物体の自己投射影 (セルフシャドウ) を利用した 不定型近接光源の推定 Estimation of Dynamic Near Light Sources

Using Self-Shadows

飯野 晋 高井 勇志 松山 隆司 *

2007年5月21日

概要

本論文では,形状と表面反射特性が既知である参照物体を撮影した画像から動的に変動する近接光源分布 を推定する手法を提案する.従来手法の多くは環境中の光源分布を無限遠光源分布と仮定しているが,こ の仮定を光源の位置や距離による放射強度の減衰の影響を無視できない環境に適用することは困難である. 近接光源分布の推定手法として,参照物体のセルフシャドウを利用した方法が既に提案されている.この方 法では炎など不定型で時間的にも変動する光源への対応が可能であるが,撮影環境における光源の大まかな 初期位置が既知である必要があるという問題があった.本論文ではこの方法における光源の初期位置を効 果的に推定する手法を提案し,本手法によって動的に変動する近接光源が推定できることを実験によって 示す.

This paper presents a framework for estimating near illumination distribution from a single image using a reference object with known shape and reflectance. Many of existent methods assume the lighting environment as a distribution of distant light sources, but this assumption is not appropriate for an environment where effect of distance of a light source is not ignorable. For estimating such a lighting environment, a method employing self-shadows of an object has been proposed. The method, however, requires to specify an appropriate initial distribution around the light sources in the environment, since excessive numbers of the initial light sources often cause instability of estimation. In this paper, we propose a method for overcoming this issue, i.e. finding the initial distribution, by analyzing relationship between self-shadows and the shape of the reference object.

^{*} 京都大学大学院情報学研究科

1 始めに

1.1 研究背景

光源環境は撮影状況を 3 次元的に記録し計算機 上で再現する際にその再生品質を大きく左右する要 素のひとつであり,物体形状やテクスチャと並ぶ重 要性を持つ.撮影空間の光源環境を事前に取得でき れば,例えば撮影した画像に対する照明効果をコン トロールすることが可能となり,コンピュータグラ フィックスの表現の幅をより広げる手がかりになる.

撮影環境の光源の分布モデルとしては遠方光源分 布モデルと近接光源分布モデルがある.撮影空間に おける光源分布を推定する手法に関して多くの研究 がなされているが,その多くは遠方光源分布の推定 方法についての考察である.近接光源分布モデルに 関しては遠方光源分布に対し未知情報が多い問題と いうこともあり,この場合についての考察があまり なされていない.本研究においては,遠方光源分布 の推定に用いられる手法を発展させ,近接光源分布 の推定に適用する現実的な手法を提案する.

1.2 関連研究

従来からある光源推定法には,大きくわけて次の 3つがある.

- 光源からの放射光を直接測定する方法
- 形状及び表面反射特性が既知である参照物体の表面反射光を測定する方法
- 上の参照物体の反射光を測定する方法において、参照物体の形状によって生ずる影(キャストシャドウ)を考慮に入れる方法

以下では,上記のそれぞれの方法について詳細を 述べ,関連する従来研究を紹介する.

1.2.1 光源からの放射光を直接測定する方法

この方法は一見シンプルで容易に実現可能な方法 に見えるが,光源分布における放射強度のダイナミッ クレンジは一般に非常に大きいため,広い測定レン ジをもつセンサーを用いるか,多重露光画像統合な どの工夫が必要となる.この方法で近接光源分布を 推定する場合は,測定した場所へ入射する光の放射 強度値それ自体からは光源までの距離を測定するこ とが不可能なため2箇所以上での測定によるステレ オマッチング等によって光源の位置を特定する必要 がある[7].また,特に多重露光画像統合による測定 では炎など動的に変化する光源に対応することがで きないという問題がある.

1.2.2 反射光を測定する方法

Torrance-Sparrow による物体表面の光線反射に関 する物理モデルによれば,一般に物体表面のある点 における光反射率は鏡面反射成分と拡散反射成分に 分解できる [4][5].鏡面反射成分に由来する反射光 は光線の入射角と反射角(測定する視点)に強く依存 する分布であるので,光線の入射方向を高い精度で 特定することができる [8].しかし,鏡面反射による 輝度値は広いダイナミックレンジを持つため,測定 には 1.2.1 節と同様の工夫が必要となる.

