

複雑なテクスチャを持つ立体物からの 拡散反射と鏡面反射成分の分離法

張 曉華

次世代コンテンツ研究室
NHKエンジニアリングサービス
Feb. 2003

Content

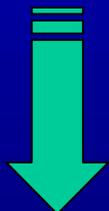
1. 背景と目的
2. 二色性反射モデル
3. 単色物体反射成分の分離
4. 非単色物体反射成分の分離
5. 単一光源の照射での反射成分の分離
6. 二つの光源の照射での反射成分の分離
7. 実験結果
8. むすび

背景と目的(1)

デジタルコンテンツ、電子カタログなどの応用で、
新しい視点画像の合成:

Image-based rendering

Model-based rendering



- 物体の形(Object shape)
- 反射特性
- テクスチャ(鏡面反射成分なし)

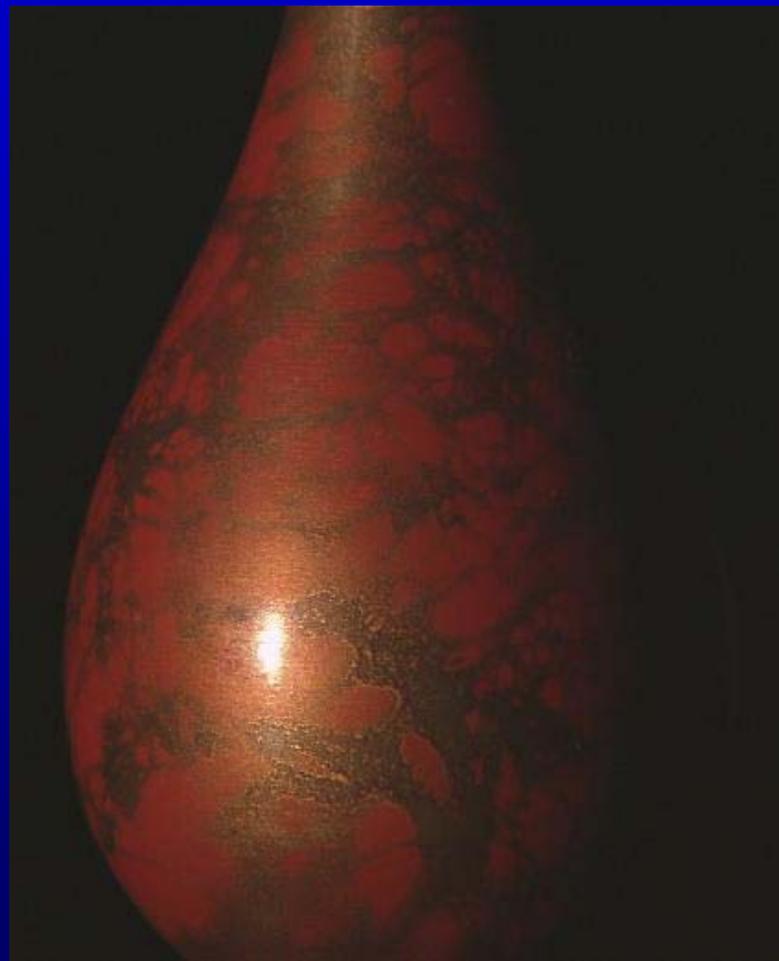
背景と目的(2)

撮影時の照明の影響:

拡散反射成分
鏡面反射成分

避けられないことが多い、
鏡面反射成分を除去した
ほうがいい

Why: 新しい視点画像に
違和感が生じる



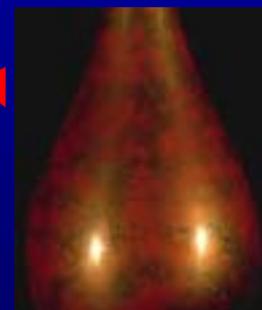
物体と照明による分類

反射成分の分離



単色と多色

複雑なテクスチャ



一光源

二光源

二色性反射モデル(1)

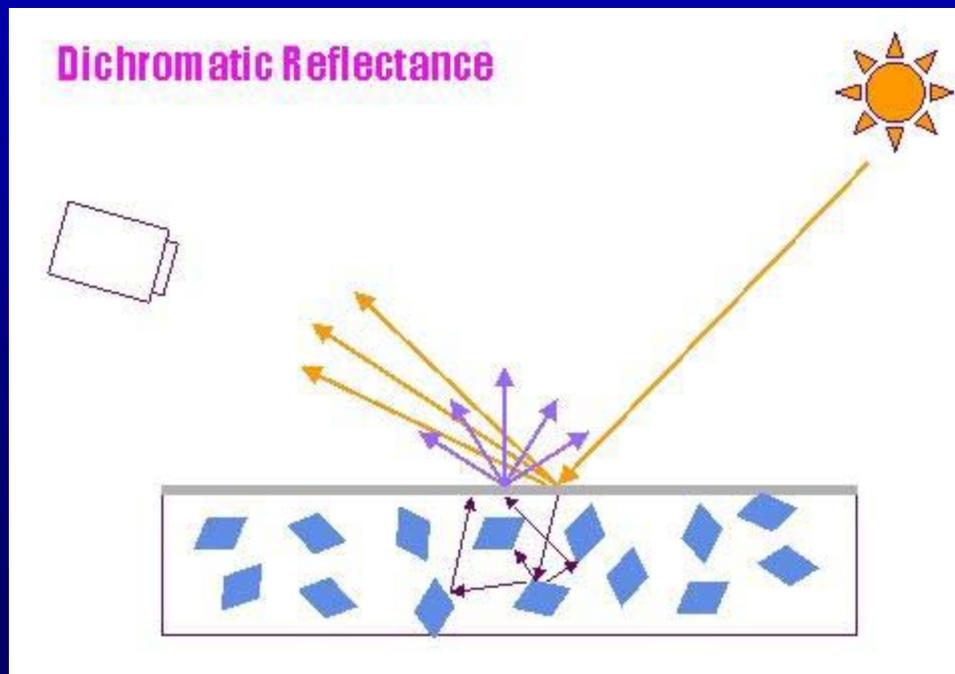
反射の仕方： 物体表面の状態と材質に依存する。

多くの物体の場合、被写体の表面からの反射は拡散反射成分と鏡面反射成分の和で与えられる。

$$I = I_d + I_s$$

拡散反射成分： 色素粒子との光散乱によるもの

鏡面反射成分： 物体表面から反射するもの



二色性反射モデル(2)

二色性反射モデルに関する参考文献:

1. G. J. Klinker, S. A. Shafer, and T. Kanade: **The measurement of highlight in color images**, International Journal of Computer Vision (IJCV), Vol.2, No.1, pp.7-32, 1988.
(Carnegie Mellon University)
2. 富永昌治、大橋伸一郎: **物体のカラー反射モデル**, 情報処理学会論文誌、Vol.33, No.1, pp.37-45, 1992.
(大阪電気通信大学)
3. etc....

二色性反射モデル(3)

補足： CG分野におけるレンダリング用の照明モデル

レンダリングソフトは拡散反射成分と鏡面反射成分以外に環境光も考慮している。

$$I = I_a + I_d + I_s$$

↑
環境光

参考文献：

Robert L. Cook and Kenneth E. Torrance: **A Reflectance Model for Computer Graphics**, ACM Transactions on Graphics, Vol. 1, No. 1, pp.7-24, January 1982.

単色物体反射成分の分離(1)

例:



原画像



拡散反射成分



鏡面反射成分

単色物体反射成分の分離(2)

Multi-Colored object

例:



原画像



拡散反射成分



鏡面反射成分

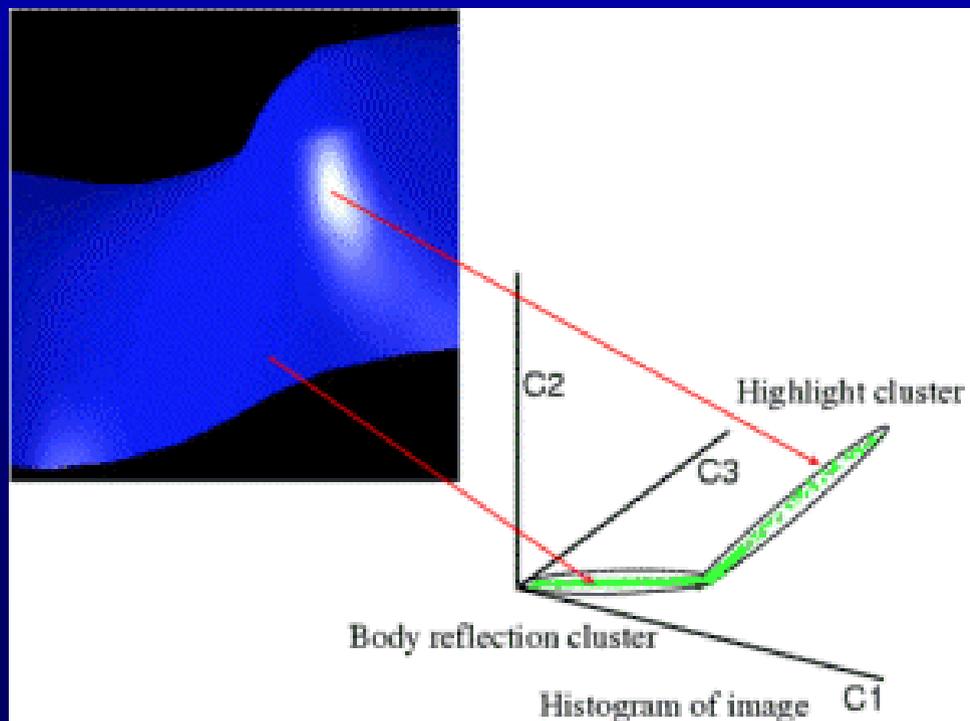
単色物体反射成分の分離(3)

——色空間でカラーヒストグラム解析

物体色クラスタとハイライトクラスタの二つの線形クラスタが結合した形で分布している。

拡散反射成分: 原点から伸びているクラスタ

鏡面反射成分: 物体色のクラスタから枝別れしているクラスタ



単色物体反射成分の分離(4)

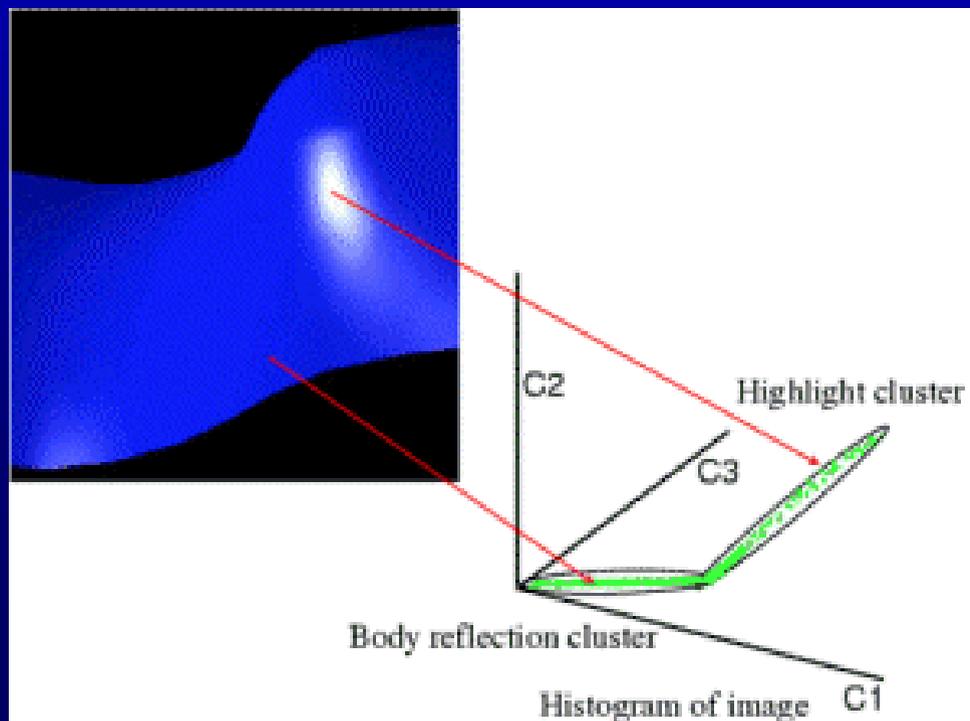
—RGB色空間でのカラーヒストグラム解析

分離方法:

- クラスタリング
- 主成分分析 (Principal Component Analysis)

拡散反射と鏡面反射成分:
RGB空間で分岐点を探す。

カラーデータを
2クラスタに分ける



非単色物体反射成分の分離(1)

しかし、世の中には非単色物体がたくさん存在する



非単色物体反射成分の分離(2)

