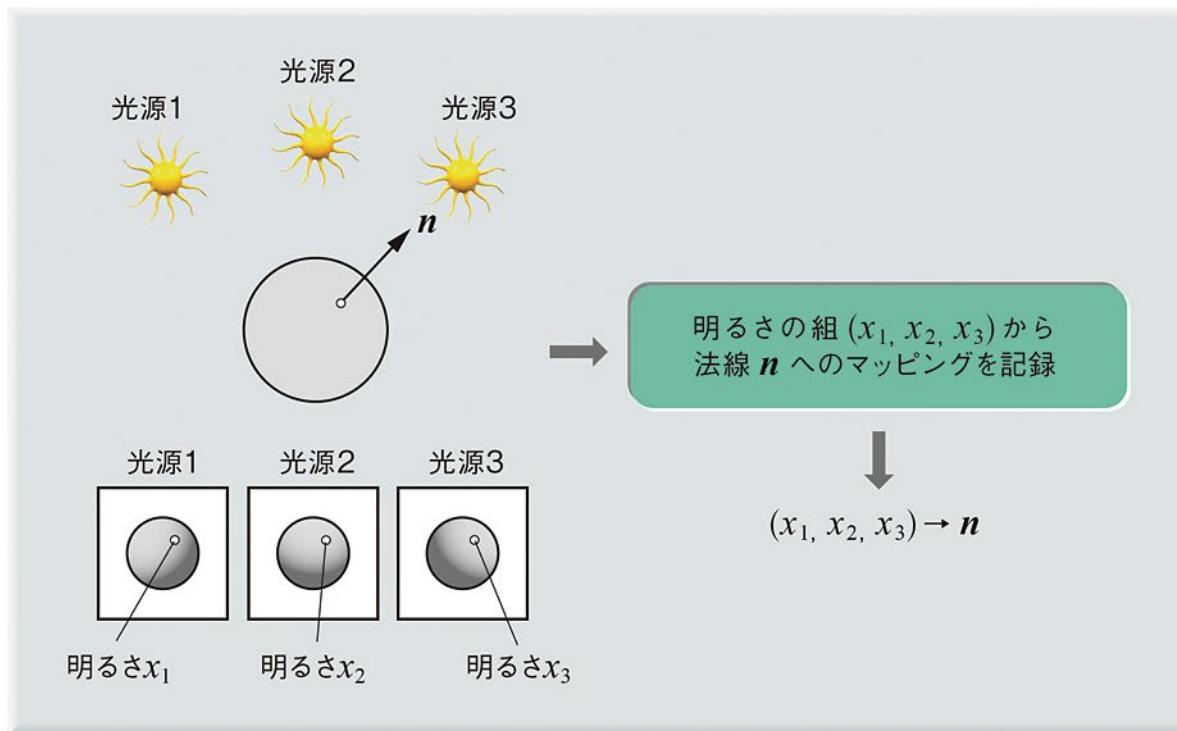


# 関連する技術

- 未較正照度差ステレオ
  - 光源の明るさも方向も未知の照度差ステレオ
  - 形状復元に曖昧さあり:  
全入力画像を生成し得る形状・反射率・光源が無数に存在
  - 光学的な“だまし絵”
- Shape from Shading : SfS
  - 1枚の画像から物体形状を復元
  - 一般に未知数の数 > 式(拘束条件)の数
  - 事前知識が必要

# 参照物体を用いた照度差ステレオ

- 非ランバート面への拡張
  - 形状既知・同一反射特性の参照物体を事前に撮影
  - マッチングの問題に帰着



# 演習1

ランバートモデルに従う物体表面上のある点を3つの光源で順に照らしたときに、その明るさは順に、50, 100, 50であった。各光源の光源ベクトル(光源の明るさ×方向)が $(1,0,0)^T, (0,2,0)^T, (0,0,1)^T$ のとき、この点の法線を求めよ。