一方,拡散反射光のダイナミックレンジは小さく, 多くの場合は通常のディジタルカメラに用いられる CCD での測定が容易であるが,この反射光のみを利 用した光源推定は数学的に不良設定問題になること が Ramamoorthi と Hanrahan によって指摘されてお り[3],測定から得られる情報だけでは完全な光源分 布を推定することが原理的に不可能であることがわ かっている.

1.2.3 影を利用する方法

ここで, 佐藤らが既知の形状を持った物体が他の 物体に落とす影 (キャストシャドウ)を用いた光源分 布の推定方法を提案している [6].この研究では遠方 光源分布モデルの推定について考察しているが, 測 定で得られる情報が物体と光源の幾何学的な位置関 係を反映していることから, 測定面が拡散反射面で あっても安定な光源分布推定が可能であることが報 告されている.また, この手法の照光モデルは近接 光源分布への拡張が容易であり,実際そのように拡張 を行った研究が高井らによってなされており [1][2], スケルトンキューブと呼ぶ参照物体を使用した影を 含む測定面からの近接光源推定法を提案している. しかし後述の通り空間内で点状の近接光源の位置が が既知であることを前提とした解析であり,一般的 な状況に対応しているとはいえない.

2 セルフシャドウを利用した不定 型近接光源推定法

2.1 照光モデル

本研究においては,物体のある部分がその物体の 他の部分に落とす影を自己投射影(セルフシャドウ) と呼ぶ.また,近接光源及び光反射現象をモデル化 するため,次の3つを仮定する.

- 空間中の任意形状の近接光源は,多様な放射
 強度をもつ多数の近接点光源の集合によって
 近似できる.
- 物体表面の光の反射は,次で述べる Torrance-Sparrow モデルに従う.
- 反射面間の相互反射の影響は無視できる.

空間中に設置した物体の形状及び輝度測定を行う 面上における BRDF*1が既知であるとする.同じ空 間中の点 Pに放射強度 L_P の近接点光源があり,こ の物体表面上の点 x を視点 V から観測したとき,観 測される放射輝度 I(x) は以下のように表せる.

$$I(\boldsymbol{x}) = \mathcal{M}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{P})(k_d R_d + k_s R_s) L_{\boldsymbol{P}}$$
(1)

ここで M は , 点 P_i の光源が対象となる点上の点 xを照らしているかどうか (他の物体に遮られていない かどうか)を表すマスク関数である.点光源の位置と 物体の形状から計算され,光源からの光線が他の物体 あるいは物体の他の部分によって遮られている場合 は 0, 遮られていない場合は 1 となる. $k_d R_d + k_s R_s$ は簡略化された Torrance-Sparrow モデルに基づく物



図 1 反射点から見た光源と視点の方向を示す各ベ クトルの関係 . *H* は *L* と *V* がなす角を 2 等分す る中間ベクトル

体表面のある点における BRDF を表す項であり, k_d と k_s はそれぞれ拡散反射成分と鏡面反射成分の強さ の配分を決定するための係数である. R_d, R_s はそれ ぞれ次のように書ける.

$$R_d = \frac{N \cdot L}{r^2} \tag{2}$$

$$R_s = \frac{1}{r^2} \frac{1}{\boldsymbol{N} \cdot \boldsymbol{V}} \exp\left[-\frac{(\cos^{-1}(\boldsymbol{N} \cdot \boldsymbol{H}))^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3)$$

ここで,r は光源から点 x までの距離であり, N, V, H, L はそれぞれ点x に関係する単位ベクト ルで,N は点x における法線ベクトル,V はx か ら視点V をみた方向を表すベクトル,L はx から 光源 L_p を見た方向ベクトル,H はL とV がなす 角を二等分する中間ベクトルである (図1を参照). また, σ は物体表面の荒さ (roughness)を表すパラ メータで,別に測定して決定する.光源が無限遠光 源である,あるいはそのようにみなせる場合は,光 が光源からの距離によって減衰しないので,r = 1とする.

