

スケルトンキューブを用いた光環境推定

高井 勇志[†] 牧 淳人[†] 松山 隆司[†]

[†] 京都大学大学院情報学研究科 〒 606-8501 京都市左京区吉田本町

E-mail: †{takesi-t,maki,tm}@vision.kuee.kyoto-u.ac.jp

あらまし 本論文では、スケルトンキューブと呼ぶ中空の立方体を用いた光環境推定法を提案する。このスケルトンキューブは、どのような方向から照射する光源によっても、内壁に自身の影が自身に投影される、つまりセルフシャドウが生じる、という特徴を持っている。本論文では、1) スケルトンキューブのセルフシャドウを解析することによる光環境推定と、2) 無数の近接点光源の集合による光環境表現、について述べる。光環境推定については様々な方法が提案されているが、その多くは光環境を無限遠光源の集合で表現している。近接光源を扱った方法については、殆どが少数の光源が存在する光環境のみを対象としており、一般的な光環境を扱った方法は提案されていない。そこで我々は、無数の近接光源により表現された光環境を推定する実践的なアプローチを提案する。以下では、セルフシャドウを用いた光環境推定について検証し、スケルトンキューブの参照物体としての有効性について述べた後、シミュレーションによる様々な光環境の推定結果を紹介する。

キーワード 光源推定, 光環境, 近接光源, セルフシャドウ, スケルトンキューブ

Skeleton Cube for Lighting Environment Estimation

Takeshi TAKAI[†], Atsuto MAKI[†], and Takashi MATSUYAMA[†]

[†] Graduate School of Informatics, Kyoto University Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

E-mail: †{takesi-t,maki,tm}@vision.kuee.kyoto-u.ac.jp

Abstract This paper presents a new method for lighting environment estimation with the Skeleton Cube. The Skeleton Cube is a small hollow cube, whose shadows are casted on itself, i.e. it has self-shadows. Since it is a cube of a known size, it can also serve as an object for geometric camera calibration. The key ideas of our method are 1) the estimation of lighting environment by analyzing self-shadows and shading of the Skeleton Cube, and 2) the representation of lighting environment by plenty of point light sources. While various approaches for lighting environment estimation have been proposed, the lighting environment is represented either as a set/distribution of distant light sources, or a few near point light sources. Unlike previous approaches, our goal is to develop a framework of inverse lighting for dealing with a number of light sources while taking their proximity and radiant intensity into account. In this paper, we verify the advantages of the Skeleton Cube, propose a practical technique for lighting environment estimation by analyzing the self-shadows, and illustrate the performance with experiments using CG simulations.

Key words Light source estimation, Lighting environment, Near light source, Self-shadow, Skeleton Cube

1. はじめに

現実感の高い自然な画像を合成・生成するために必要となる、現実空間における光源の情報(光環境)を得ることは、コンピュータグラフィックスの分野のみならずコンピュータビジョンの分野においても、非常に重要な課題となってきた。光源の情報を得ることができれば、画像に対する照明効果を操ることが可能となり、例えば、実画像中に自然な陰影を伴った仮想物体を挿入したり、画像中の物体から照明効果を除去すると

いった処理の手がかりとすることができる。

光環境推定については、直接的あるいは間接的に推定する方法が数多く提案されている [1], [2], [3], [4], [5], [6], [8], [9], [10], [11], [14], [15], [16], [17], [18]。

直接法は、光環境をカメラによって撮影し、その画像の輝度値を解析することで、光環境を推定する方法である [2], [11]。Debevec [2] は、鏡面球を用いてその中心へ入射するすべての光を撮影し、それ全体を光源とみなす方法を提案している。この方法では、鏡面球の中心位置での光源分布は正しく表現できる

が、その他の位置での光源分布を正確に表現しているとは言えないため、近接光源を表現することは困難である。佐藤らは、魚眼レンズで撮影したステレオ全方位画像を用いて3次元光源分布の計測法を提案している[11]。Debevecの方法とは異なり光源の位置を推定しているが、推定した光源は近接光源として扱われておらず、入射する照度は、魚眼レンズの投影中心で得られる正確な値を基にして補間を行い表現している。

