

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

飯 野 晋[†] 高 井 勇 志[†] 松 山 隆 司[†]

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。

Estimating of non-rigid near light source using self-shadows

SUSUMU IINO,[†] TAKESHI TAKAI[†] and TAKASHI MATSUYAMA[†]

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.

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

[†] 京都市立大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kyoto University

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⁾。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¹²⁾、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*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。

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

ここで $\mathcal{M}$ 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。

$$R_d = \frac{N \cdot L}{r^2} \quad (2)$$

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

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。

* Bidirectional Reflection Distribution Function: 双方向反射率分布関数

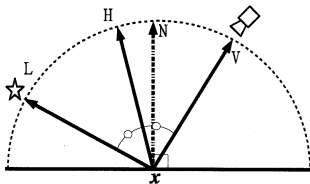


図1 反射点から見た光源と視点の方向を示す各ベクトルの関係。
H は L と V がなす角を 2 等分する中間ベクトル

点光源が複数ある場合、式 (1) は次のように拡張される。

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

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。

$$\begin{bmatrix} I(x_1) \\ I(x_2) \\ \vdots \\ I(x_M) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1N} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{M1} & K_{M2} & \dots & K_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{P_1} \\ L_{P_2} \\ \vdots \\ L_{P_N} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、 K_{mn} は次の式の通りである。

$$K_{mn} = \mathcal{M}(x_m, P_n)(k_d R_d + k_s R_s) \quad (6)$$

式 (5) は次のようにまとめて表現できる。

$$I = KL \quad (7)$$

ただし、

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

$$I = [I(x_1), I(x_2), \dots, I(x_M)]^T \quad (9)$$

$$L = [L_{P_1}, L_{P_2}, \dots, L_{P_N}]^T \quad (10)$$

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、

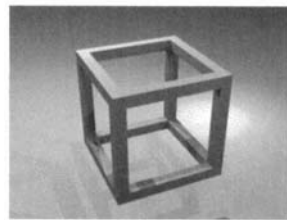


図2 SkeletonCube

$$\min_L \frac{1}{2} \|KL - I\|_2^2 \quad \text{subject to } L \geq 0 \quad (11)$$

となる L を求める。

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、セルブ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

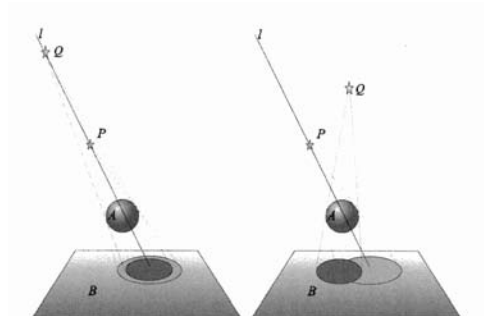


図3 星印は光源の位置を示す。物体Bからみて物体Aの方角にある光源の方が、物体Aの方角にない光源より良い近似をあてえる

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。

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す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

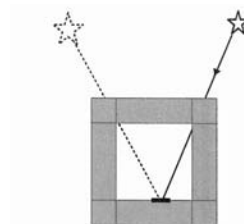


図4 実線の先にある光源によって生じる影は、破線の先にある光源による物との区別が困難なため、しばしば方角の誤検出が起こる

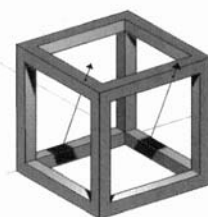


図5 全ての影について共通して現れる方角が光源のある方角

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したが、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、観測す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。

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 の範囲を探索するものとした。

● 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[☆]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。

● 精度計算

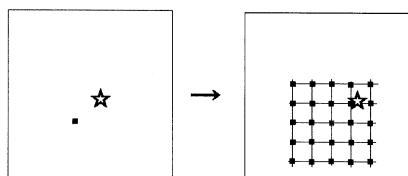


図 6 この実験で用いた粗密探索の方法。簡単のため 2 次的に表示してある。星印を本来の光源とする。左の図で黒点に放射強度が検出されたとき、次の推定では右の図で黒の格子点として示された点に光源があると仮定して光源推定を行う。さらに次の推定ではこの格子のサイズを半分にする。

表 1 CG シミュレーションにおける最終的な残差

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

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 6.0×10^7 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 6.0×10^7 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 2.0×10^7 の値をもつ近接点光源を設置した。

case4 直線 ($x=500, y=600$) 上に、 $z=200 \sim 400$ の範囲で 20mm おきに放射強度 1.0×10^7 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