点光源が複数ある場合,式(1)は次のように拡張 される.

$$I(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{N} \mathcal{M}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{P}_i)(k_d R_d + k_s R_s) L_{\boldsymbol{P}_i} \quad (4)$$

多数の点 $x_1, x_2, \dots x_M$ について測定を行えば,次 の連立方程式が得られる.

^{*&}lt;sup>1</sup> Bidirectional Reflection Distribution Function:双方向反射率 分布関数

$$\begin{bmatrix} I(\boldsymbol{x}_{1}) \\ I(\boldsymbol{x}_{2}) \\ \vdots \\ I(\boldsymbol{x}_{M}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1N} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{M1} & K_{M2} & \dots & K_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{\boldsymbol{P}_{1}} \\ L_{\boldsymbol{P}_{2}} \\ \vdots \\ L_{\boldsymbol{P}_{N}} \end{bmatrix}$$
(5)

ここで, K_{mn} は次の式の通りである.

$$K_{mn} = \mathcal{M}(\boldsymbol{x}_m, \boldsymbol{P}_n)(k_d R_d + k_s R_s) \tag{6}$$

式(5)は次のようにまとめて表現できる.

$$I = KL \tag{7}$$

ただし,

$$\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1N} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{M1} & K_{M2} & \dots & K_{MN} \end{bmatrix}$$
(8)

$$\boldsymbol{I} = \begin{bmatrix} I(\boldsymbol{x}_1), & I(\boldsymbol{x}_2), & \dots & I(\boldsymbol{x}_M) \end{bmatrix}^T$$
 (9)

$$\boldsymbol{L} = \begin{bmatrix} L_{\boldsymbol{P}_1}, & L_{\boldsymbol{P}_2}, & \dots & L_{\boldsymbol{P}_N} \end{bmatrix}^T$$
(10)

である.

行列 K の各要素 K_{mn} が係数 $\mathcal{M}(x_m, P_n)$ を含むことにより K のランクの欠落が抑えられ,測定からより多くの情報を得ることができる.

L の各成分を得るためには,式 (5) について L の各 要素がゼロより大の条件付最小二乗法によって L を 最適化する.すなわち,

$$\min_{\boldsymbol{L}} \frac{1}{2} \|\boldsymbol{K}\boldsymbol{L} - \boldsymbol{I}\|_2^2 \quad \text{subject to } \boldsymbol{L} \ge 0 \qquad (11)$$

となる L を求める.



☑ 2 SkeletonCube

2.2 スケルトンキューブ

本研究では,参照物体としてスケルトンキューブ (図 2) [1] [2] と呼ぶ中空の立方体を用いる.

スケルトンキューブには以下のような特徴がある.

- 自己投射影が出来やすい
- 特徴点検出が容易

スケルトンキューブでは,光源がスケルトンキュー ブの外側にある限り,ある柱の影が必ず他の柱に落 ちる.式(5)における行列 K のランクは推定計算の 安定性に直結するため,これは最も重要なメリット である.また画像中で検出容易な特徴点を多く持つ ため,カメラキャリブレーションのための校正用物 体として用いることができる.スケルトンキューブ を用いるにあたっては,測定する点 x の群としては スケルトンキューブの柱の内壁の点を選ぶ.上に述 べた通り,スケルトンキューブの柱には必ず他の柱 の影が落ちており,セルフシャドウから情報を最大 限活用するためである.

2.3 光源初期位置推定

2.1 節で述べた方法は,近接点光源の位置(複数あ る場合はそれぞれの点光源の位置)が既知であるこ とが前提となるが,光源推定を行う範囲(以後,推定 空間と呼ぶ)の中のどの位置からの放射強度が0で ないかは通常既知ではない.この場合の単純な拡張 として,推定空間内の全ての位置に点光源が存在す ると仮定し,これらの位置座標を用いて行列 K を生 成し式(11)を解くことが考えられるが,仮定する点 光源の数が大きくなると行列 K の要素数が膨大に なり,現実的な時間内に推定を終えることが困難と なる.従って,なんらかの方法で光源分布を近似的 に算出して空間分布の放射強度が0 でない範囲を絞 りこみ,この範囲に限って密な光源分布推定を行う 方法が効率が良い.