物体が複雑なテクスチャを持つ場合

→色ごとの分割は不可能

→RGB空間での色解析は困難

複数の画像が必要

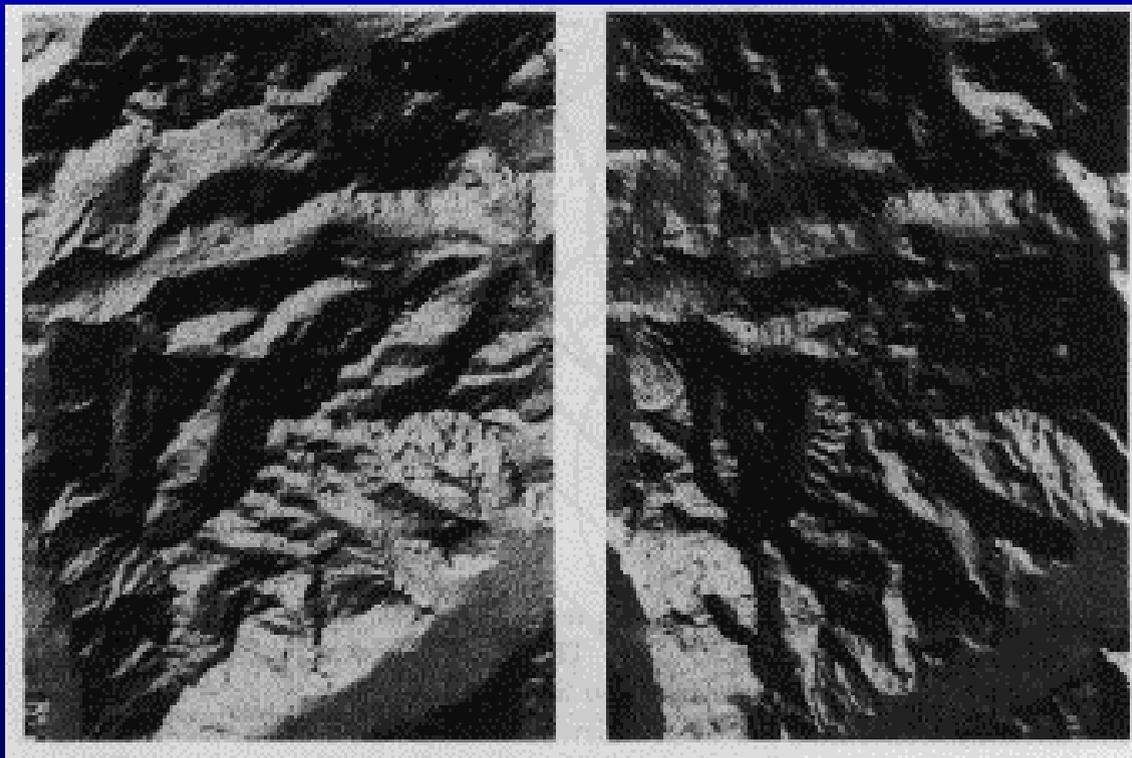
代表的な分離手法:

1. Photometricステレオ(本来、Shape from shadingに使う)
2. 偏光フィルターを利用して反射成分の分離
3. 画像系列を利用して反射成分の分離

非単色物体反射成分の分離(3)

— Photometricステレオ法

異なる照明条件の複数の画像を用いる反射成分の分離法
(カメラと物体は固定)



非単色物体反射成分の分離(4)

— Photometricステレオ法

少なくとも三枚の画像を使用(ハイライトは同じ領域ではない)

RGB空間からYUV空間へ変換し、解析を行う

代表的な参考文献:

Karsten Schluns and Andreas Koschan, **Global and Local Highlight Analysis in Color Images**, 1st Int'l Conf. On Color In Graphics and Image Processing, pp.300-304, 2000.
(Humboldt University, Berlin, Germany)

非単色物体反射成分の分離(5)

— Photometricステレオ法

例:



原画像



拡散反射成分



鏡面反射成分

非単色物体反射成分の分離(6)

——偏光フィルターを利用する反射成分の分離

カメラレンズの前に偏光フィルターを置いて、フィルターを回転しながら複数の画像を撮影する

- 物体表面からの反射光は偏光される
- 表面からの光波は幾つかあるため、一般的に反射エネルギーは部分的に偏光される
- 拡散反射成分は偏光されない傾向がある
- 鏡面反射成分は部分的に偏光される

非単色物体反射成分の分離(7)

— 偏光フィルターを利用する反射成分の分離

フィルターの回転角度によって、鏡面反射成分の一部がコサイン則に従って偏光される

$$\begin{aligned}
 I_i &= I_d + I_{sc} + I_{sv} \cos 2(\theta_i - \alpha) \\
 &= I_c + I_{sv} \cos 2(\theta_i - \alpha) \\
 &= (1, \cos 2\theta_i, \sin 2\theta_i)(I_c, I_{sv} \cos 2\alpha, I_{sv} \sin 2\alpha)^T \\
 &= f_i \cdot v^T
 \end{aligned}$$

I_i : 計測したRGBベクトル; I_d : 拡散反射成分;
 I_{sc} : 偏光されない鏡面反射成分; I_{sv} : コサイン則の振幅;
 θ_i : 偏光フィルター回転角度; α : 表面の法線の位相角

非単色物体反射成分の分離(8)

— 偏光フィルターを利用する反射成分の分離

RGB空間で色解析を行い、各パラメータを求め、拡散反射と鏡面反射成分を分離する

代表的な参考文献:

Shree K. Nayar, Xi-Sheng Fang and Terrance Boult: **Separation Of Reflection Components Using Color and Polarization**, International Journal of Computer Vision(IJCV), Vol.21, No.3, pp.163-186, 1997.
(Columbia University)

非単色物体反射成分の分離(9)

— 偏光フィルターを利用する反射成分の分離



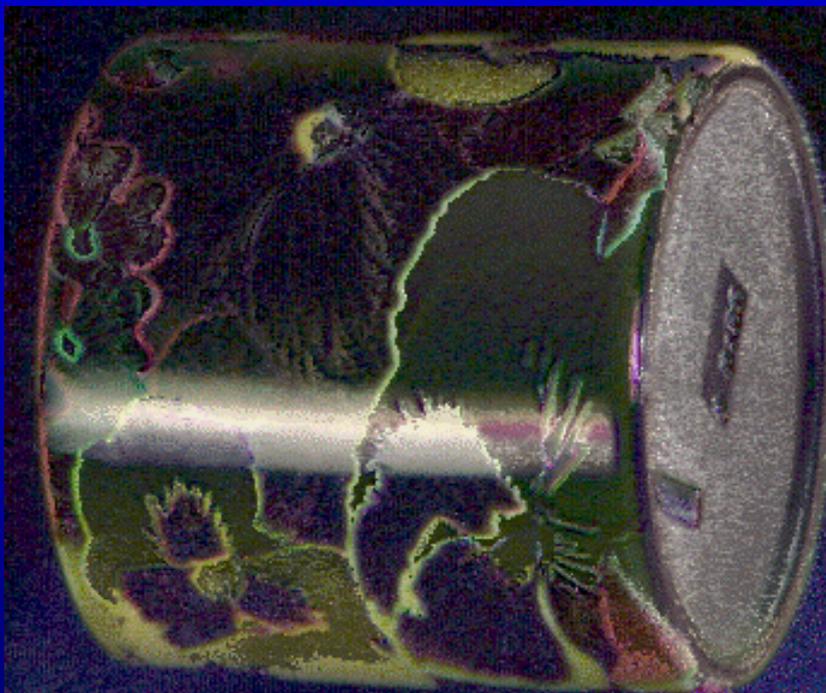
原画像



拡散反射成分

非単色物体反射成分の分離(10)

— 偏光フィルターを利用する反射成分の分離



鏡面反射成分

解析は簡単ではない

ノイズの影響でピクセル対応
は困難

幾つかの閾値の
コントロールが必要

非単色物体反射成分の分離(11)

— 画像系列を利用する反射成分の分離

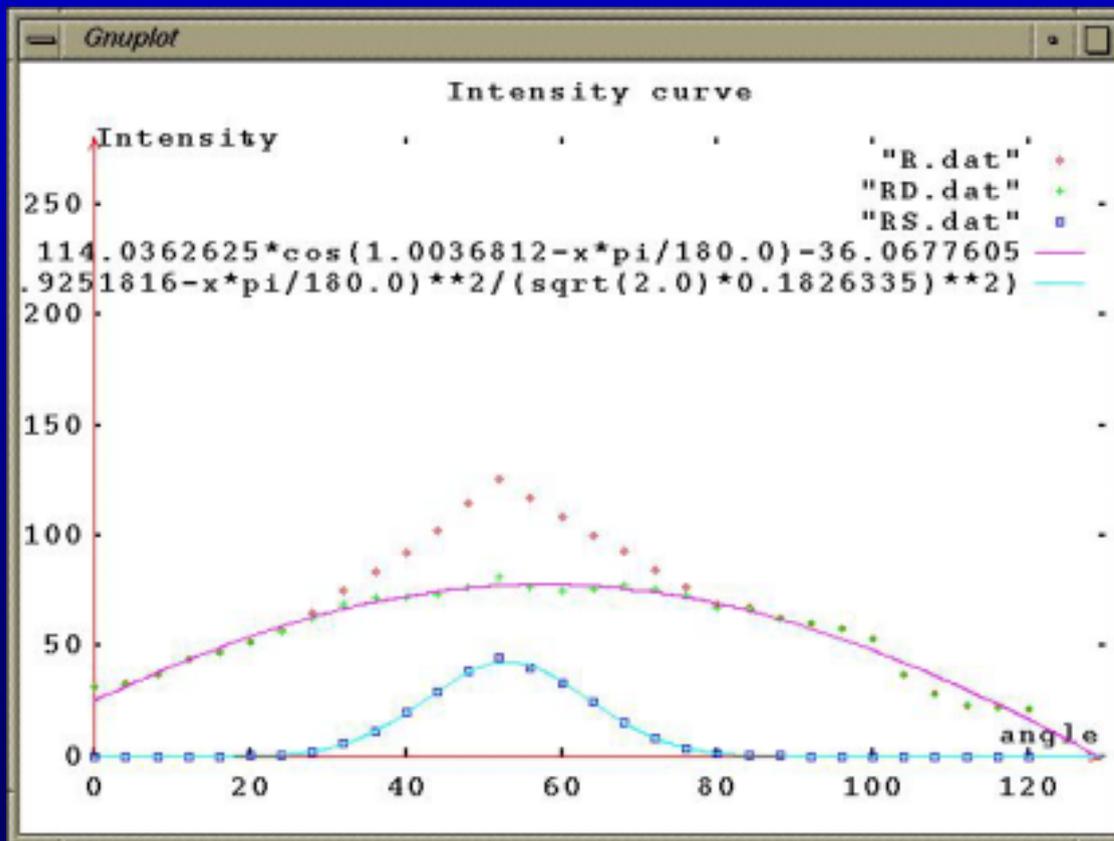
良く使われる方法である

照明条件の変化に伴う
物体上のある3D点の
RGBデータを反射モデル
にフィッティングして
パラメータを求め、反射
成分を分離する。

点光源:

単一光源

二つの光源



単一光源の照射での物体反射成分の分離 (1) NHK-ES

— 画像系列を利用する反射成分の分離

代表的な参考文献:

Y.Sato and K.Ikeuchi: **Temporal-color space analysis of reflection**, *Journal of Optical Society of America A*, 11(11): 2990-3002, 1994

