

# 面法線に基づく輝度のパラメータ化による 照明関数テーブルを用いた照明変化画像生成

中山徹<sup>†</sup> 眞鍋知久<sup>††</sup>  
Bisser Raytchev<sup>†††</sup> 玉木徹<sup>†††</sup> 金田和文<sup>†††</sup>

イメージベースレンダリング(IBR)の考え方を照明変化に応用し、照明条件の異なる2枚の画像から連続的に照明が変化する画像を生成する手法を提案する。提案手法では、2枚の入力画像の輝度値を面法線に基づいてパラメータ化することで照明関数テーブルを構築する。レンダリングは光源位置に応じて輝度値を再配置することで画像を生成する。凹凸面での照明変化の画像生成を行い、提案手法の有用性を示す。また、パラメータ化の方法を変えた場合の出力画像の違いを比較・検討する。

## Image-Based Relighting

### - Luminance Mapping Based on a Lighting Function

Toru Nakayama<sup>†</sup> Tomohisa Manabe<sup>††</sup>  
Bisser Raytchev<sup>†††</sup> Toru Tamaki<sup>†††</sup> Kazufumi Kaneda<sup>†††</sup>

In this paper, we propose an image-based relighting method for generating a sequence of images with smooth transition of illumination from input images with different lighting conditions. We store the luminances (pixel RGB values) of the input images into "lighting functions" consisting of a couple of parameters related to surface normals. Images with different light positions are rendered by mapping luminances retrieved from the lighting functions. We demonstrate served examples generated by the proposed method including those of bumpy surfaces. We compare output images when we use different parametrization.

## 1. はじめに

幾何形状データに物理的な属性を与えて画像を生成する従来のCG技法に対して、既存の画像をもとに新たな画像を再構成するイメージベースレンダリング(IBR)手法がある。IBR手法には物体形状や反射特性などのパラメータを陽に復元することなく、複数の実写画像から得られる情報を直接利用し、写実的な画像を生成する手法もある。このような手法として、レイデータベースアプローチ(光線空間法)[1][2]がある。レイデータベースアプローチは、複数の視点で撮影された画像を入力として用い、任意視点の画像を生成することを可能とする手法である。

本稿では、レイデータベースアプローチの考え方を照明変化に応用し、照明条件が変化したときの画像を高速に生成する手法を提案する。レイデータベースアプローチでは、入力画像より得られた光線データベースを参照することで、任意の視点位置の画像を高速に生成する。一方、提案手法では、入力画像中の輝度値のデータベース(本研究では、照明関数テーブルと呼ぶ)を参照することで、任意の光源位置の画像を高速に生成する。

## 2. 関連研究

照明条件を変化させた画像を高速に生成するための研究が行われている。土橋ら[3]は、光源の配光特性を変化させた画像を高速に生成する手法を提案している。この手法では、基底関数を用いて配光特性を表現し、面上の輝度値を基底関数ごとに前計算して求めておく。そして、前計算された面上の輝度値を重み付き加算することで任意の配光特性での画像を生成できる。ただし、この手法では光源位置は変更できない。

Salonら[4]は物体表面上での光の伝達を前計算するPRTを提案し、環境照明下のシーンのリアルタイムなレンダリングを可能にした。PRT法は、光の伝達関数を球面調和関数[4]やHaar Wavelet[5]といった基底関数を用いて近似することで、リアルタイムなレンダリングを可能にしている。Zhouら[6]やSunら[7]はPRTを改良し、物体が移動するような動的なシーンへの適用を可能にした。また、shadow mapを用いて環境照明下の動的シーンを高速にレンダリングする手法[8, 9]も提案されている。これらの手法はシーンをレンダリングするための3次元モデルが必要である。

光源位置が変化したときの画像を高速に生成する方法として、面上の照度分布をモ

<sup>†</sup> 広島大学 大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, HIROSHIMA University  
<sup>††</sup> 香川高等専門学校  
Kagawa National College of Technology  
<sup>†††</sup> 広島大学 大学院工学研究院  
Faculty of Engineering, HIROSHIMA University

ワーピングさせることで光源の移動を表現する手法が開発されている[10]. この手法では、物体表面上の照度値を等照度線で表現し、光源の移動に応じて等照度線をワーピングすることで、光源移動時の画像を高速に生成することができる. さらにこの手法を、3次元モデルを必要としない手法に改良した手法[11]が提案されている. しかし、等輝度線同士を適切に対応付けることが要求され、特にトポロジーの異なる等輝度線の対応付けが困難である問題がある.