2.3.1 光源存在範囲の検出

ここで次のことに着目する.ある点 P に点光源が あり,適当な物体 A がその光を遮って輝度測定面 B に影を落としているとする.輝度測定面 B からこの 点 P を見たとき,点 P とは異なる方角にある点 Q にある近接点光源によって生じる影は点 P にある点 光源によって生じる影と大きく異なるが,点 P と同 じ方角にある点 R にある近接点光源によって生じる 影は点 P の近接点光源によって生じる影と良く似て いる(図 3).このことから,まず光源分布として無限 遠光源を仮定して推定計算を行えば,参照物体から みて本来の光源があるのと同じ方向に放射強度が表 れると考えられる.

このようにして参照物体から見た光源の方角が特定できる.次に特定された方位線上で本来の光源に最も近い影の形を与えるのは当然本来の光源に最も近い点である.このように考えると,

1. 光線が入射する方角を特定する

2. 光源までの距離を特定する

の2段階を踏んだ光源存在範囲の検出法が考えられる.

2.3.2 スケルトンキューブを用いた場合の方角誤検 出への対応

参照物体としてスケルトンキューブを用いた場合 には,自己投射影が生じる場所がそれぞれの柱毎に なるため影が離散的になり,それぞれの影が本来対 応しない柱によって遮られたものであるといわば誤 認された形で本来の光源が存在しない方角に光源を 検出する場合がある(図4).これを取り除く方法を 考える.



図 3 星印は光源の位置を示す.物体 B からみて 物体 A の方角にある光源の方が,物体 A の方角に ない光源より良い近似をあたえる

真の光源からの光によって生じる影はスケルトン キューブ内壁の全ての面に出現する.そこで,スケ ルトンキューブ内壁のあるひとつの面上の輝度値の みを用いて方角の検出を行うと,この面から見て, この面に落ちた影に対応しうる全ての柱を見た方角 を検出することになるが,この中には真の光源があ る方角が含まれる.輝度値を測定する面を変えると, 影の場所が変わるために本来対応しないはずの柱を 見た方角は変化するが,真の光源がある方角はこの 面によって検出される方角の中にも必ず含まれる. 従って,観測しうる全ての面において共通に検出さ れる方角が本来の光源のある方角であると判断でき る (図 5). そこで,放射輝度値の観測を行う点を各面 毎にあるいは柱毎にグループ分けし、それぞれのグ ループについてベクトル I を測定して式(7)を作成 した後,式(11)によって得られたLについて,多 くのグループで放射強度が得られた方角を本来の光 源が存在する方角であるとする.

2.4 粗密探索

このようにして特定された光源位置に対して,さ らにその周囲の空間にも近接点光源の存在を仮定し て,これらの位置座標を用いて新たな K を生成して 式(11)を解き,放射強度が現れた点の周囲に再び近 接点光源の存在を仮定する,といった一種の粗密探 索を繰り返す(図6)ことで,推定計算の精度をより 上げることができる.



図4 実線の先にある光源によって生じる影は,破 線の先にある光源による物との区別が困難なため, しばしば方角の誤検出が起こる



図 5 全ての影について共通して現れる方角が光源 のある方角

3 実験及び結果

実験は,計算機上で生成したデータ及び実光源環 境で撮影した画像を用いて有用性を確認した.

3.1 計算機シミュレーション

- 3.1.1 条件
 - スケルトンキューブ スケルトンキューブの寸法は,縦横高さ全て 100mm とした.スケルトンキューブの各辺 は推定空間のそれぞれ x, y, z 各座標軸の向き と一致させ,頂点のひとつを原点に一致させ た(以後,推定空間における座標の目盛は mm で計るものとする).表面の反射特性は完全 Lambert 面(表面上の全ての点で k_d = 1, k_s = 0)とし,この表面で 1mm 毎の放射輝度測定 を行った.
 - カメラ位置

推定空間内の座標で (2000,2000,2000) とし, スケルトンキューブの重心 (50, 50, 50) を直視 する向きとした.これによって,スケルトン キューブ内壁面上の輝度測定が可能な点数は 7506 点となった.