光源色ベクトルのキャリブレーション
物体色ベクトルの推測



反射成分の分離

単一光源の照射での物体反射成分の分離(2) ^{NHK-ES}

— 画像系列を利用する反射成分の分離

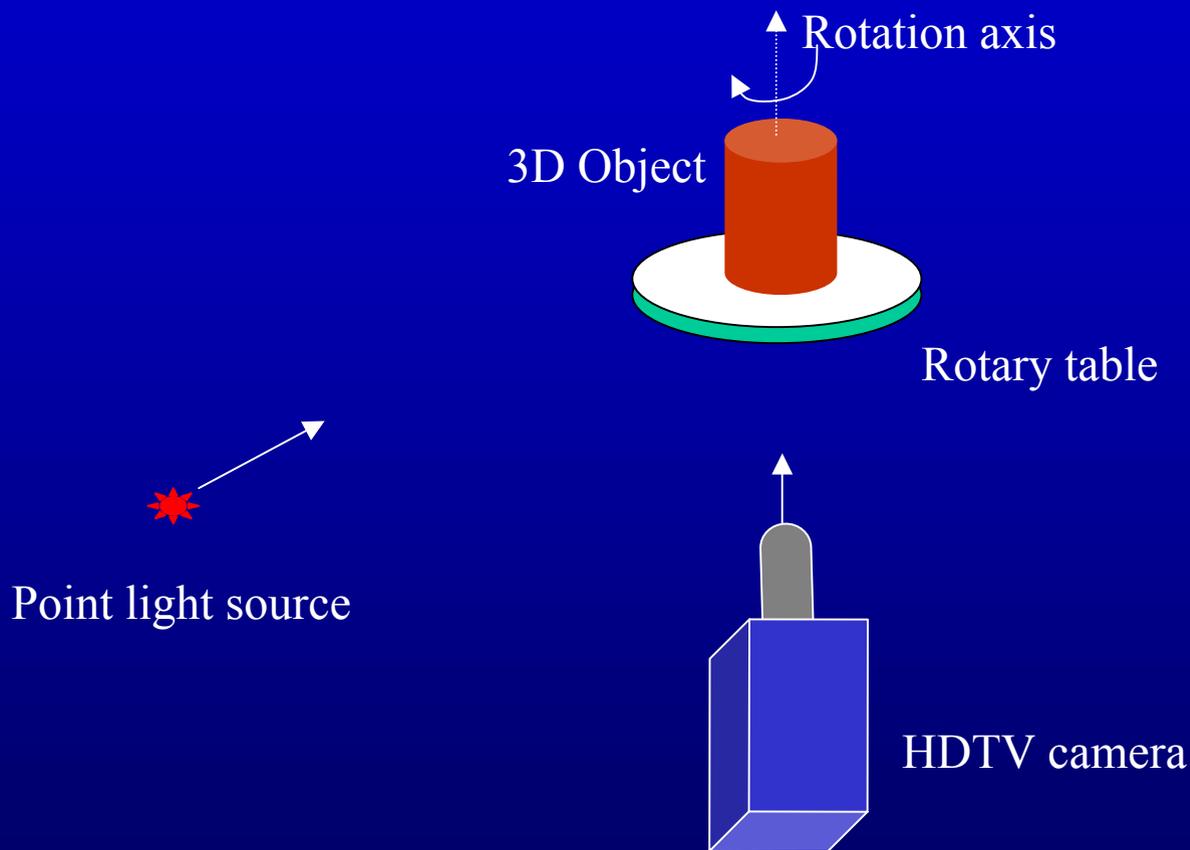
ノイズの影響を最低限にするため、RGBデータをモデルに直接フィッティングして、反射成分を分離する

光源色と物体色が未知のまま分離する

X. Zhang, Y. Nakanishi, K. Kobayashi, H. Mitsumine, and S. Saito: **Estimation of surface reflectance parameters from image sequences**, The Journal of The Society for Art and Science, Vol.1, No.1, pp.8-14, 2002.

単一光源の照射での物体反射成分の分離(3)

— 実験装置



Experimental setup: Camera, light and object

単一光源の照射での物体反射成分の分離(4)

— 実験装置

カメラと光源固定
物体回転

カメラと回転テーブル
はコンピュータで
コントロール

光源は物体から
十分遠い
(点光源に近似)

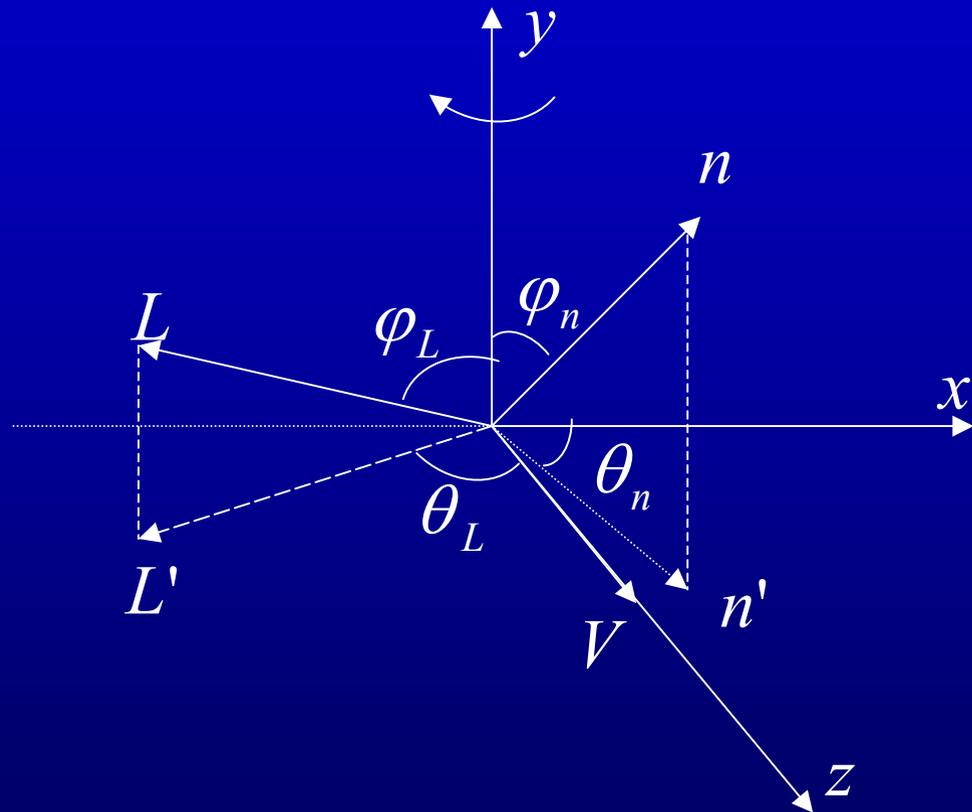


実験装置外観

単一光源の照射での物体反射成分の分離(5) *NHK-ES*

— Geometry configuration

視点方向と回転軸
は垂直に設定する



L: light direction; n: object normal; V: view direction

単一光源の照射での物体反射成分の分離(6) *NHK-ES*

反射成分を分離するため、物体上すべての3D点の回転に伴う明度変化データが必要



モデリング

参考文献:

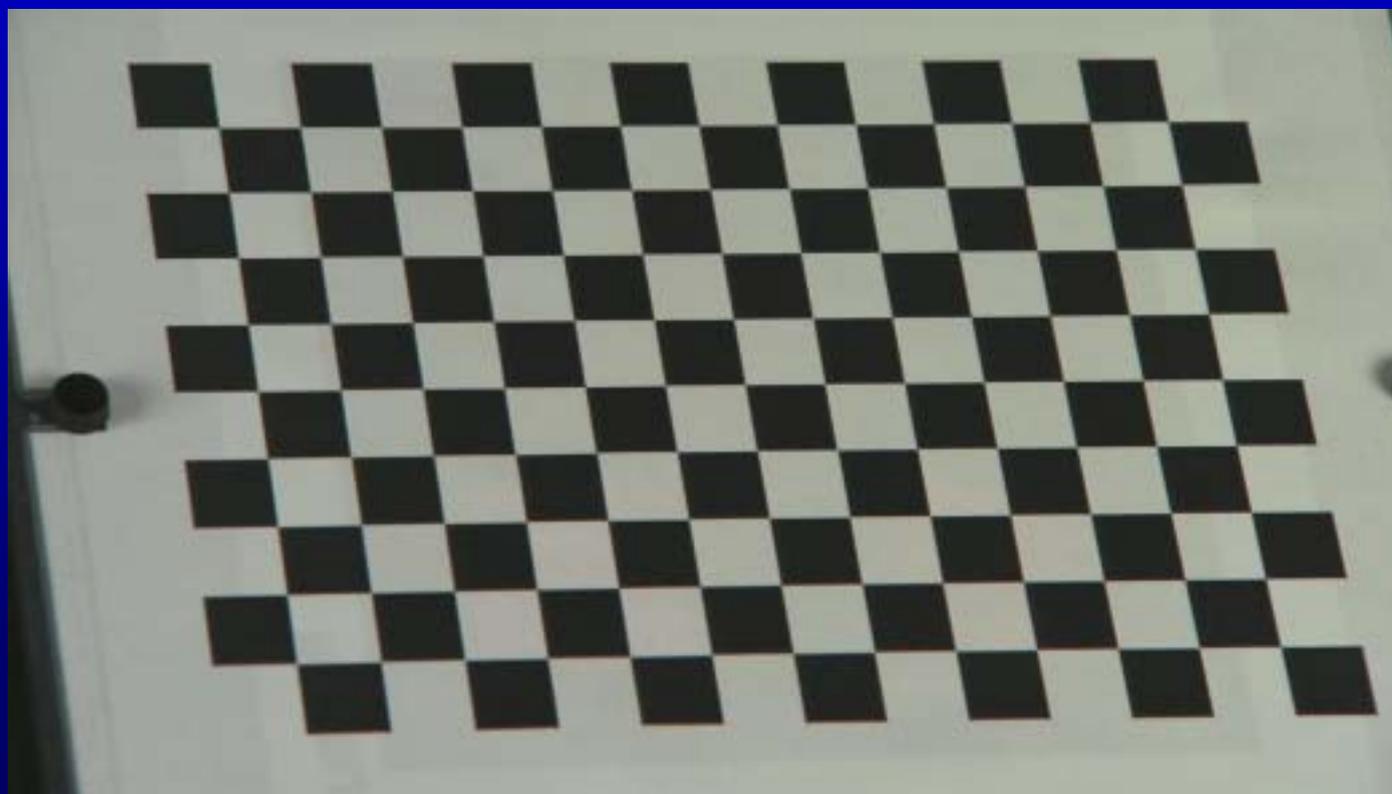
K. Kobayashi, Y. Nakanisi, X. Zhang, M. Tadenuma, H. Mitsumine and S. Saito: **High Resolution 3D Surface Measurement from Multiple Viewpoint Images**, NICOGRAPH, pp.143-150, 2000.

単一光源の照射での物体反射成分の分離(8) *NHK-ES*

—— 回転軸キャリブレーション

カメラの外部パラメータから回転軸を計算する

回転軸: a: Axis direction p: Axis position



Panel used for calibration

単一光源の照射での物体反射成分の分離(9) *NHK-ES*

—— キャリブレーション

特徴点の数を自動的に算出し、座標をHarrisコーナードテクターで検出する(千分の一以上の精度で)

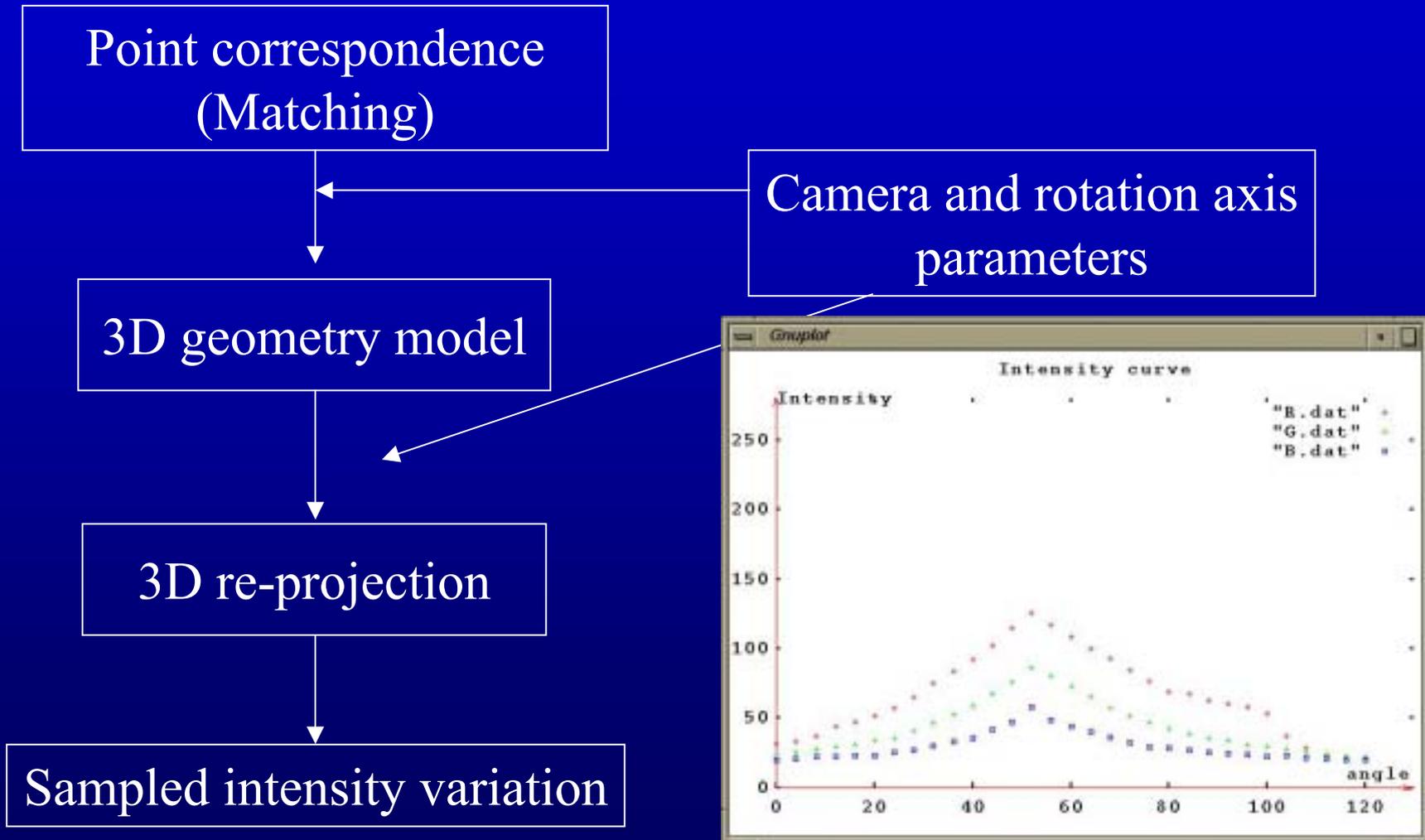
カメラキャリブレーション参考文献:

Zhengyou Zhang: *A flexible new technique for camera calibration*, Microsoft, MSR-TR-98-71, Dec. 1998.