画像や動画から照明環境や物体の反射特性を推定し、その情報を用いてシーンをレンダリングする手法が提案されている. Hara ら[12]は、一枚あるいは複数枚の単一視点画像から、Trance-Sparrow の反射モデルと von Mises-Fisher の確率分布を利用することで光源の数、方向、強さや物体の反射特性を推定している. ただし、3次元モデルが必要である. Hengel ら[13]は、動画から3次元モデルを取得し、画像と3次元モデルの間で輝度を比較することで光源方向や物体の特性を推定している. ただし、光源は平行光線である.

### 3. 提案手法

#### 3.1 問題設定

本研究では、以下の条件のもとで、任意の光源位置の画像を生成する.

- ・照明条件の異なる2枚の画像を入力とし、法線情報を既知とする.
- ・光源は単一の点光源とする.
- ・対象物体は平面や微小な凹凸のある平面とする.
- ・面にはテクスチャがなく反射率は一定とする.
- ・等方性の拡散反射光と鏡面反射光を合成した反射分布を扱う(図3.1).

入力画像として実写画像を用いる場合、レンジファインダ等を用いて奥行き(デプス)情報を取得し、隣接する複数の画素の奥行き情報の差分から法線情報が得られる. また、画像の陰影から法線情報を得る手法も提案されている[14].

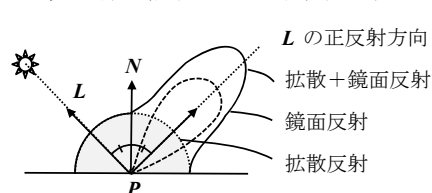


図 3.1 計算点 P における輝度分布

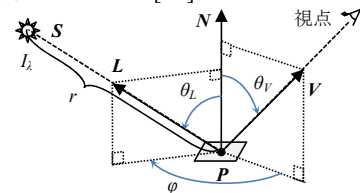


図 3.2 照明関数におけるパラメータ

#### 3.2 照明関数

計算点において、直射光による各波長  $\lambda = \{R, G, B\}$  に対する輝度値  $L_\lambda$  は拡散反射  $L_{d\lambda}$

と鏡面反射  $L_{s\lambda}$  の和として、式(3.1)で表される.

$$L_\lambda = L_{d\lambda}(\theta_L, r, I_\lambda) + L_{s\lambda}(\theta_L, \theta_V, \varphi, I_\lambda) \equiv g_\lambda(\theta_L, \theta_V, \varphi, r, I_\lambda) \quad (3.1)$$

$\theta_L, \theta_V$  は面法線  $N$  を基準にした視線  $V$  と光線  $L$  の角度であり、 $\varphi$  は  $V$  と  $L$  のなす角度である.  $r$  は点光源  $S$  と計算点  $P$  間の距離である.  $I_\lambda$  は点光源の放射強度である(図3.2). 本研究では、輝度値を表す関数  $g_\lambda(\theta_L, \theta_V, \varphi, r, I_\lambda)$  を照明関数と呼ぶ.

#### 3.3 提案手法の概要

単純な画素ごとの線形補間では、光源位置の変化を表現できない(図3.3). これは、それぞれの画素に表示されている点での面法線と光源との関係が考慮されていないことが原因である. そこで、提案手法では、光源との関係を考慮した補間をすることで光源位置の変化を表現する(図3.4).

提案手法の概略図を図3.5に示す. 提案手法では、3.2節で述べた照明関数のパラメータを用いて、輝度値をパラメータ化し、照明関数テーブルに保存する. 任意の光源位置の画像は、照明関数テーブルの輝度値を参照することで生成される.