# 第16章の内容

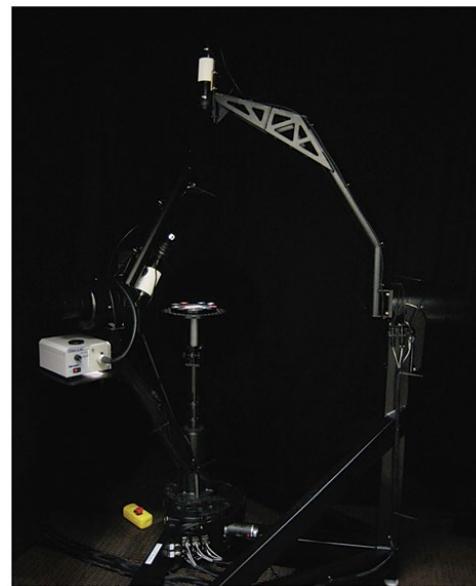
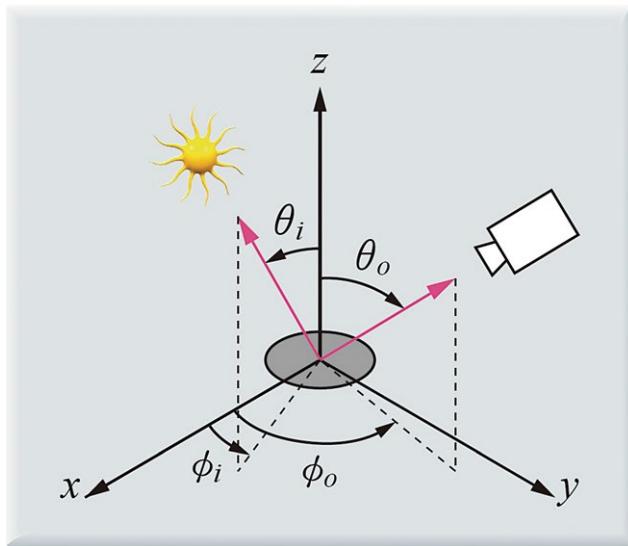
- 光学的解析とシーンの復元
  - 光学的解析
  - 放射量
  - 反射
  - 反射成分の分離
  - 形状の復元
  - **反射特性の復元**
  - 照明環境の復元
  - 形状・反射特性・照明環境すべての復元

# 反射特性の推定

- 2つのアプローチ
  - 試料のBRDFの計測
  - 実物体の反射モデルパラメータの推定
- 応用例
  - 写実的な画像の生成
  - 物体認識
  - 質感の理解・評価(e.g. 自動車・家電の塗装)

# BRDFの計測

- ゴニオリフレクтомータ
  - 試料の4次元(or 3次元)BRDFを計測
  - 光源とセンサをそれぞれ2軸で回転
  - 一度の測定で一組の  $(\theta_i, \phi_i, \theta_o, \phi_o)$



# 単純な計測方法の問題点

- 膨大な計測回数・計測時間が必要

- 1度刻みの計測

$$4\text{次元BRDF}: 90 \times 360 \times 90 \times 360 = 1.0 \times 10^9 \text{回}$$

$$3\text{次元BRDF}: 90 \times 90 \times 360 = 3.0 \times 10^6 \text{回}$$

# 単純な計測方法の問題点

- 膨大な計測回数・計測時間が必要

- 1度刻みの計測

- 4次元BRDF:  $90 \times 360 \times 90 \times 360 = 1.0 \times 10^9$ 回

- 3次元BRDF:  $90 \times 90 \times 360 = 3.0 \times 10^6$ 回

- 1回あたり1秒(露光時間+光源・センサの回転)