回転軸はカメラの外部パラメータからSVD法で計算する

単一光源の照射での物体反射成分の分離(10) NHK-ES

— 明度変化データのサンプリング



単一光源の照射での物体反射成分の分離 (1) NHK-ES

—反射モデル (Torrance-Sparrow model)

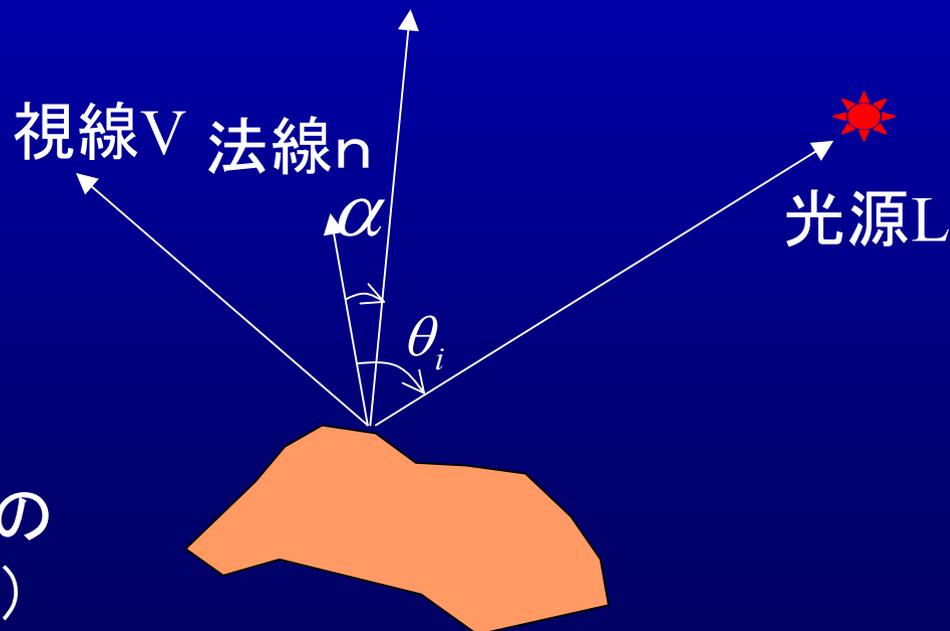
$$I = K_d (L \cdot n) + K_s e^{-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}}$$

視線と光源の中線H

K_d 拡散反射パラメータ

K_s 鏡面反射パラメータ

σ 物体表面上の微小面の傾きの標準偏差 (粗さ)



単一光源の照射での物体反射成分の分離(12) NHK-ES

—反射モデルの展開

$$\begin{aligned} I &= K_d(L \cdot n) + K_s e^{-\alpha^2/2\sigma^2} \\ &= A \sin \theta + B \cos \theta + C + D \exp\left(-\left(\frac{E - \theta}{F}\right)^2\right) \end{aligned}$$

ここで

$$\begin{cases} A = K_d t_1 \sin \varphi_n \\ B = K_d t_2 \sin \varphi_n \\ C = K_d t_c \cos \varphi_n \end{cases} \quad \begin{cases} t_1 = t_b \sin \theta_n - t_a \cos \theta_n \\ t_2 = t_a \sin \theta_n + t_b \cos \theta_n \end{cases}$$

$$\begin{cases} t_a = \sin \varphi_L \sin \theta_L \\ t_b = \sin \varphi_L \cos \theta_L \\ t_c = \cos \varphi_L \end{cases}$$

光源方向と法線方向は
極座標で表現する
 θ は回転角度である

単一光源の照射での物体反射成分の分離(13) NHK-ES

—反射モデルを明度変化データに当て嵌める

すべての3D点に対して、反射モデルを該当点の明度変化データに当て嵌め、モデルのパラメータA,B,C,D,E,Fを求める

非線形最小化することになる:

$$E = \sum_k (I(\theta_k) - I_k)^2 = \sum_k e_k^2$$

Levenberg-Marquardt法でパラメータ値を最適化する

単一光源の照射での物体反射成分の分離(14) NHK-ES

---パラメータ値の初期化

良い初期値ではないと、局所解に陥ってしまう

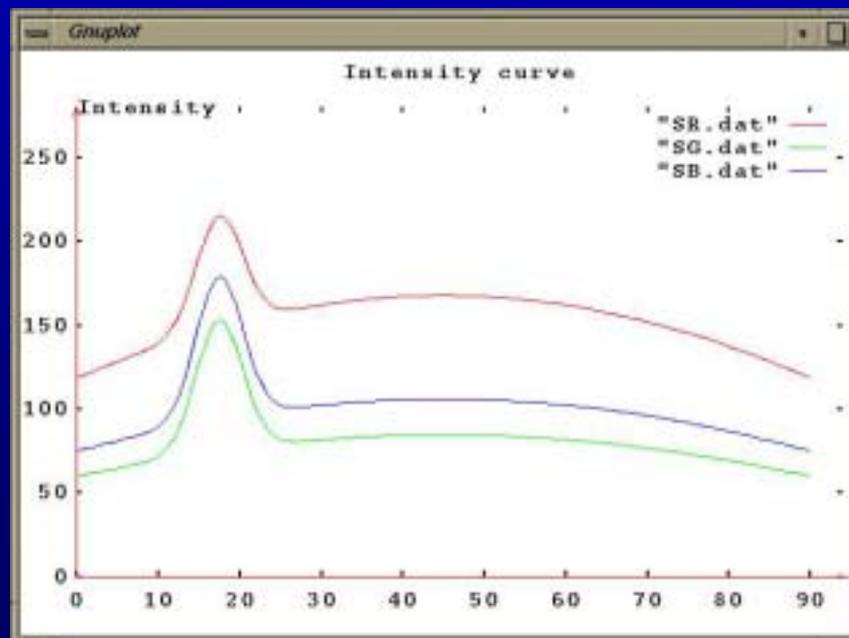
初期値の選択法:

D: ピークの値

E: ピークの位置(角)

F: 0.08 経験的な値

A,B,C: ピークから離れたところの値



単一光源の照射での物体反射成分の分離(15) NHK-ES

—反射成分の分離

モデル値の計算:

拡散反射成分: $I'_d = A \sin \theta + B \cos \theta + C$

鏡面反射成分: $I'_s = D e^{-\left(\frac{E-\theta}{F}\right)^2}$

物体からの反射成分はモデルの二つの成分の比で分離する

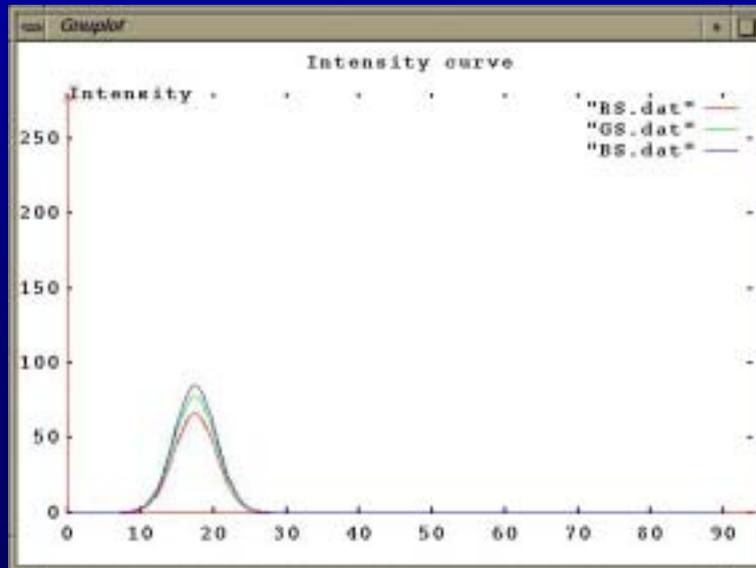
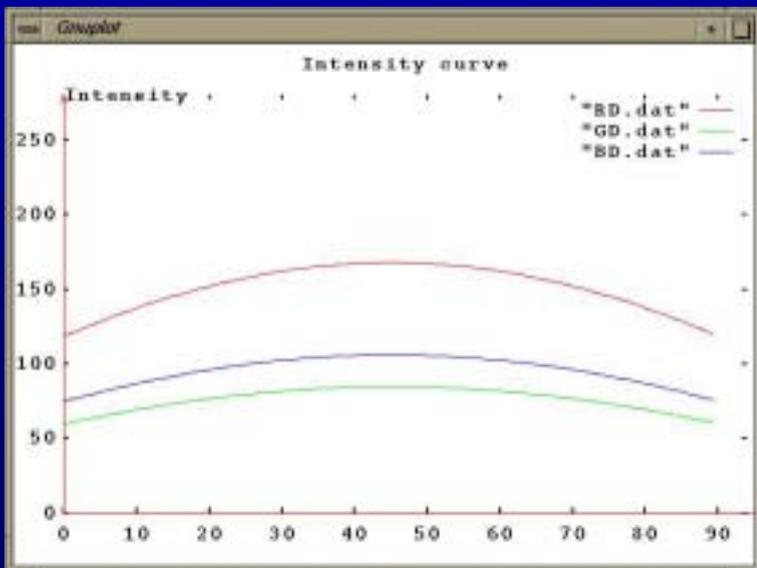
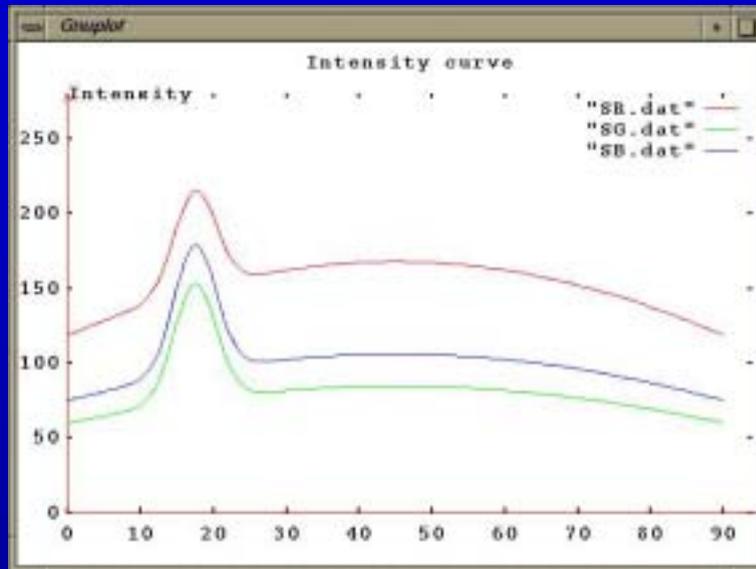
$$I_d = I_0 \cdot \frac{I'_d}{I'_d + I'_s}$$

$$I_s = I_0 \cdot \frac{I'_s}{I'_d + I'_s}$$

単一光源の照射での物体反射成分の分離(16)

結果(シミュレーション)