輝度値のパラメータ化において、視点位置と光源位置を求めておく必要がある. 視点位置は、カメラ座標系を用いることで原点とする. 光源位置は、ハイライト部分を検出することにより光源方向  $L$  を推定し[15], 距離係数  $k$  を用いて光源位置を決める.

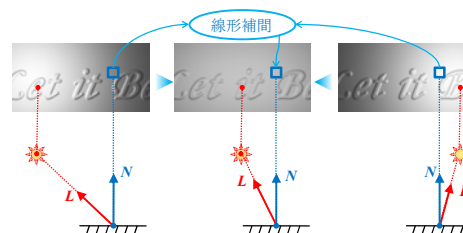


図 3.3 画素ごとの線形補間

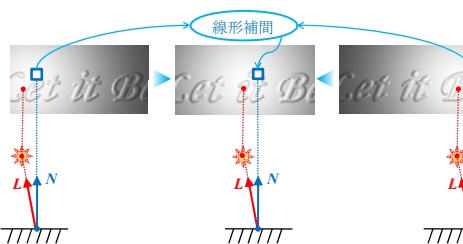


図 3.4 提案手法の概念

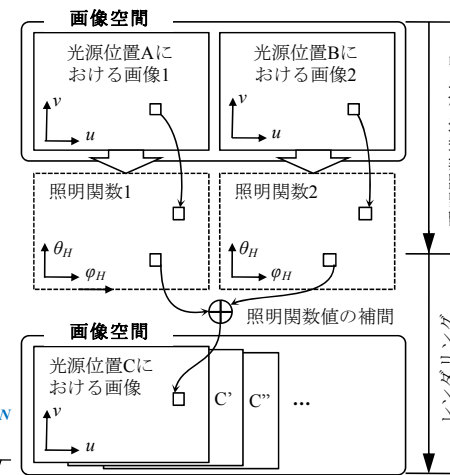


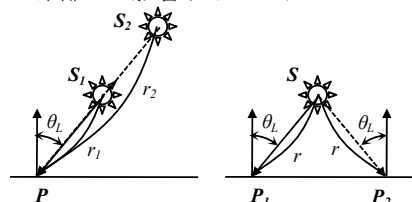
図 3.5 提案手法の概略図

### 3.4 照明関数のパラメータ削減

輝度値のパラメータ化において、3.2節で述べた照明関数  $g_i(\theta_L, \theta_V, \varphi, r, I_i)$  を用いる場合、5つのパラメータ  $(\theta_L, \theta_V, \varphi, r, I_i)$  を用いて輝度値をテーブルに格納する必要があり、照明関数テーブルのデータ量が膨大となる。

#### (1) 距離パラメータ $r$ の削除

光源（位置固定）と平面の関係において、光源位置  $S$  と計算点  $P$  間の距離  $r$ 、計算点  $P$  からの光源方向  $(\theta_L, \varphi)$  により一意に決まるので、距離  $r$  は削除できる。距離  $r$  が異なるのは図 3.6(a) に示すように光源位置  $S$  が異なる場合である。図 3.6(b) のように光源位置  $S$  に対して対称な位置の計算点  $P_1, P_2$  は、距離  $r$  が等しく方位角  $\varphi$  が異なる。すなわち、平面においては、距離  $r$  は光源方向  $(\theta_L, \varphi)$  にて表すことができる。ただし、凹凸のある面を考慮する際には距離  $r$  が影響する。これについては5章にて述べる。



(a) 距離の異なるケース (b) 等距離のケース  
図 3.6 計算点  $P$  と光源  $S$  間の関係

#### (2) 光源の放射強度 $I_i$ の削除

本研究では、単一の点光源で照らされたシーンを仮定している。そのため、入力画像ごとに照明関数テーブルを構築することにより、 $I_i$  は削除される。

本研究では、残る3つのパラメータ  $(\theta_L, \theta_V, \varphi)$  を2つのパラメータに近似する次の2種類の照明関数を考察し、比較・検討（4章で後述）を行う。

$$\cdot L_i = g_i(\theta_H, \varphi_H) \quad (3.2)$$

$$\cdot L_i = g_i(\theta_L, \theta_R) \quad (3.3)$$

3.4.1節では(3.2)式に示す2つのパラメータ  $(\theta_H, \varphi_H)$  を用いる手法（手法①）、3.4.2節では(3.3)式のパラメータ  $(\theta_L, \theta_R)$  を用いる手法（手法②）について述べる。