- 4次元BRDF: 約33年

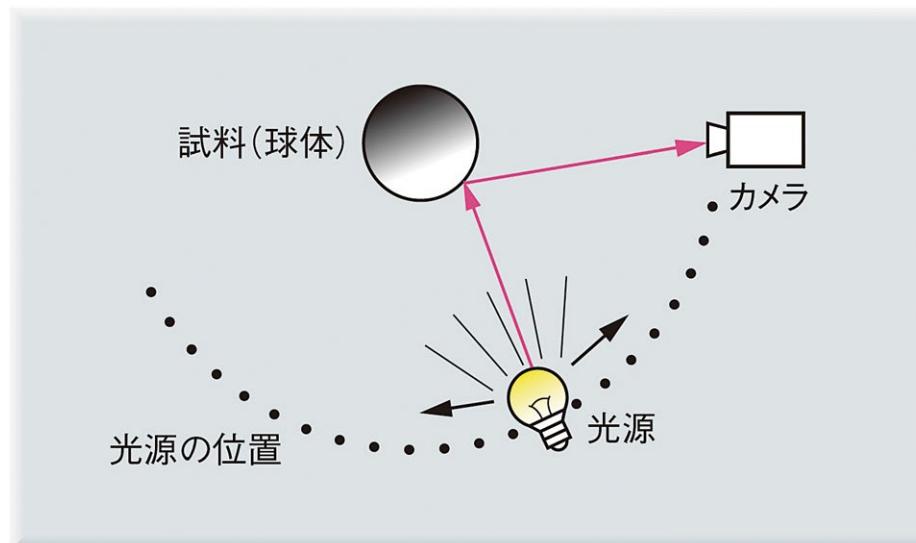
- 3次元BRDF: 約34日

⇒ 粗いサンプリングは可能・密なサンプリングは困難

# BRDFの効率的な計測

- 画像ベースの計測

- 一度に多数の  $(\theta_i, \phi_i, \theta_o, \phi_o)$  の組を計測
- 試料や光学系を工夫  
⇒ 密なサンプリングを実現



# 実物体の反射特性の推定

- 試料の反射特性の計測
  - (暗に)一様な反射特性を仮定
  - 試料や光学系の工夫により可能
- 実物体の反射特性の推定
  - 物体表面上で反射特性が変化:  
spatially varying BRDF
  - 各点での計測は非現実的  
⇒ **特定の反射モデルを仮定してそのパラメータを推定**

# 反射モデルパラメータの推定

- 最小二乗法による推定(最尤法)
  - 入力画像の画素値を最も良く再現するパラメタの推定
  - 例:Lambertモデル+Torrance-Sparrowモデル

$$L_c = K_{d,c} \cos \theta_i + K_s \frac{e^{-\beta^2/\sigma^2}}{\cos \theta_o}$$



※通常は形状は既知(事前に計測済)

# 写実的な画像生成への応用

- 光沢のある実物体
  - 入力画像とその再現

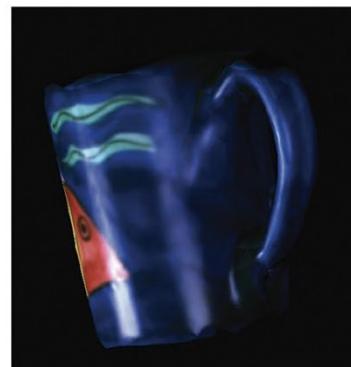


[a] 入力画像



[b] 入力画像の再現

- 物体姿勢・照明条件の異なる画像の生成



# 第16章の内容

- 光学的解析とシーンの復元
  - 光学的解析
  - 放射量
  - 反射
  - 反射成分の分離
  - 形状の復元
  - 反射特性の復元
  - 照明環境の復元
  - 形状・反射特性・照明環境すべての復元