合成したRGBデータ →
鏡面反射成分
拡散反射成分

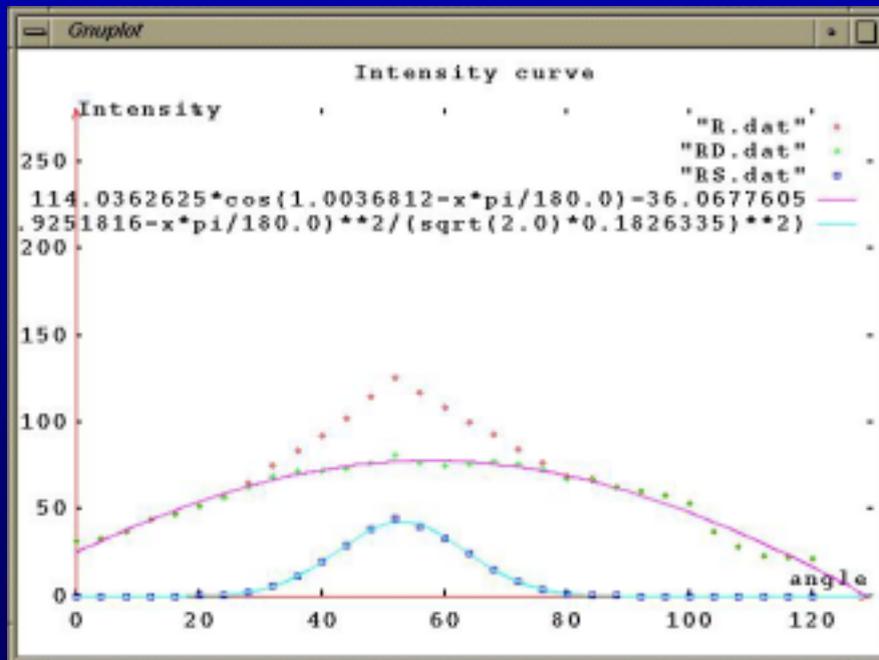
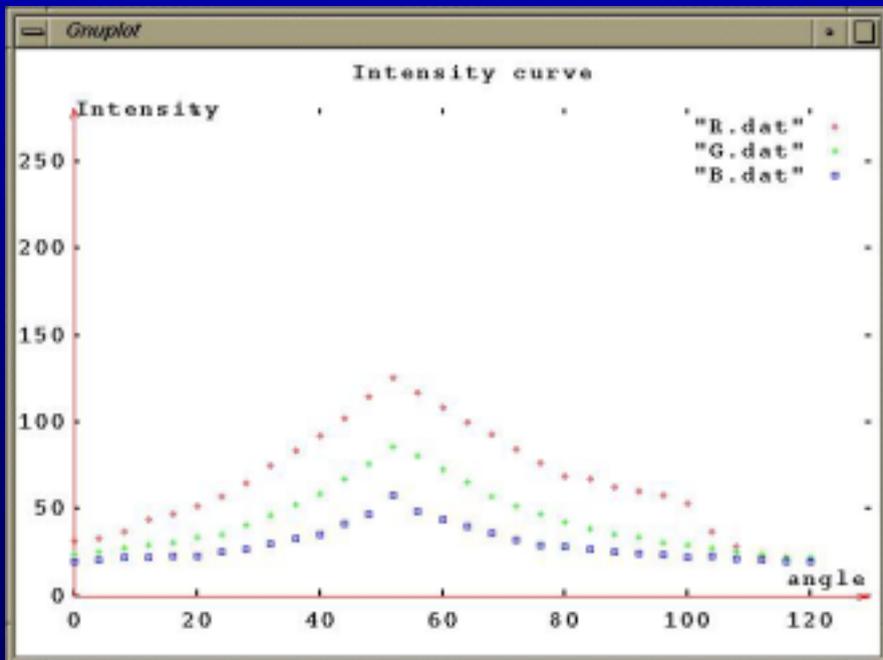


単一光源の照射での物体反射成分の分離(17) NHK-ES

—— 結果(リアルデータ)

画像から取得したある3D点のRGBデータ(回転によって明度変化する)

Rチャンネルの分離結果:
R明度変化、拡散反射、
鏡面反射



単一光源の照射での物体反射成分の分離(18) NHK-ES

—— 結果(リアルデータ)



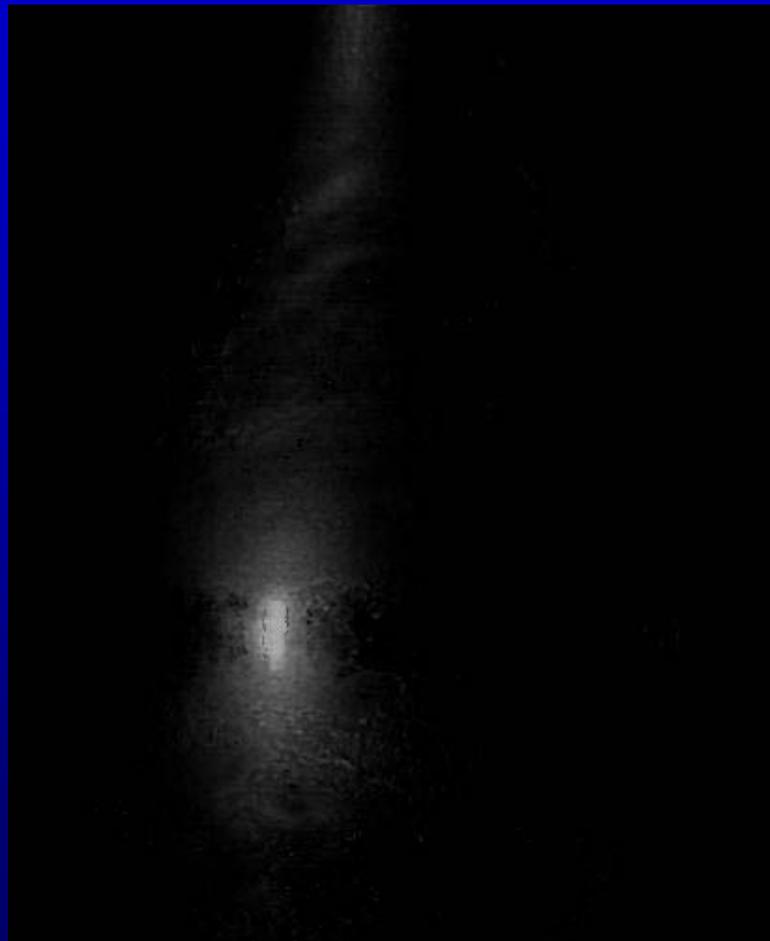
原画像

単一光源照射での物体反射成分の分離(19) *NHK-ES*

—— 結果(リアルデータ)



分離した拡散反射成分



分離した鏡面反射成分

二光源の照射での物体反射成分の分離(1)

NHK-ES

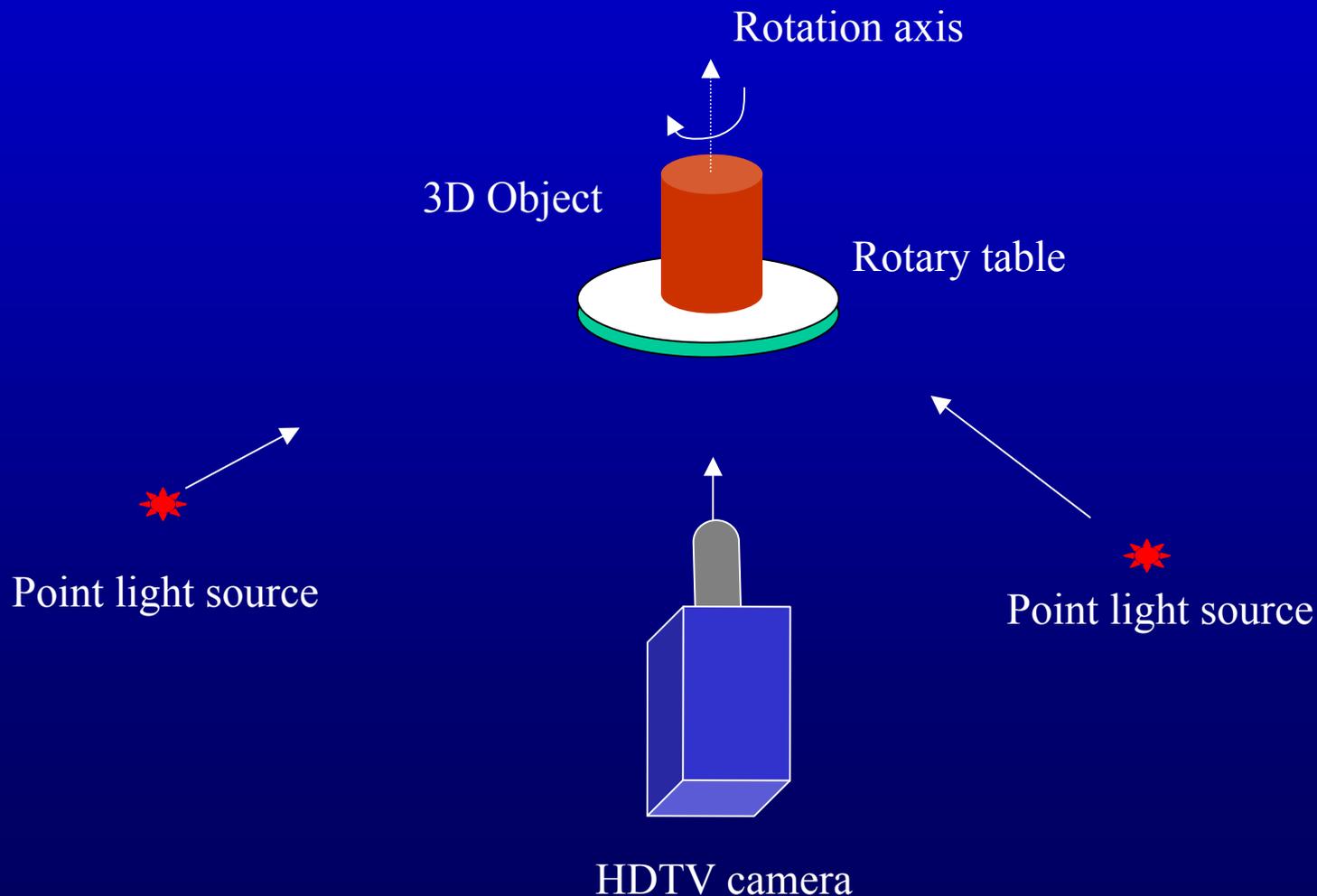
— Why?



影が妨害になる(テクスチャマップの取得、反射特性の推測)

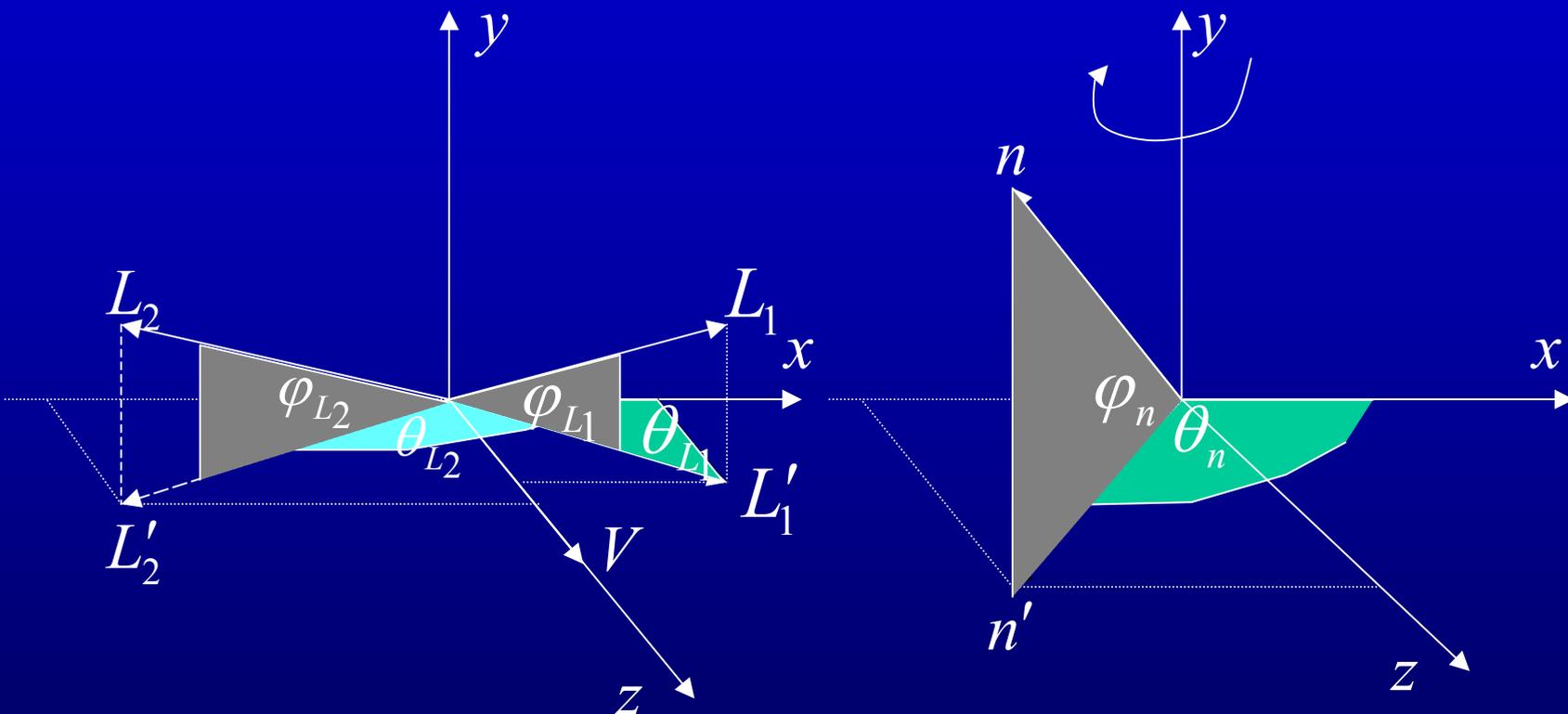
二光源の照射での物体反射成分の分離(2)