一方、間接法は光環境中に配置した何らかの参照物体の陰影を解析し、その光環境を推定する方法である[1],[3],[4],[5],[6],[8],[9],[10],[14],[15],[16],[17],[18]。物体の陰影を用いた光源推定は古くから行われており、参照物体の反射特性を一律な完全拡散反射と仮定し1つの無限遠光源を推定する方法[19],[6],[17]や、より一般的な光源モデルを用いた光源推定[20]が提案されている。また、MarschnerとGreenberg[4]は、少数の光源の方向と放射強度を参照物体の反射輝度から最小二乗法を用いて推定する方法を提案している。しかしながら、参照物体の反射特性を完全拡散反射であると仮定し、その陰影のみを用いた光環境推定問題は、数値解析的に不良設定問題であることが知られている[9],[1]ため、安定に光環境を推定することは困難である。YangとYuille[15]は、参照物体の陰影のみではなくOccluding Boundaryを利用した光源推定法を提案している。また、ZhangとYang[16]は、この方法を拡張し複数の無限遠光源を推定する方法を提案している。以上の方法では、参照物体の反射特性を完全拡散反射と仮定しているが、ZhouとKambhamettu[18]は、複数の鏡面球上のハイライトをステレオマッチングすることで、光源の位置や放射強度を推定する方法を提案している。一方、佐藤らは、既知の形状を持った物体が他の物体に落とす影、つまりキャストシャドウを利用して光環境を推定する方法を提案している[10]。物体の陰影とキャストシャドウの多様性を組み合わせることで安定に光環境を推定することができ、さらに、物体の反射特性が未知の場合でも光環境推定が可能であるといった優れた方法である(以下、キャストシャドウ法と呼ぶ)。ただし、光環境については無限遠光源を仮定している。

以上をまとめると、殆どの光環境推定問題では無限遠光源を仮定しているため、屋外のように光環境を無限遠光源の集合とみなせる場合は良い推定を行えると考えられるが、スタジオのような室内にある近接光源を扱わなくてはならない光環境を正しく推定することは容易ではない。

本論文では、キャストシャドウ法の枠組みの新たな方向性として、スケルトンキューブと呼ぶ中空の立方体を参照物体とし、近接点光源による光環境の推定を目指す方法を提案する。スケルトンキューブの大きな特徴は、空間中のほぼいかなる位置にある近接点光源によってもその影が自分自身に落ちる、つまり、セルフシャドウが生じる点である。以下では、まず、スケルトンキューブの参照物体としての有効性を検証し、近接点光源によって表現された光環境を紹介した後、この2つの組み合わせによる光環境推定法について述べ、シミュレーションによってその有効性を示す。

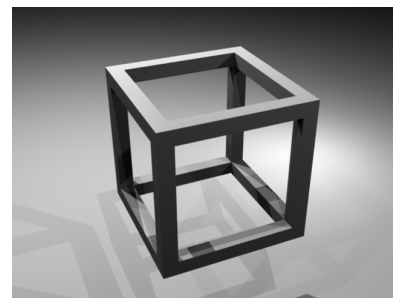


図1 スケルトンキューブ

2. スケルトンキューブ

2.1 構造的特徴

本研究では、参照物体の陰影のみではなく、参照物体が自身自身に落とす影(セルフシャドウ)の情報を利用して、光環境を構成する光源のパラメタ推定を行う。この目的を達成するための参照物体には、以下の2つの相反する性質が要求される。すなわち、

- 単純性: 参照物体上の多くの点を計測するためには、より広い面が観測できることが重要である。また、計算コストにおいても、単純な形状が有利である。

- 複雑性: 多様な光環境下でセルフシャドウが起こるためには、ある程度複雑な形状が必要である。

の、2点である。

以上の要求を満たすため、我々はスケルトンキューブと呼ぶ、中空の立方体を光環境推定の参照物体として提案する(図1)。スケルトンキューブは、どのような方向から照射する光源によっても内壁にセルフシャドウを生ずることができ、また、その表面が観測し易いという特徴がある。ある特別な視点と光源位置の組合せ(注1)によっては、セルフシャドウを観測することが困難な場合もあるが、そのようなときには、視点を変えるかスケルトンキューブの位置や方向を変えることで、光環境推定に必要な情報を得ることができる。つまり、複数視点からスケルトンキューブを撮影すれば、理論上では撮影シーンの完全な光環境を推定することが可能である。