# 光源の種類

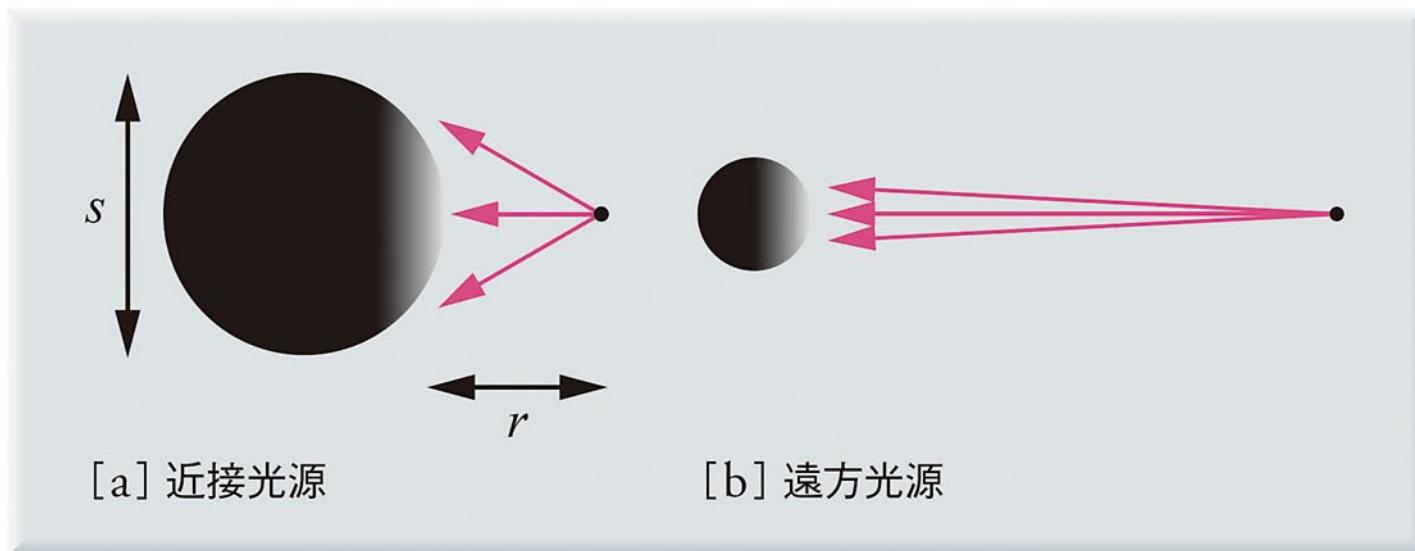
- 近接光源と遠方光源

- 近接光源：

- 被写体に近い・見かけの明るさと方向が変化

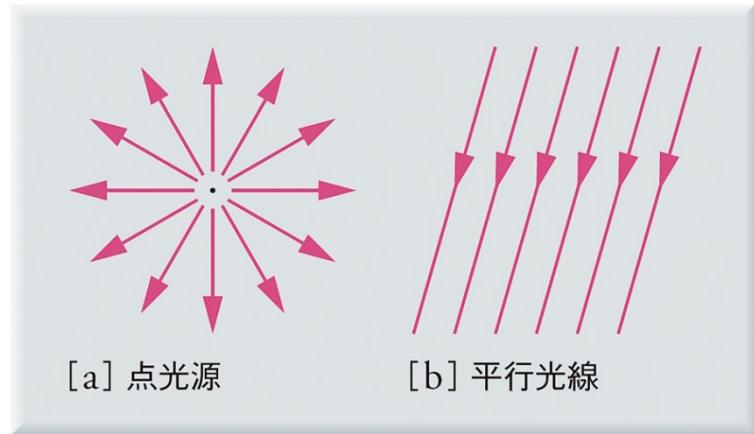
- 遠方光源：

- 被写体から遠い・見かけの明るさと方向は一定

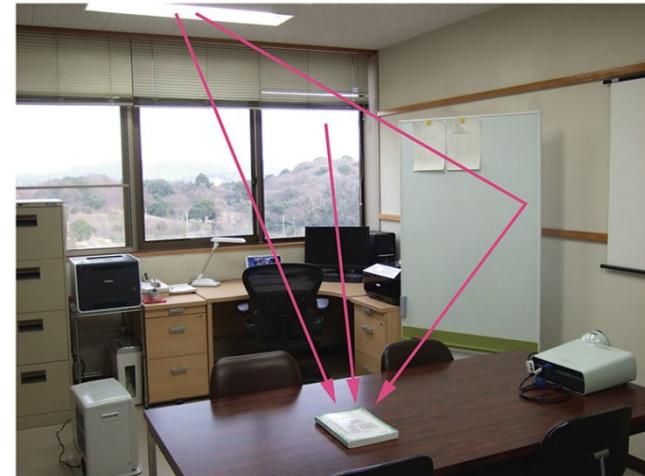


# 光源の表現

- 理想的なモデル
  - 点光源
  - 平行光線



- 実世界の照明環境
  - 2次元分布: $L(\theta, \phi)$   
様々な方向から被写体に入射する光の強度

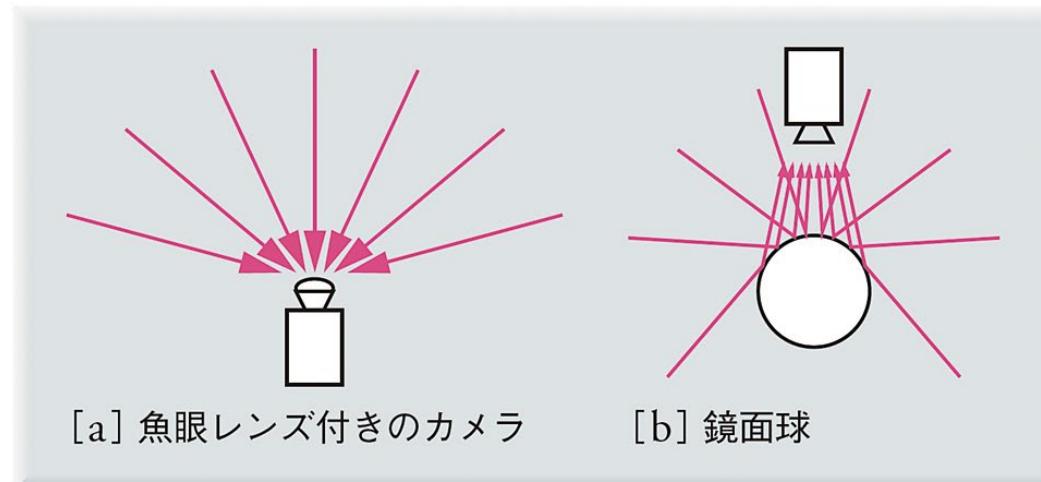


# 照明環境の計測と推定

- イメージベーストライティング (image-based lighting)