- 輝度測定点のグループ分け カメラ位置から可視である点群を同一平面 ごとにまとめた.すなわち,平面 z = 10, x = 10, y = 10を考え,それぞれの平面上に ある測定点をひとつのグループとして方角特 定を行った.
- 方角特定のための位置座標群 推定空間の原点を中心とする正十二面体の各 面を再帰的に分割して得られた測地ドームを 考え,その各頂点 642 点を原点から見たそれ ぞれの方角に無限遠点光源があると仮定した.
- 検出された方向線上の探索
 特定された1方向あたりに,20mm 毎に最
 大 50 点を配置し,推定空間の原点を中心に
 1000mm の範囲を捜索するものとした.
- 粗密探索の条件

方角,距離を限定した後の探索は,式(11)の結 果において影響度(各点光源の放射強度を光 源の位置から参照物体の重心までの距離の2 乗で割った値として定義する)がある閾値*²以 上となった点を重心とする一辺64mmの立方 体(各辺はx,y,z軸に並行)の頂点及びこの立 方体をを64個の小立方体に分割する点,合計 125点を新たに配置し(図6),これらの位置を 仮定して新たな K を生成した.繰り返しの 計算を行う場合は繰り返しのたびにこの立方 体の大きさを半分にしていくことでより詳し い推定となるようにした.また,粗密探索の 繰り返しは7回とした.

最終過程の式 (11) による推定結果で得られた *L* と行列 *K* との積 *I_{est}* を計算し,輝度測定 で得られた *I* との各要素の差の絶対値を並べ

精度計算

^{*2} 今回の実験では2 とした.



図6 この実験で用いた粗密探索の方法.簡単のた め2次元的に表示してある.星印を本来の光源と する.左の図で黒点に放射強度が検出されたとき, 次の推定では右の図で黒の格子点として示された 点に光源があると仮定して光源推定を行う.さら に次の推定ではこの格子のサイズを半分にする.

た残差ベクトルを I_d とする . I_d の要素の最 大値と平均で推定計算の精度を評価すること にした .

● 設置した光源

以下の条件において実験を行った.

- case1 点 (200, 300, 400) に,計算機上で放 射強度 6.0 × 10⁷の値をもつ近接点光源 を設置した.
- case2 点 (150, 160, 170) に放射強度 6.0× 10⁷の近接点光源を設置した .
- case3 (150, 150, 600), (150, 600, 150), (600, 150, 150)の3点に計算機上で放射強度 2.0×10⁷の値をもつ近接点光源を設置 した.
- case4 直線 (x=500, y=600) 上に, z=200~ 400の範囲で 20mm おきに放射強度 1.0× 10⁷ の近接点光源を合計 11 点設置した.

3.2 結果及び考察

2節で述べた手法を用いて光源位置の特定を行っ た結果を各 case について図 7 に示す.また,得られ た光源分布でスケルトンキューブを照らして得られ た輝度値と元の光源分布による輝度値との間の残差 について最大値と平均値を表 1 に,各 case の粗密探 索の各繰り返しの過程における残差の平均値と分散 を図 8 に示した.

まず,2.3.2節で述べた方法で光源のある方角が安



図7 距離検出の結果.上から case1, case2, case3, case4.図中では白いダイヤモンド型の図形の中心 が真の光源の存在位置.四角形の点は放射強度が 検出された位置

case	輝度最大値	最終残差最大値	最終残差平均値
case1	252.02	100.86	0.2123
case2	1630.8	433.59	4.0408
case3	92.561	50.345	0.7947
case4	156.62	10.110	0.1339

表 1 CG シミュレーションにおける最終的な残差



図 8 各 case における粗密探索の繰り返し回数と スケルトンキューブ上の輝度残差の関係.*は残 差の平均値を表し,*から延びる縦棒の長さは標準 偏差を表している.どの case においても徐々に減 少傾向にあることが見て取れる.