——実験装置



二光源の照射での物体反射成分の分離(3)

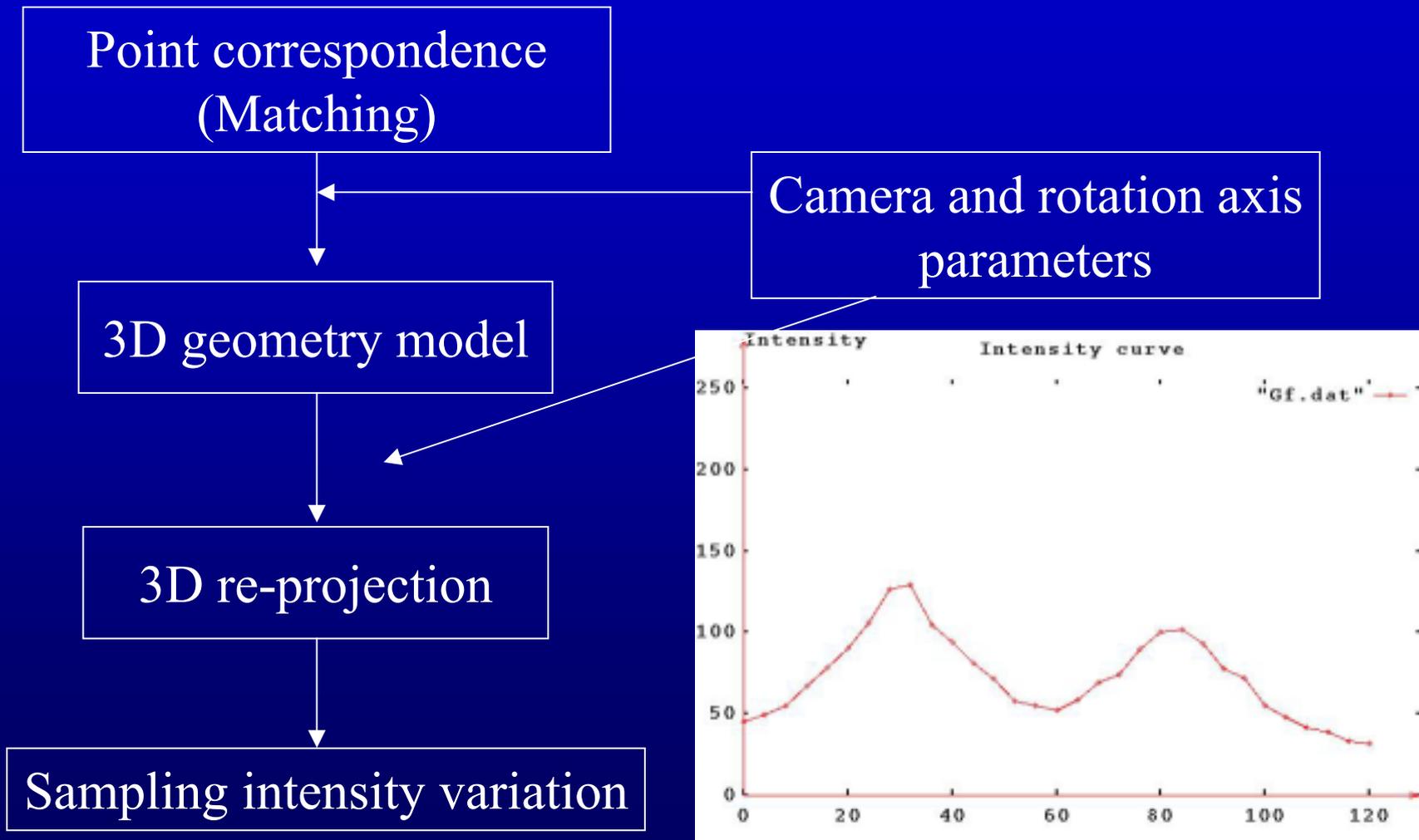
— Geometry configuration



L1,L2: light direction; n: object normal; V: view direction

二光源の照射での物体反射成分の分離(4)

— RGBデータのサンプリング



二光源の照射での物体反射成分の分離(5)

—反射モデル(Torrance-Sparrow model)

$$I = I_d + I_s$$

$$= K_d \sum_{i=1}^2 (L_i \cdot N) + K_s \sum_{i=1}^2 \exp(-\alpha_i^2 / 2\sigma^2)$$

数学的整理で

$$I_d = A \sin \theta + B \cos \theta + C$$

$$I_s = D_1 \exp\left(-\left(\frac{E_1 - \theta}{F}\right)^2\right) + D_2 \exp\left(-\left(\frac{E_2 - \theta}{F}\right)^2\right)$$

二光源の照射での物体反射成分の分離(6)

—反射モデルを明度変化データに当て嵌める

すべての3D点に対して、反射モデルを該当点の明度変化データに当て嵌め、モデルのパラメータA,B,C,D1,E1,D2,E2,Fを求める

非線形最小化することになる:

$$E = \sum_k (I(\theta_k) - I_k)^2 = \sum_k e_k^2$$

Levenberg-Marquardt法でパラメータ値を最適化する

二光源の照射での物体反射成分の分離(7)

---パラメータ値の初期化

良い初期値ではないと、局所解に陥ってしまう

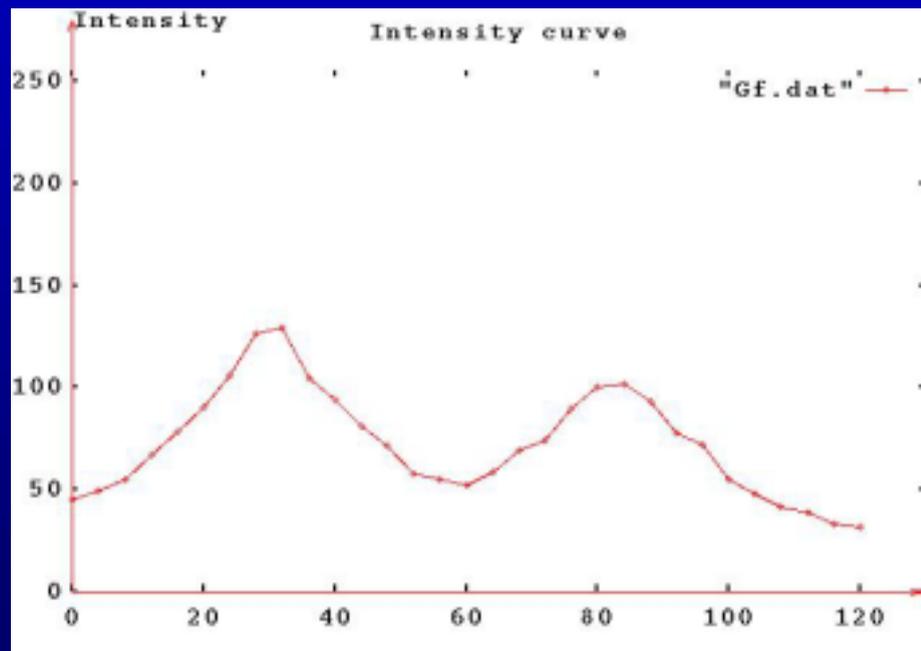
初期値の選択法:

D_1, D_2 : 二つのピークの間隔

E_1, E_2 : 二つのピークの位置

F: 0.08 経験的な値

A, B, C: ピークから十分
離れたところの値



二光源の照射での物体反射成分の分離(8)

—反射成分の分離

モデル値:

$$I'_d = A \sin \theta + B \cos \theta + C$$

拡散反射成分より鏡面反射成分のほうがモデリングが難しい、
或いは、推測した拡散反射成分のほうが鏡面反射成分よりも
信頼度が高い

鏡面反射成分: $I_s = I_{sam} - I'_d$

拡散反射成分: $I_d = I - I_s$

二光源の照射での物体反射成分の分離(9) ——結果(リアルデータ)

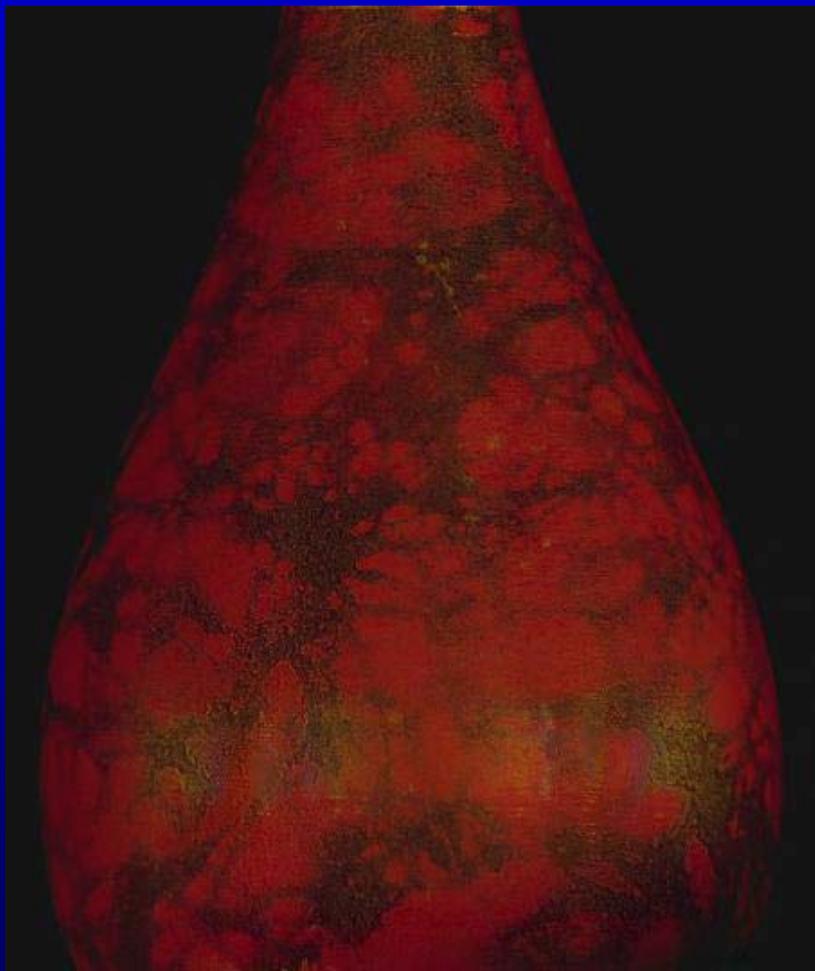
NHK-ES



原画像

二光源の照射での物体反射成分の分離(10) *NHK-ES*

——結果(リアルデータ)



分離した拡散反射成分



分離した鏡面反射成分

二光源の照射での物体反射成分の分離(11) *NHK-ES*

——改良：重み付け法

Why?

分離した結果のハイライトの近傍に問題が残っている。その原因はすべての回転によってのデータを均等に処理すること。

ハイライトのあるところのRGB値がハイライトのないところのRGB値より大きいので、ノイズも大きい；

カメラのDynamic Range(0-255)のため、計測誤差が大きい；

鏡面反射成分は拡散反射成分よりモデリングが難しいので、モデリング誤差が大きい。

—重み関数の定義

How?