#### 3.4.1 パラメータ $(\theta_H, \varphi_H)$ を用いる手法（手法①）

Halfベクトルは、Blinn[16]やCook-Torranceの反射モデルにおいて、鏡面反射光成分の近似に用いられている。Halfベクトル  $H(\theta_H, \varphi_H)$  の天頂角  $\theta_H$  は法線  $N$  からの角度である(図 3.7)。方位角  $\varphi_H$  はハイライト中心  $Q$  における視線  $V_Q$  の面への正射影  $V'$  を基準にする。面上を光源が移動する際、輝度分布は光源位置に追従して動き、視点から見た輝度分布の位置と向きは  $V'$  に依存している(図 3.8)。ゆえに、照明関数の方位角  $\varphi_H$  を  $V'$  基準にする。

Halfベクトル  $H(\theta_H, \varphi_H)$  で近似することによる影響は、主に照明関数の反射強度の低

い部分に現れる(図 3.9)。これは、照明関数  $g_i$  に含まれる拡散反射光の成分が近似の影響を受け、図 3.9(a) のように視線方向に依存した分布に変化するためである。近似を行わなければ、図 3.9(b) に示す分布となる。提案手法は、光源移動時の画像生成を目指しており、人の目が敏感に反応するハイライト部分の表示に主眼を置く。

#### 3.4.2 パラメータ $(\theta_L, \theta_R)$ を用いる手法（手法②）

角度  $\theta_R$  は光源方向  $L$  の正反射方向ベクトル  $R$  と視線方向  $V$  とのなす角度である(図 3.10)。等方性の拡散反射光と鏡面反射光の反射分布を表す反射モデルとして、Phoneのモデルがある。Phoneのモデルにおいて、輝度値を算出する場合、拡散反射光成分は  $\theta_L$  に鏡面反射光成分は  $\theta_R$  のみに依存する。従って、角度  $(\theta_L, \theta_V, \varphi)$  は、角度  $(\theta_L, \theta_R)$  として表す。

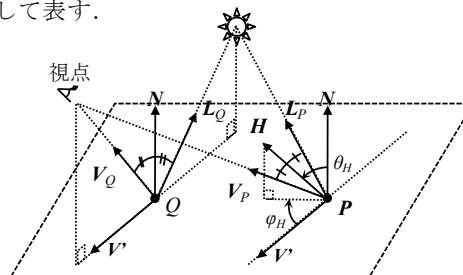


図 3.7 Halfベクトル  $H$

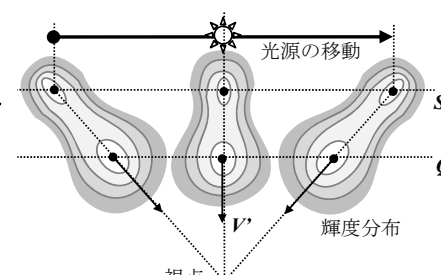


図 3.8 光源移動に伴う輝度分布形状の変化

○ 拡散反射 ○ 鏡面反射  
○ 拡散+鏡面反射

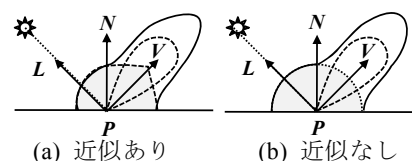


図 3.9 計算点における照明関数の反射強度の分布

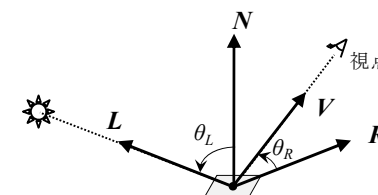


図 3.10 角度  $(\theta_L, \theta_R)$

### 3.5 レンダリング

照明条件（光源位置  $S$ 、放射強度  $I_i$ ）の異なる2枚の画像（Source, Target 画像）からそれぞれに照明関数テーブルが作成される。レンダリング時には、照明条件に応じて2つの照明関数テーブルを式(3.4)により補間し、任意の照明条件下での照明関数テーブルを得る。補間された照明関数テーブルから輝度値を参照し、画像にマッピングすることで任意の照明条件下での画像が生成される。