定に推定できることが分かった.全てのケースにに おいて,スケルトンキューブから見て光源のある方 向に放射強度が現れていることが分かる.一方で距 離の特定は,必ずしも真の光源に最も近い位置に放 射強度が現れるとは限らないことが分かった.case3 の距離特定では(150,600,150)と(600,150,150)の 位置の検出結果が大きく外れている.また case4 で も一番上の光源のみ距離の特定がはずれている.こ の理由のは次のように考えられる.

本来の光源がある場所の周囲に仮想的に近接点光 源が多数あると仮定してこれらの位置を用いて式 (11)を解いたとき,マクロに見た場合には2.3節で 論じた通り参照物体から見て真の光源がある方角に 最も近い点に放射強度が表れるといえるが,これを 厳密に考えると参照物体に落ちた影をより正確に再 現できる点, すなわち光を遮る柱の稜線と落ちた影 の稜線を含む平面上に放射強度が現れやすいと考え られる.(図9).影と柱の間違った対応によって本来 の光源とは異なる方角に強度が検出されるのも同じ 理屈である.参照物体の近傍で影の形状を良く近似 しうる光源の位置を考えると,これは単純に影と柱 を結ぶ直線の近くにある点であって,必ずしも参照 物体の重心を通る直線上にあるとは限らない.この ような場合には,方角特定で特定された直線と,影 と柱を結ぶ直線の交点付近に放射強度が現れるであ ろう.

ここで残差計算の結果を見てみる(表 1).ただし この残差はあくまでも参照物体を推定光源で照らし たときの放射輝度値と観測輝度値の差に過ぎず,推 定空間全体の光源環境の誤差を計れるものではない. case2 については分散が極端に大きいが,これは本来



図 9 放射強度が検出され易い点を示す直線(実線).影の形状を再現し易いところ,すなわち本来の光源と参照物体の稜線を結ぶ線上(3次元的には面上)に放射強度が現れやすい.破線は最初の方角検出で検出される線(本来の光源のある方角に近い方角が検出される)

の光源がスケルトンキューブに近すぎるため,測定 した輝度値が元々非常に大きな幅を持っている(0~ 1500 程度)のでこのような結果になっていると考え られる.全ての case においても粗密探索の繰り返し によって平均残差は輝度最大値との相対値で1%以 下まで減少した.残差最大値や分散は粗密探索を繰 り返してもあまり減少することはない(case1の場合 輝度最大値との相対値で40%).この理由は,実験 に用いた光源が点光源であり,光源位置の推定や粗 密探索の結果で完全に正確な本来の光源の場所にた どり着かなかった場合に影の形状が完全に再現でき ないことから,影の輪郭の部分で輝度値の残差が大 きくなると考えられる.

3.3 実環境実験

3.3.1 条件

次のような条件で実験を行った.

- スケルトンキューブ
 各辺 100mm, 柱の幅 10mm, 表面反射特性は
 均一な Lambert 面とみなせるものを用いた.
- カメラ
 Point Gray Reserch 社の Dragonfly を用い,
 VGA 解像度で撮影した.



図10 実環境実験の撮影状況

● カメラ位置

図 11 に示した画像上で手前下側に写ってい る頂点を推定空間の原点とし,右奥行き方向 に延びる辺を x 軸,左奥行き方向に延びる辺 を y 軸,手前側で上方向に延びる辺を z 軸と し,画像上での各頂点の位置を目視で調べて 各点の対応づけを行った.この結果,スケル トンキューブ内壁の輝度測定が可能な可視点 は7160点となった.

- 輝度測定点のグループ分け
 平面 x = 90, y = 90, z = 10 を考え, それぞれの平面上にある測定点をひとつのグループとみなして方角特定を行った。
- 方角特定 推定空間の原点を中心と正 12 面体の各面を 再帰的に分割して得られた測地ドームを考え, その各頂点のうち z > 0 となる 1241 点を原 点から見た方角に無限遠点光源があると仮定 して K を生成した.
- 設定した状況
 図 10 にあるようにロウソクの炎を光源に用いた.
- 環境光の考慮
 環境光を考慮して,粗密探索において行列 K
 を生成する際,その前の段階で放射強度が得られた点の周囲だけでなく,方角測定のとき
 に使用した無限遠点光源の存在も考慮して生
- 粗密探索の方法及び精度計算
 シミュレーションの場合と同様にした.