拡散反射成分が鏡面反射成分より十分信頼できると仮定

RGB値が大きくなれば、大きくなるほど、信頼度が低い

重みはガウシヤンの逆関数を使えるのではないか

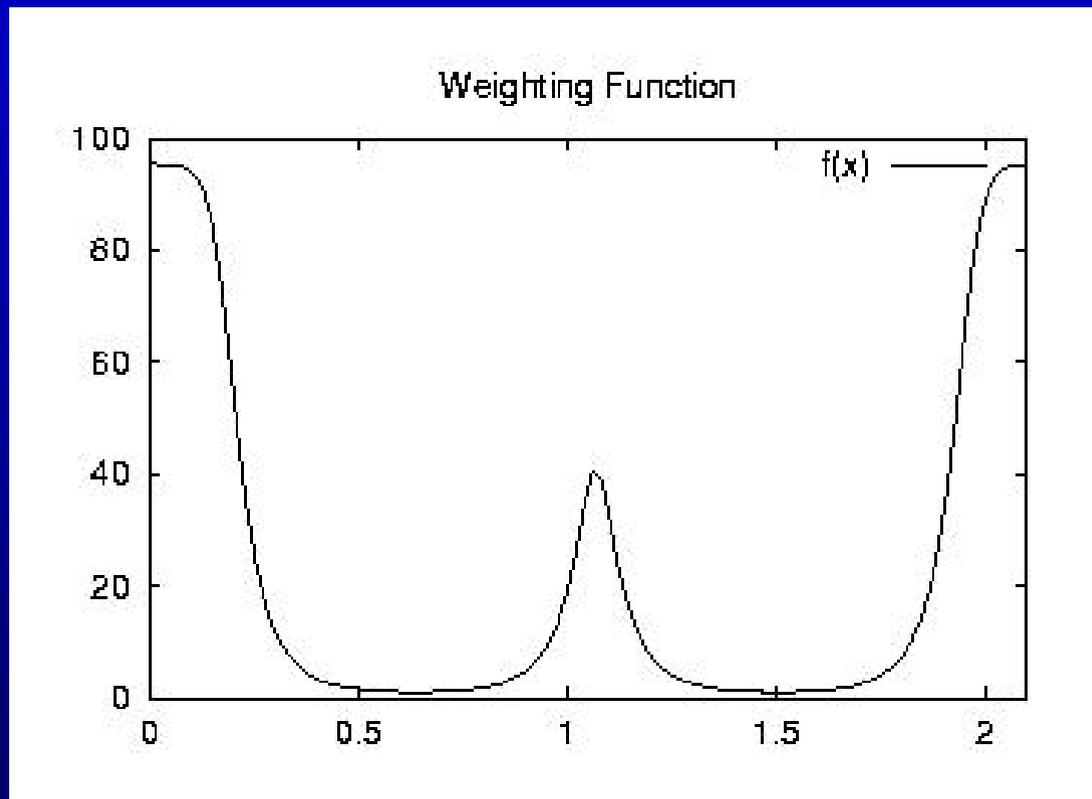
$$W(\theta_k) = \left(a + \exp\left(-\left(\frac{E_1 - \theta_k}{F}\right)^2\right) + \exp\left(-\left(\frac{E_2 - \theta_k}{F}\right)^2\right) \right)^{-1/2}$$

a は w_θ が無限大にならないようにする常数($10^{-3} \sim 10^{-9}$)である

E_1, E_2 と F はモデル自体のパラメータであり、パラメータフィッティングによって自動的に調整する

二光源の照射での物体反射成分の分離(13) *NHK-ES*

—重み関数のグラフ(例)



— 重み付けの最適化

重みなし

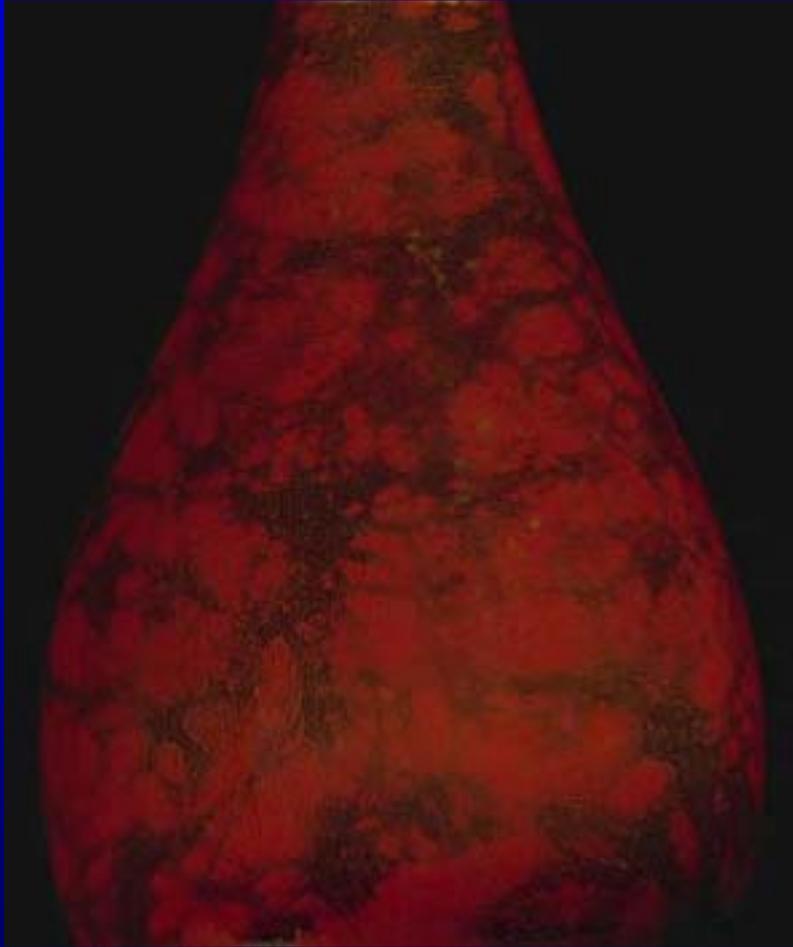
$$E = \sum_k (I(\theta_k) - I_k)^2 = \sum_k e_k^2$$

重みあり

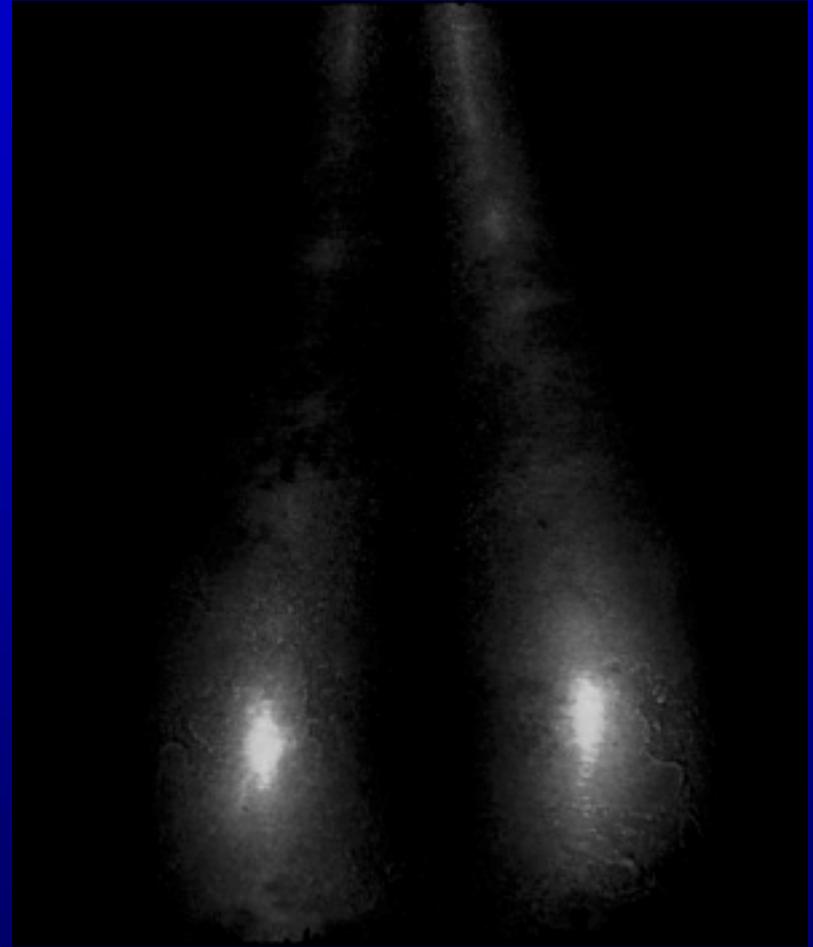
$$E = \sum_k w_{\theta_k} (I(\theta_k) - I_k)^2 = \sum_k e_k^2$$

二光源の照射での物体反射成分の分離(15) *NHK-ES*

—— 重み付けの最適化での分離結果



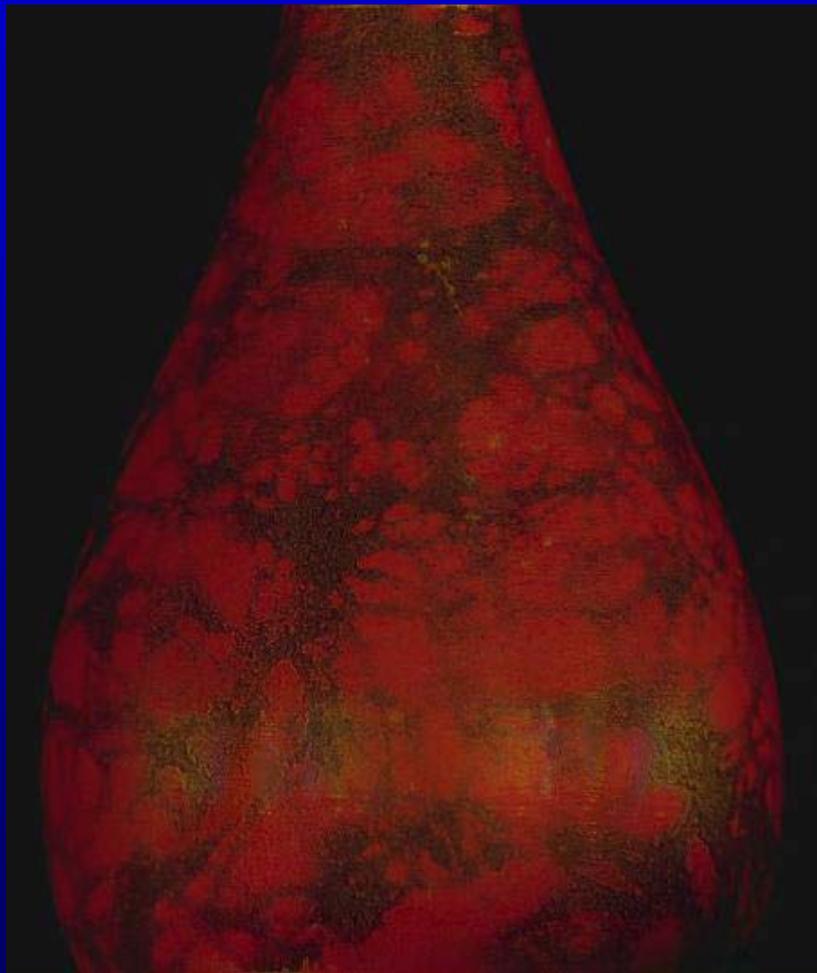
拡散反射成分



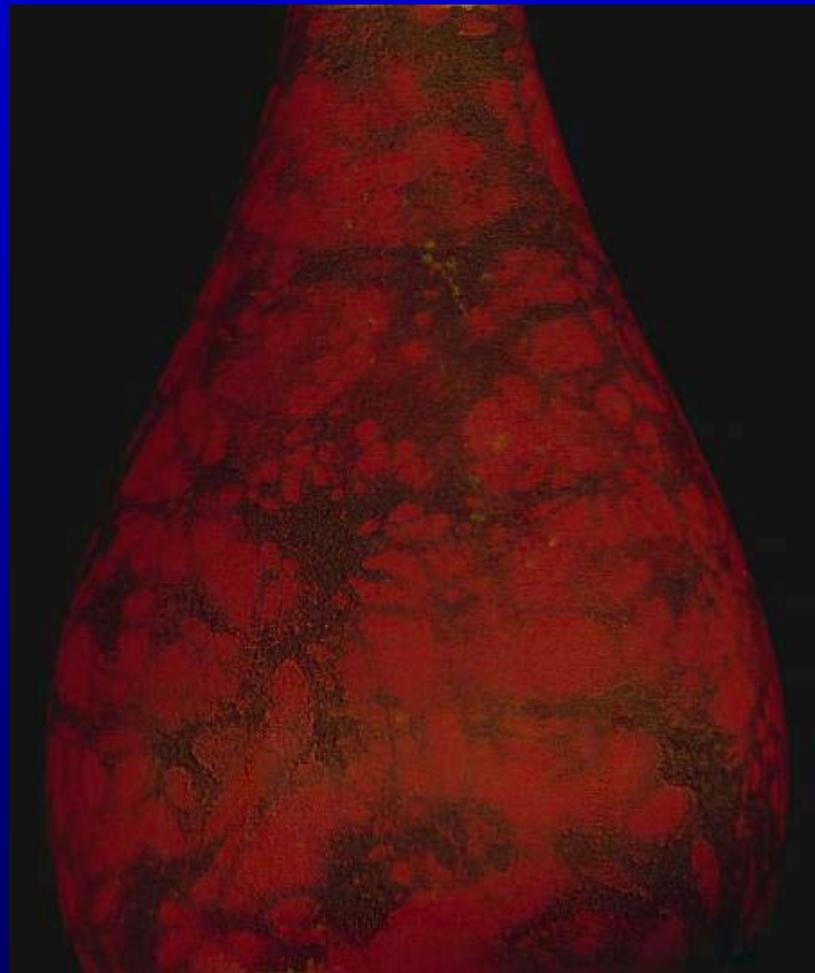
鏡面反射成分

二光源の照射での物体反射成分の分離(16) *NHK-ES*

—— 分離結果の比較(拡散反射)