$$g_i = w_S(S, I_i)g_{i,S} + w_T(S, I_i)g_{i,T} \quad (3.4)$$

ここで、 $g_{i,S}$ 、 $g_{i,T}$  はそれぞれ Source と Target 画像の照明関数を表し、前節で述べた2

種類の方法により(3.2)式,あるいは(3.3)式を用いて求める.ブレンドする重み関数  $w_S$ ,  $w_T$ は照明条件,すなわち光源位置  $S$ と放射強度  $I_\lambda$ に依存する.

提案手法では, Source と Target 画像における光源位置を結ぶ直線上を光源が移動するとし,任意の時刻  $t$  (Source 画像を  $t=0$ , Target 画像を  $t=1$ , 出力画像を  $t=0\sim 1$ とする)での光源位置と放射強度を線形補間により求める.従って,時刻  $t$ における照明関数は, Source と Target 画像の照明関数の線形補間により算出する.

$$g_\lambda = (1-t)g_{\lambda,S} + tg_{\lambda,T} \quad (3.5)$$

#### 4. 比較・検討

4章では,3.4節で述べた2種類の輝度値のパラメータ化(手法①,手法②)について,比較・検討を行う.

##### 4.1 評価方法

図4.1に示すように,拡散反射と鏡面反射の割合を変化させた5種類の入力画像A,B,C,D,Eを用いて,照明関数テーブルと出力画像の比較・検討を行う.比較・検討に関しては,以下の4項目で評価する.

- I. 入力画像中の輝度値が出力画像に使用された割合
- II. 入力画像中の輝度値が照明関数テーブルに保存された割合
- III. 照明関数テーブルにおいて同じインデックス位置に保存された輝度値のばらつき
- IV. 出力画像の視覚的評価

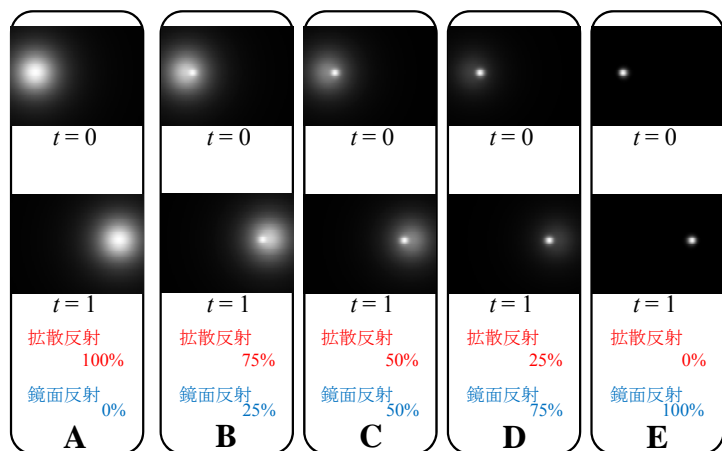
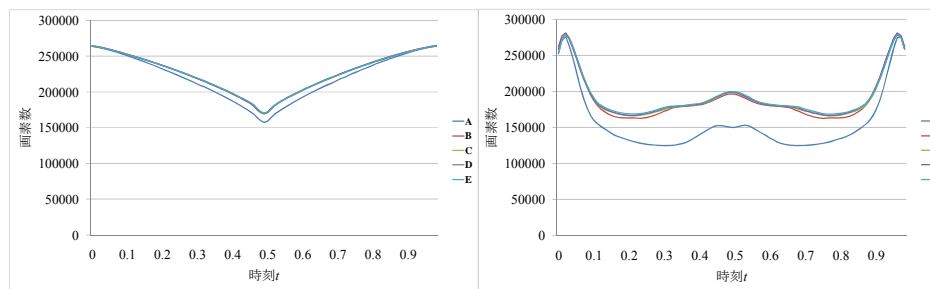


図4.1 入力画像 A,B,C,D,E

#### 4.2 評価結果

##### (1) 評価 I



(a) 手法①( $\theta_H, \phi_H$ )

(b) 手法②( $\theta_L, \theta_R$ )

図4.2 評価 I (画素数と時刻  $t$  の関係)

出力画像 ( $t=0.01\sim 0.99$ )中に表れた入力画像の輝度値の画素数を図4.2に示す.横軸が時刻  $t$ ,縦軸が画素数を示している.全体的に手法①のほうが入力画像の輝度値を出力画像に多く使用していると判断できる.