  - 画像ベースの光源分布の計測
  - 能動的なアプローチ
  - 計測した光源分布を画像生成に利用
- インバースライティング (inverse lighting)
  - 所与の画像の陰影を手掛かりにして光源分布を推定
  - 受動的なアプローチ
  - 推定した光源分布を画像生成に利用

# 光源分布の計測

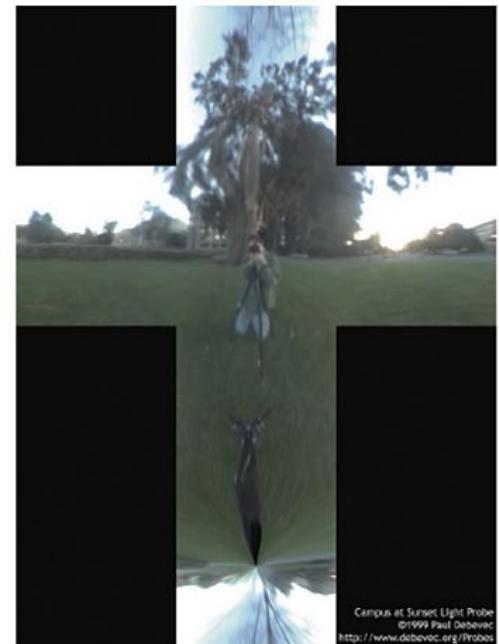
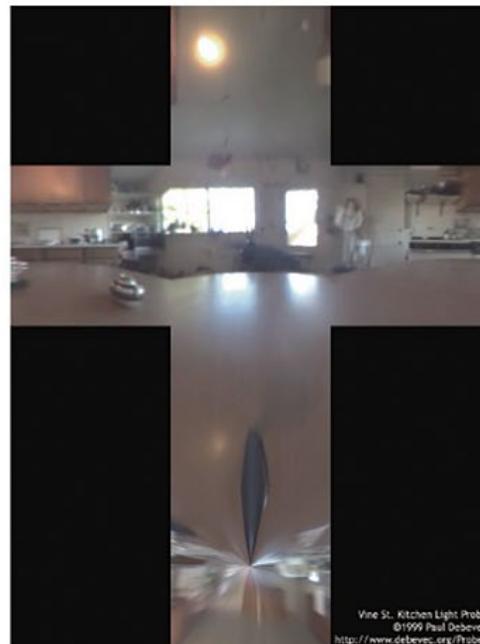
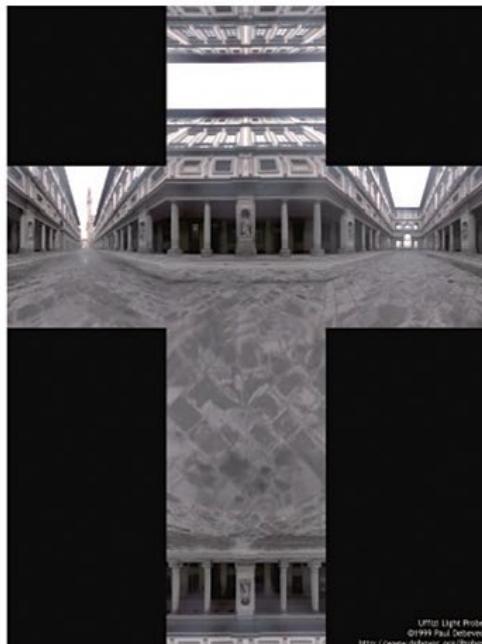
- 鏡面球を用いた計測
  - 鏡面球に全方位の明るさ(光源)が映り込む
- 魚眼レンズ付きカメラを用いた計測
  - 魚眼レンズを用いて広視野角の光源を一度に獲得