成した.



図 11 分析対象にしたスケルトンキューブの画像



図 12 実環境で撮影した画像から得た輝度値を用 いて光源分布推定を行った結果.黒点は放射強度 が現れた点

3.3.2 結果

結果を図 12 に示す.また,粗密探索を繰り返して いった結果の残差の変化を図 13 に示す.図 10 中で 左側にあるロウソクの位置はこの手法でかなり精度 良く推定することができたが,右側のロウソクにつ いては方角に関しては正確に特定することができた ものの,距離に関しては大きく外れる結果となった ため(図 12 中で右側の丸で囲った点),粗密探索の繰 り返しによっても本来の位置にたどり着くことがで きなかった.これは CG シミュレーションの case3 と同様の理由によると考えられる.

残差平均値については,粗密探索の繰り返しにお いて CG シミュレーションのときほど大きな減少は 見られず(表2),輝度最大値の比で2.7%となった. 原因としては,解析に画像を用いた関係上,輝度値の ダイナミックレンジは0から255までに制限され, また分解能も整数値に制限されることから,数値計 算上の誤差が生じていると考えられる.



図 13 実光源環境での粗密探索の繰り返し回数と スケルトンキューブ上の残差の関係.グラフの見 方は図 8 と同じ

4 結論

本研究では、参照物体のセルフシャドウをもちい た方法により近接点光源の初期位置を特定する手法 を提案し、それによって近接光源分布を推定が可能 なことをを CG シミュレーション及び実光源環境で 撮影した画像で確認した、一方で距離を特定する手 法についてはうまく作用しない場合があることが分 かった、これは本来の光源が参照物体の近傍にある とき、方角特定で検出された直線上の点で本来の光 源に最も近い位置が必ずしも影の形状を正確に再現 しうる位置になるとは限らないことが原因であり、 参照物体の遠方で成り立つ仮定が参照物体の近傍で 成立しないために発生する問題であると考えられる、

今後の課題として,第一により精密に光源までの 距離を特定する方法の考案がある.第二に,この手 法では多重露光画像の統合によるダイナミックレン ジ拡大が不要なため,篝火,稲妻といった時間的に 変動する光源の推定にも使用できることから,参照 物体を撮影した動画の各フレームについて近接光源 分布の推定を行うことで動的に変化する光源の変化 を時系列で記録するなどの応用が考えられる.

表2 実画像に置ける最終的な残差

	輝度最大値	最終残差最大値	最終残差平均値
実画像	228	78.864	6.0476

5 謝辞

本研究は,独立行政法人科学技術振興機構(JST) チーム型研究 CREST「デジタルメディア作品の制 作を支援する基盤技術」,及び,文部科学省科学技術 振興調整費リーディングプロジェクト「大型有形・ 無形文化財の高精度デジタル化ソフトウェアの開発」 の支援を受けて行った.

参考文献

- [1] 高井勇志,牧淳人,松山隆司.スケルトンキュー ブを用いた光環境推定.画像の認識・理解シンポ ジウム 2004 論文集 2pp.241-246,2004.
- [2] Takeshi Takai, High Fidelity and Versatile Visualization of 3D Video. 京大博士論文,2005.
- [3] R.Ramamoorthi and P.Hanrahan. A Signal-Processing Framework for Inverse Rendering. *Proc ACM SIGGRAPH*,pp.117-128,2001.
- [4] Henrik Wann Jensen,「フォトンマッピング -実
 写に迫るコンピュータグラフィックス」(オーム 社,平成14年,訳:苗村健)
- [5] James D.Foley, Andries van Dam, Steven K.Feiner, F.hughes 共著「コンピュータグラ フイックス 理論と実践」(オーム社,平成13 年,監訳:佐藤義雄)
- [6] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi: Illumination distribution from shadows. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 25(3):290–300, 2003.
- [7] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi. Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene. *IEEE Transactions on Visualiza*-

tion and Computer Graphics, 5(1):1-12, 1999.

[8] P. Debevec. Rendering synthetic objects into real scenes: Bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography. In ACM SIGGRAPH, pp. 189–198, 1998.