##### (2) 評価 II

表4.1 保存された輝度値の割合[%]

		A	B	C	D	E
$t=0$	手法①( $\theta_H, \phi_H$ )	28.1	29.2	29.2	29.2	29.2
	手法②( $\theta_L, \theta_R$ )	6.3	6.8	6.8	6.9	6.9
$t=1$	手法①( $\theta_H, \phi_H$ )	28.1	29.1	29.2	29.2	29.2
	手法②( $\theta_L, \theta_R$ )	6.4	6.8	6.9	6.9	6.9

照明関数テーブルに保存された輝度値の割合[%]を表4.1に示す.全ての入力画像で手法①のほうが割合が高いことが分かる.従って,手法①のほうが照明関数テーブルに不足データが少ない.

##### (3) 評価 III

表4.2 輝度値の分散値の平均

		A	B	C	D	E
$t=0$	手法①( $\theta_H, \phi_H$ )	10.1	9.7	13.7	21.5	32.8
	手法②( $\theta_L, \theta_R$ )	2.0	2.3	1.9	2.2	3.2
$t=1$	手法①( $\theta_H, \phi_H$ )	10.1	9.7	13.6	21.5	33.0
	手法②( $\theta_L, \theta_R$ )	2.0	2.3	2.0	2.2	3.1

照明関数テーブルにおいて,同じパラメータに保存された輝度値の分散を算出する(輝度値のとりうる範囲は0~255の256段階とする).照明関数テーブル内のパラメータごとに算出された分散値の平均を表4.2に示す.手法②のほうが分散値が小さいことが分かる.また,輝度値のばらつきが正規分布に従うと仮定すると,輝度値が手法①で $\pm 5.7$ ,手法②で $\pm 3.6$ 以下の範囲に含まれる確率は68.3%である.照明関数テーブ

ルで分散値の広がりを見ると、データ数の少ないところで分散値が大きくなっていた。

#### (4) 評価IV

出力画像を光源が移動するアニメーションとして表示し、視覚的に不自然な点がないか調査した。光源の移動に関して、手法①で入力画像 B,C,D を用いたときに拡散反射成分の動きが不自然に見えた。これは、3.4.1 節で述べた近似の影響である。また、手法①と手法②の両方でアーティファクトが見られた。これは、照明関数テーブルの不足データによる影響であると考えられる。

まとめると、評価 I, II に関しては、手法①のほうが良く、評価 III, IV に関しては、どちらが良いか判断できないという結果になった。総合的に判断し、手法①を採用する。

### 5. 凹凸を持つ面への拡張

#### 5.1 照明関数テーブル作成

面が凹凸を持つ（面法線が一樣でない）場合は、面全体での平均法線  $N'$  を用いて、照明関数テーブルを構築する。これは、光源と計算点の距離  $r$  ごとに異なる輝度値が同じテーブルに保存されるのを避けるためである。また、輝度値は補正して照明関数テーブルに保存する。輝度値は、計算点での局所的な面法線  $N_i$  より算出されているため、同計算点において平均法線  $N'$  から算出される輝度値とは異なる(図 5.1(a))。そこで、局所法線と面法線が異なる( $N' \neq N_i$ )計算点の輝度値を補正する。提案手法では、補正する区間( $N' \neq N_i$ )の輝度値を照明関数テーブル上でシフトさせ、値が連続になるように補正した輝度値を保存する(図 5.1(b))。