[☆] 今回の実験では 2 とした。

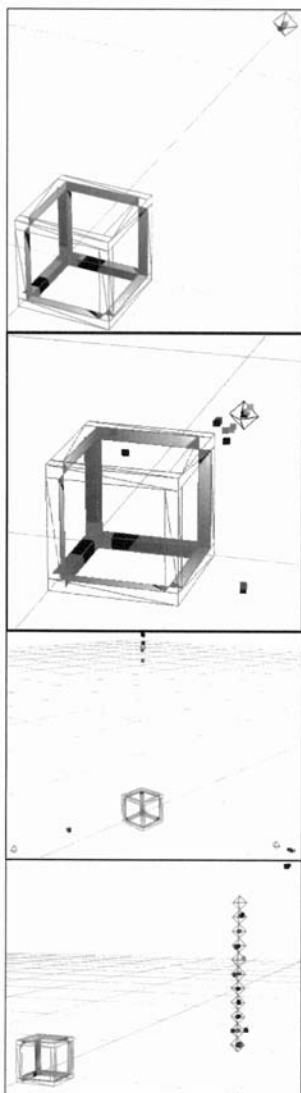


図7 距離検出の結果. 上から case1, case2, case3, case4. 図中では白いダイヤモンド型の図形の中心が真の光源の存在位置. 四角形の点は放射強度が検出された位置

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

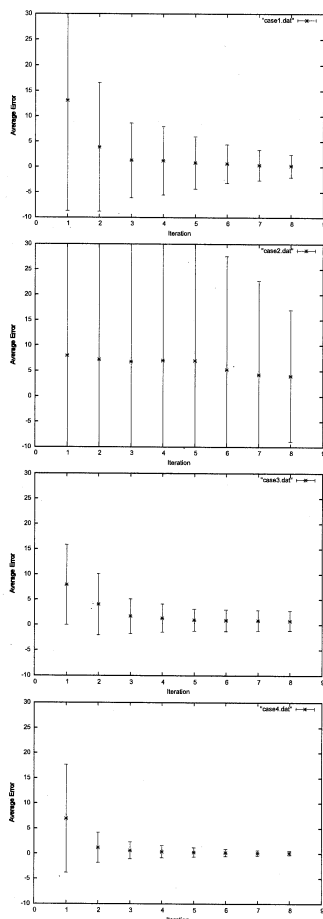


図8 各 case における粗密探索の繰り返し回数とスケルトンキューブ上の輝度残差の関係. * は残差の平均値を表し, * から延びる縦棒の長さは標準偏差を表している. どの case においても徐々に減少傾向にあることが見て取れる.

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

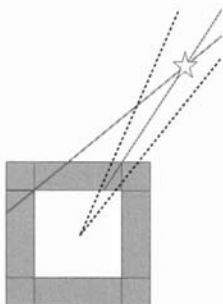


図 9 放射強度が検出され易い点を示す直線(実線)、影の形状を再現し易いところ、すなわち本来の光源と参照物体の稜線を結ぶ線上(3次元的には面上)に放射強度が現れやすい、破線は最初の方角検出で検出される線(本来の光源のある方角に近い方角が検出される)

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、これは本来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。
- 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



図 10 実環境実験の撮影状況

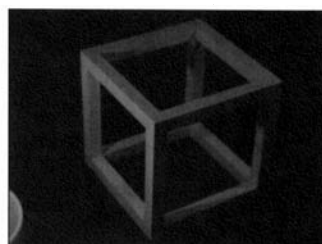


図 11 分析対象にしたスケルトンキューブの画像

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、方角測定のために使用した無限遠点光源の存在も考慮して生成した。
- 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。

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

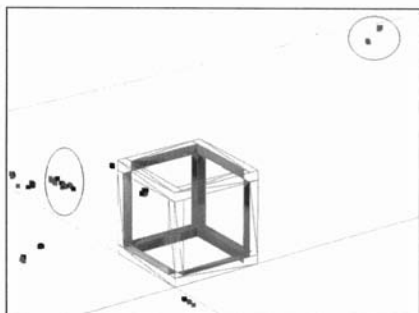


図 12 実環境で撮影した画像から得た輝度値を用いて光源分布推定を行った結果。黒点は放射強度が現れた点

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

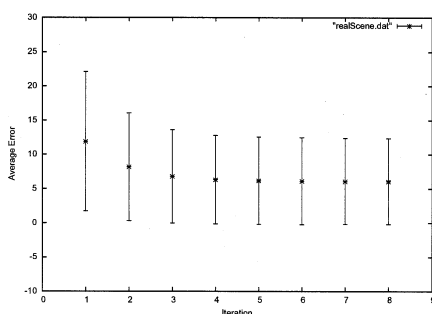


図 13 実光源環境での粗密探索の繰り返し回数とスケルトンキューブ上の残差の関係。グラフの見方は図 8 と同じ

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。

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 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。

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ィックス 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 Visualization 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.