※いずれもHDR撮影が必要

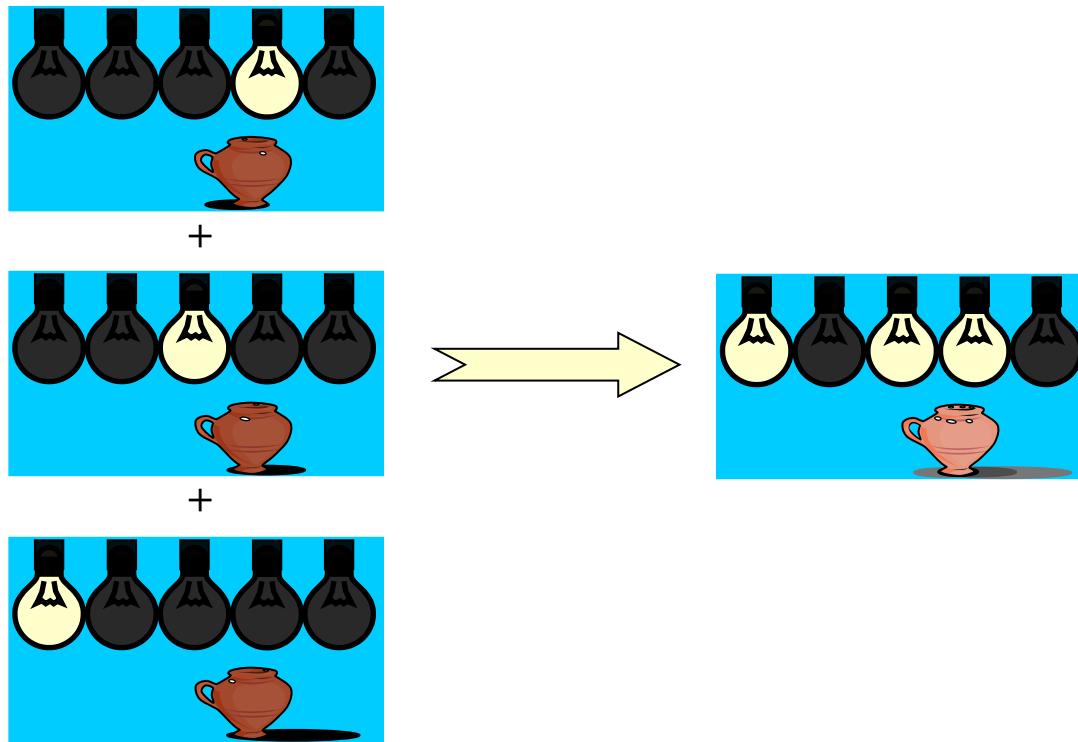
# 光源分布計測の例

- 環境マップ
  - 2次元分布の表現:  
立方体に貼り付け・天頂角と方位角のマップ



# インバースライティングの原理

- 重ね合わせの原理
  - 画像の線形性：  
複数光源下の画像 = 単一光源下の画像の線形結合



# インバースライティングの処理の流れ

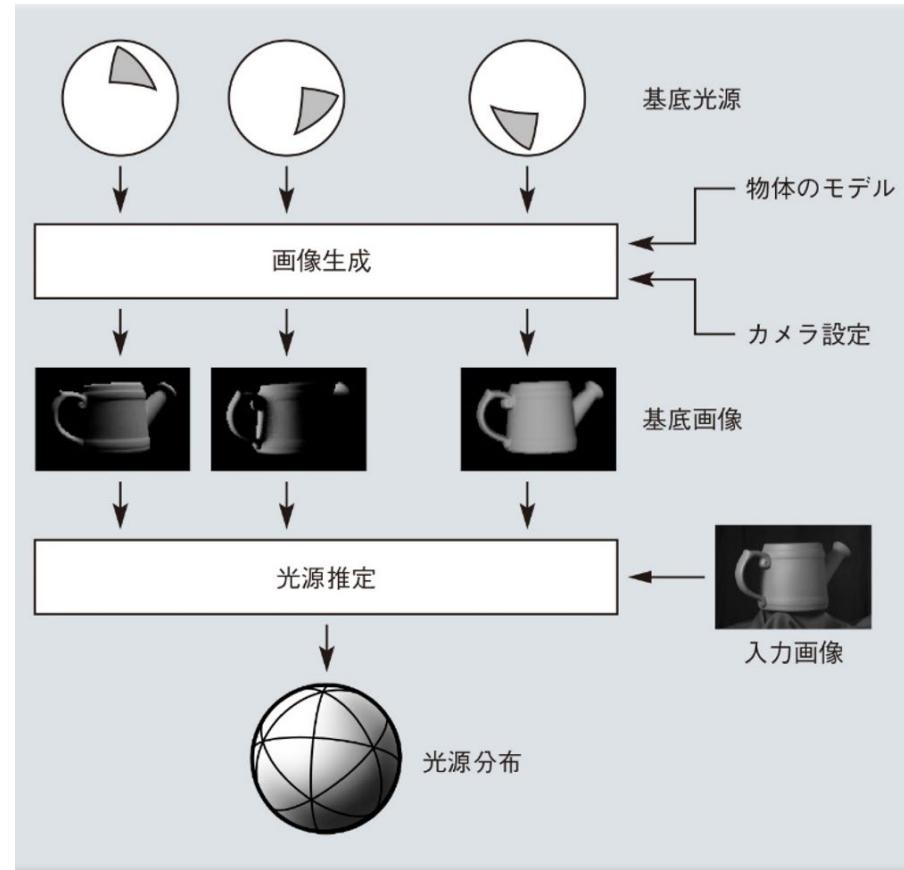
- 線形最適化に帰着
  - 光源分布の線形結合表現

$$L(\theta, \phi) = \sum c_n L^{(n)}(\theta, \phi)$$

- 画像の線形結合表現

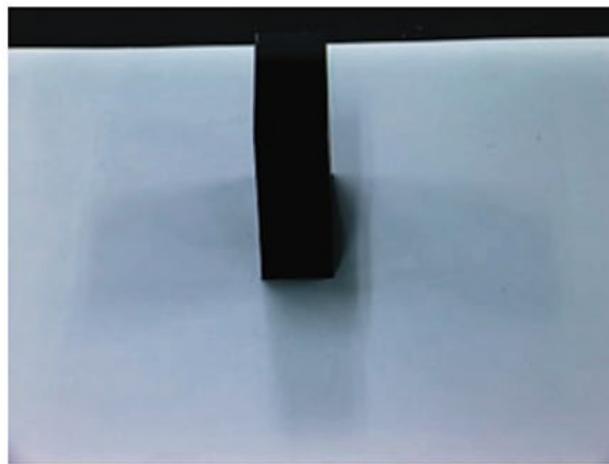
$$i_m = \sum c_n R_m(L^{(n)})$$