#### 5.2 凹凸を持つ面のレンダリング

レンダリング時には、計算点における局所的な面法線  $N_i$  を用いて照明関数テーブルから輝度値を取得する。このとき、計算点  $P$  から光源  $S$  までの距離  $r$  に応じて、輝度値を補正する必要がある。図 5.2 に示すように、計算点  $P_a, P_0$  において、光線方向  $L_a, L_0$  は局所法線  $N_a, N_0$  に対して等角度( $\theta_{La} = \theta_{L0}$ )であるが、光源までの距離  $r_a, r_0$  が異なるため、補正が必要となる。照明関数テーブルは平均法線  $N'$  に基づいて構築されているため、テーブルには  $P_0$  における輝度値が保存されている。そこで、 $P_0$  での照明関数値  $g_\lambda(P_0)$  を基準にして、計算点  $P_a$  の照明関数値  $g_\lambda(P_a)$  を、距離に関する補正係数  $w_g(r)$  を用いて補正する。

$$g_\lambda(P_a) = \frac{w_g(r_a)}{w_g(r_0)} g_\lambda(P_0) \quad (5.1)$$

点光源における拡散反射光と距離の関係から、補正係数  $w_g(r)$  は距離の 2 乗に反比例すると考えられるが、照明関数には鏡面反射光成分も含まれることを考慮し、式(4.2)に示す距離の逆数に依存する係数を用いる。また、距離  $r_0$  と  $r_a$  の関係は図 5.2 に示すように平均法線  $N'$  と光線  $L_a, L_0$  のなす角  $\theta'_{La}, \theta'_{L0}$  より算出できる。

$$\frac{w_g(r_a)}{w_g(r_0)} \approx \frac{1/r_a}{1/r_0} = \frac{\cos(\theta'_{La})}{\cos(\theta'_{L0})} \quad (5.2)$$

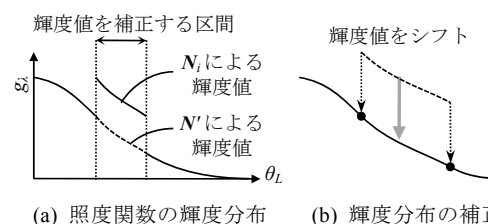


図 5.1 凹凸を持つ面の照明関数テーブル

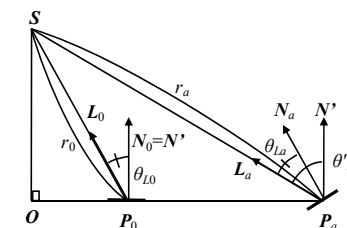


図 5.2 近似距離による補正

#### 5.3 適用例

微細な凹凸面で表現されたレリーフ(浮き彫り)画像に対して提案手法を適用した結果を図 5.3 に示す(\*). 2 枚の画像間を光源が移動していく様子が表現できており、かつレリーフの微細な凹凸形状における陰影の変化まで表現できている。

入力画像の解像度は  $1000 \times 1000$ [pixel]、出力画像の解像度は  $320 \times 480$ [pixel] とし、照明関数テーブルの不足データを減らすために、入力画像の解像度を大きくしている。計算時間は、照明関数テーブルの構築に 2.66[秒]、出力画像を 1 枚レンダリングするのに 0.26[秒]かかる。計算機は、CPU が Intel® Core™2 Quad 2.82[GHz]、メモリが 3.25[GB]のマシンを使用した。

### 6. まとめ

照明関数を用いて輝度値の再配置を行うことにより、滑らかな光源の移動を表現した画像を高速に生成できる手法を提案した。今後の課題として、実写画像を用いた検討、遮蔽物のあるシーンや複数光源で照らされたシーンへの拡張などがあげられる。

\* アニメーションは次の URL を参照してください。  
<http://www.eml.hiroshima-u.ac.jp/include/animation/ibr1.html>