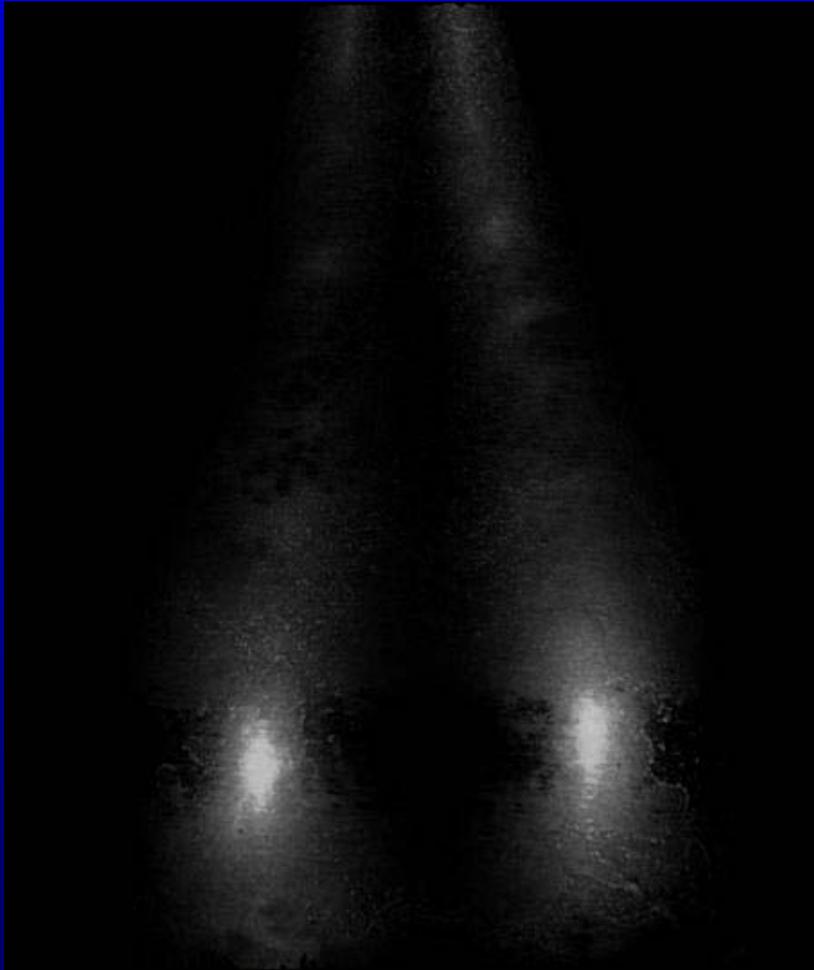
重みなし



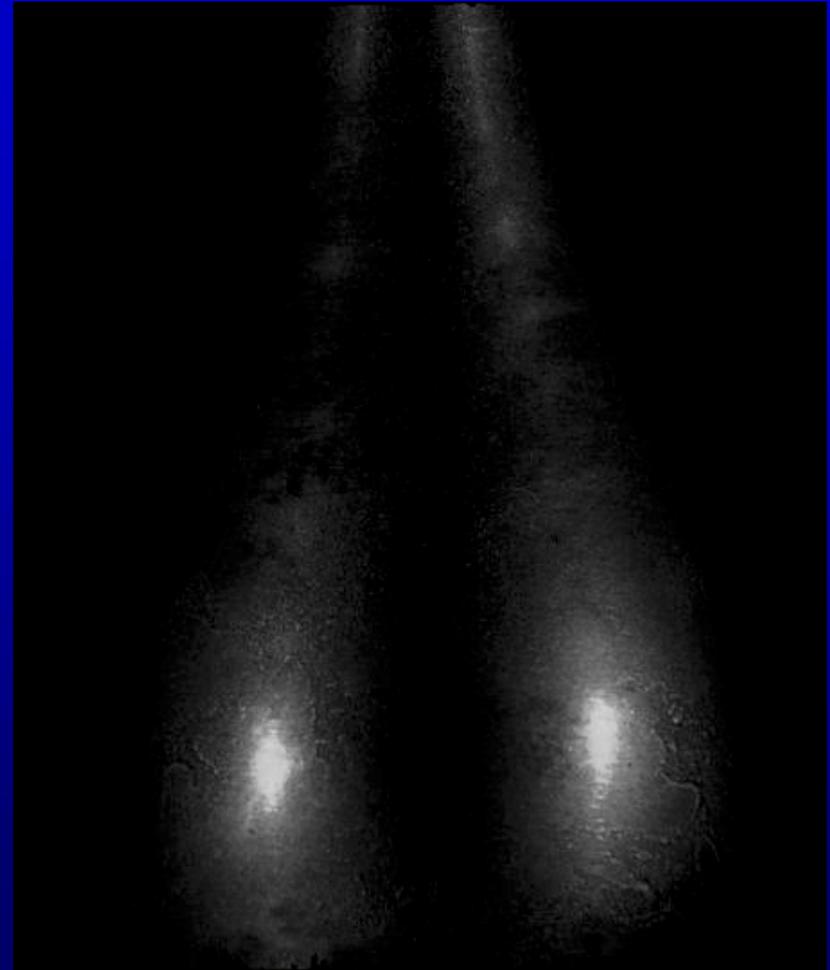
重みあり

二光源の照射での物体反射成分の分離(17) *NHK-ES*

—一分離結果の比較(鏡面反射)



重みなし



重みあり

Albedoマップの作成(1)

拡散反射成分 I_d が光源に依存する

推測したパラメータからある3D点の法線を計算できる

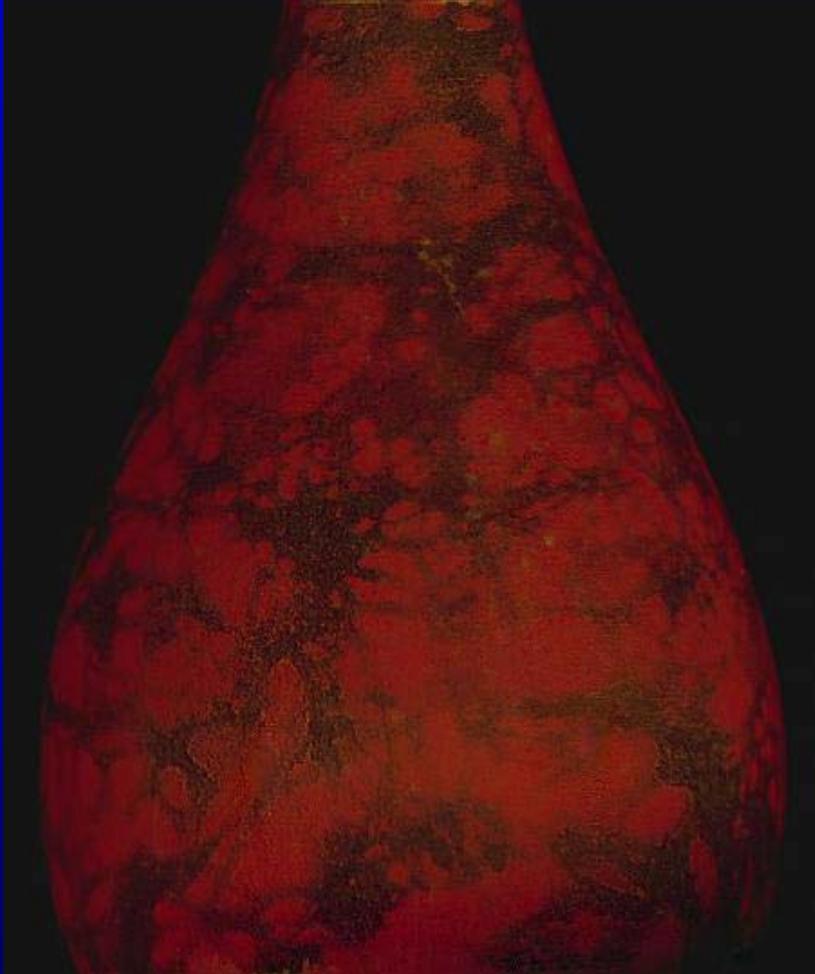
光源方向ベクトル L_1, L_2 既知とする

Albedoマップは

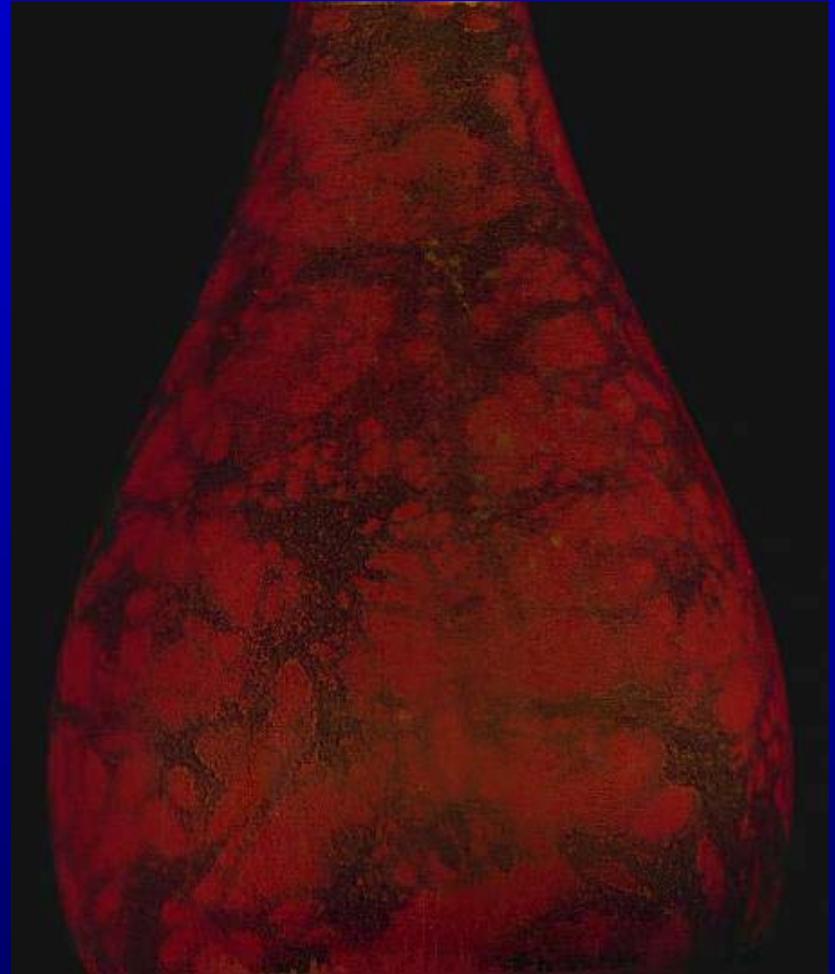
$$K_d = \frac{I_d}{\max\{L_1 \cdot N, 0\} + \max\{L_2 \cdot N, 0\}}$$

Albedoマップの作成(2)

NHK-ES



拡散反射成分 I_d



Albedoマップ K_d

単色あるいは多色物体

複雑なテクスチャを持つ物体

単一光源

二つの光源

反射成分の分離は簡単なことではない

モデル、照明、データの取得など

共同研究者

NHKエンジニアリングサービス

張 曉華、中西 良成、小林 希一

NHK放送技術研究所

三ッ峰 秀樹

東京工業大学

齋藤 豪

この研究は通信放送機構(TAO)にサポートされている
プロジェクト「高精細・立体・臨場感コンテンツ技術の研究
開発」の一部です。

Thank you!

メール : zhxh@nes.or.jp