- 結合係数の推定



# 光源分布推定の例

- 影に基づく光源分布推定
  - ある物体が他の物体に落とす影を手掛かりに推定
  - 日時計と同じ



[a] 入力画像



[b] 推定された光源分布



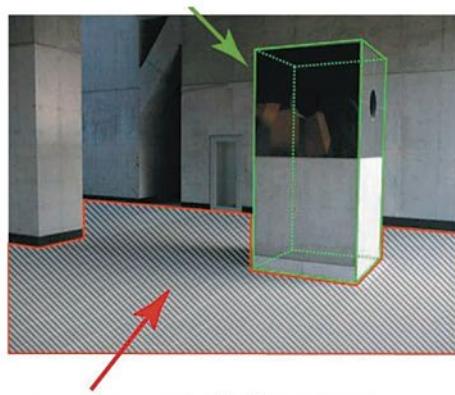
[c] 直接観察した光源分布

# 仮想物体の合成への応用

- 推定した光源分布の利用
  - 違和感の無い(少ない)合成を実現
  - 拡張現実・複合現実への展開



[a] 入力画像



キャストシャドウが投影される平面



[c] 仮想物体の自然な合成

# 演習2

明るさの調整できる3つの光源A, B, Cに照らされた物体をカメラで撮影する.

光源Aの明るさを1とし, 光源Bと光源Cの明るさを0とすると,

物体表面上の地点1, 地点2, 地点3の画素値は, それぞれ80, 40, 0であった.