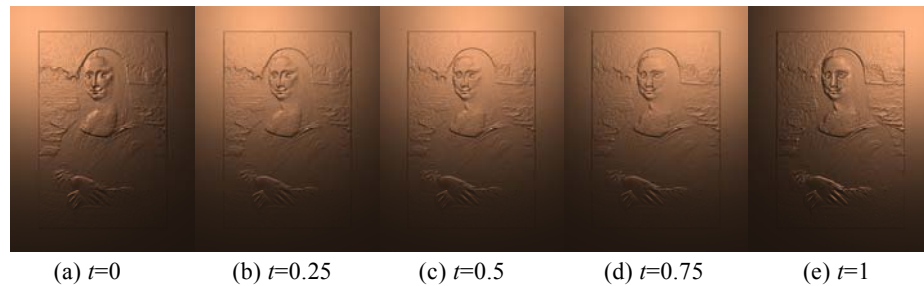


図 5.3 レリーフ画像の適用例

**謝辞** 本稿の作成にご協力頂いた皆様に、謹んで感謝の意を表する。

### 参考文献

- 1) S. Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szeliski, and M. Cohen, M, "The Lumigraph," Proc. SIGGRAPH, '96, ACM, pp. 43-54, 1996.
- 2) M. Levoy and P. Hanrahan, "Light Field Rendering," Proc. SIGGRAPH, '96, ACM, pp. 31-42, 1996.
- 3) Y. Dobashi, K. Kaneda, H. Nakatani, and H. Yamashita, "A Quick Rendering Method Using Basis Functions for Interactive Lighting Design," Computer Graphics Forum, **14**(3), pp. C229-C240, 1995.
- 4) P. P. Sloan, J. Kautz, and J. Snyder, "Precompute Radiance Transfer for Real-time Rendering in Dynamic, Low-frequency Lighting Environments," ACM Tran. on Graphics, **21**(3), pp. 527-536, 2002.
- 5) R. Ng, R. Ramamoorthi, and P. Hanrahan, "All-Frequency Shadows using Non-Linear Wavelet Lighting Approximation," ACM Transactions on Graphics, **22**(3), pp. 376-381, 2003.
- 6) K. Zhou, Y. Hu, S. Liu, B. Guo, and H. Y. Shum, "Precomputed Shadow Fields," ACM Trans. on Graphics, **24**(3), pp. 1196-1201, 2005.
- 7) W. Sun and A. Mukherjee, "Generalized Wavelet Product Integral for Rendering Dynamic Glossy Objects," ACM Transactions on Graphics, **25**(3), pp. 477-487, 2006.
- 8) T. Annen, Z. Dong, T. Mertens, P. Bekaert, H. P. Seidel, and J. Kautz, "Real-time, All-Frequency Shadows in Dynamic scenes," ACM Trans. on Graphics, **27**(3), Article 34, 2008.
- 9) T. Ritschel, T. Grosch, M. H. Kim, H. P. Seidel, C. Dachsbacher, and J. Kautz, "Imperfect Shadow Maps for Efficient Computation of In direct Illumination," ACM Transactions on Graphics, **27**(5), Article

129, 2008.

10) T. Manabe, K. Kaneda, H. Yamashita, and I. Shibabayashi, "A Method for Interpolating Illumination Distribution due to In-between Light Source Position under Interreflective Environment Using Isophotic Line Warping," The Journal of the Institute of Image Electronics Engineer of Japan, **31**(4), pp. 487-495, 2002.

11) T. Manabe, T. Betsumiya, and K. Kaneda, "Illumination Morphing: Smooth Transition of Luminance Distributions between Two Images," Proc. 9th CAD/ Graphics, pp.517-524, 2005.

12) K. Harada, K. Nishino, K. Ikeuchi, "Mixture of Spherical Distributions for Single-View Relighting," IEEE Transactions on PAMI, **30**(1), pp.25-35, 2008.

13) A. van den Hengel, D. Sale, A. R. Dick, "SecondSkin: An interactive method for appearance transfer," Computer Graphics Forum, **28**(7), pp. 1735-1744(10), 2009.

14) 岡部 孝弘, 佐藤 いまり, 佐藤 洋一: "陰に基づく符号化による法線推定", 電子情報通信学会論文誌, **J93-D**(8), pp.1281-1291, 2010.

15) 中島 正之, 山本 正信, グラフィックスとビジョン, 電子情報通信学会(編), オーム社, 1996.

16) J. Blinn, "Models of light reflection for computer synthesized pictures," *Computer Graphics*, **11**(2), pp. 192-198, July 1997.