また, 光源Aと光源Cの明るさを0とし, 光源Bの明るさを1とすると,

地点1, 地点2, 地点3の画素値は, それぞれ40, 80, 0であった.

さらに光源Aと光源Bの明るさを0とし, 光源Cの明るさを1とすると,

地点1, 地点2, 地点3の画素値は, それぞれ0, 0, 60であった.

ここで, 光源A, B, Cの明るさをそれぞれa, b, cとすると,

地点1, 地点2, 地点3画素値は, 80, 80, 40であった.

(1)このとき, a, b, cの関係を表す連立方程式を述べよ.

(2)a, b, cの値を求めよ.

# 第16章の内容

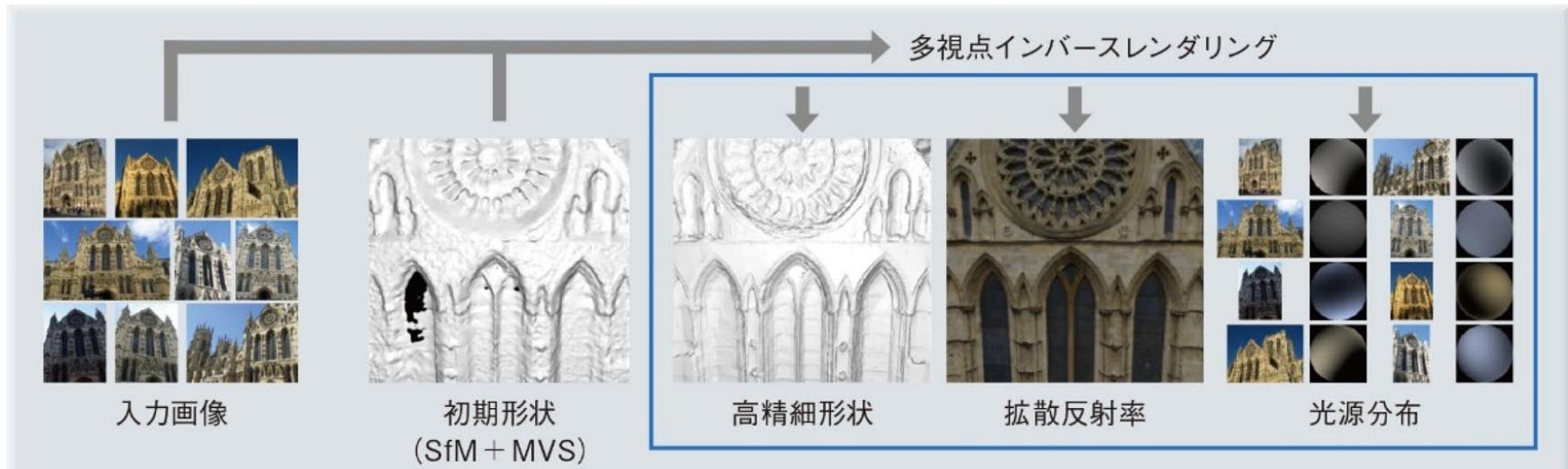
- 光学的解析とシーンの復元
  - 光学的解析
  - 放射量
  - 反射
  - 反射成分の分離
  - 形状の復元
  - 反射特性の復元
  - 照明環境の復元
  - **形状・反射特性・照明環境すべての復元**

# 形状・反射特性・照明環境の復元

- 2つを既知として1つを復元
  - 照度差ステレオ(反射特性・照明環境既知)
  - 反射モデルパラメタの推定(形状・照明環境既知)
  - インバースライティング(形状・反射特性既知)
- 3つすべてを復元
  - **幾何学的解析と光学的解析の融合:**  
多視点インバースレンダリング(多数の入力画像)
  - **データ駆動型アプローチ:**  
深層学習(1枚の入力画像+大量の学習画像)

# 幾何学的解析と光学的解析の融合

- 多視点インバースレンダリング
  - 15-5:ストラクチャフロムモーション, 15-3:ステレオビジョン
  - 16-5:照度差ステレオ
  - 16-6:反射モデルパラメタの推定
  - 16-7:インバースライティング



# データ駆動型アプローチ

- 深層学習

- 単一画像から3つすべての復元は不良設定問題
- 幾何学的解析・光学的解析で得られるシーン情報を学習
- 尤もらしい形状・反射特性・照明環境を復元