さらに、スケルトンキューブは、特徴点对応を用いて行うカメラの幾何的な校正用の参照物体としても利用できる。その方法については、いくつか例が挙げられる[21],[22]が、本論文ではこの幾何的な校正については割愛する。

2.2 光学的特徴

スケルトンキューブ表面の反射特性は、Torrance-Sparrowモデル[12]を簡略化したモデル[13]で記述できると仮定する。Torrance-Sparrowモデルは、拡散反射と鏡面反射の両方を表現しており、特に、鏡面反射については反射面の物理的な意味に基づいて表現されているため、経験から導き出されたPhongモデル[7]よりも、現実の物体の反射をより正確に表現することができる。また、本研究では、スケルトンキューブ自身の相互

(注1): 特に、スケルトンキューブ内部に光源がある場合は内壁にセルフシャドウが生じないが、この場合は、単にスケルトンキューブの位置を変えれば良い。

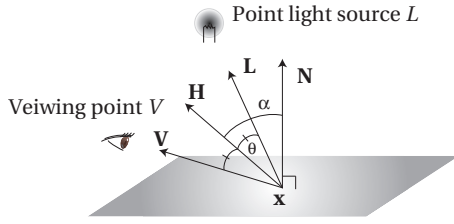


図2 視点・光源位置と反射輝度の関係． V は視点への単位ベクトル， L は光源への単位ベクトルを示す．また， N は点 x における法線， H は V と L の中間ベクトルを示す．

反射は無視できるものとし，一次反射のみを扱って光環境推定を行う．

視点 V と近接点光源 L が与えられたとき，物体表面の点 x における反射は図2のように表され，視点 V において観測される点 x の輝度は以下のように書ける．

$$I(x) = \frac{1}{D_{V,x}^2} \frac{1}{D_{L,x}^2} (k_d R_d + k_s R_s) I_L \quad (1)$$

ここで， I_L は近接点光源 L の放射強度， $D_{V,x}$ と $D_{L,x}$ はそれぞれ， V と x ， L と x の距離を示す．また， R_d と R_s はそれぞれ双方向反射分布関数(BRDF)の拡散反射成分と鏡面反射成分を示しており， k_d と k_s はそれぞれの係数である．さらに， R_d と R_s は以下の式で表される．

$$R_d = \mathbf{N} \cdot \mathbf{L} \quad (2)$$

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

ここで， σ は物体表面の荒さを表す数である．

3. 光環境推定

本節では，光環境の定義を述べ，光環境推定の実験環境および，その定式化について述べる．

3.1 光環境

本研究では，シーン内に存在する光源全体を光環境と呼び，それぞれの光源を近接点光源と仮定して光環境を表現する．例えば，近接点光源を任意の大きさの3次元格子状に配置することで，さまざまな光環境を表現することが可能である(図3)．つまり，本研究で行う光環境推定とは，これらの近接点光源の放射強度を推定することである．

また，この近接点光源を適切に配置することで，線光源や面光源を近似的に表現することもできる．さらに，微小な放射強度をもった光源を空間中に分布させることで，擬似的な環境光を表現することも可能となる．

3.2 実験環境

図4にスケルトンキューブの構造を示す．本研究では，下記的前提の下，スケルトンキューブの内壁の輝度をサンプリングすることで光環境推定を行う．

- 座標系: シーン座標系の原点とスケルトンキューブの中心を一致させ，シーン座標系の各座標軸とスケルトンキューブの各面をそれぞれ平行になるようにする．また，光環境や撮影に用いるカメラも，このシーン座標系に配置する．

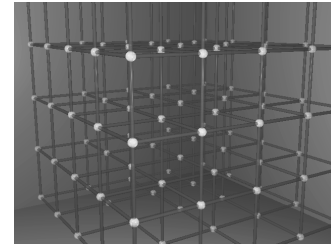


図3 光環境の例 - 3次元格子状に分布した近接点光源

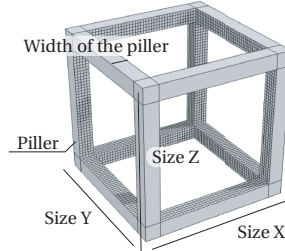


図4 スケルトンキューブの構造．内側の面の格子がサンプル点を表している．

- 光環境: 近接点光源の分布は前節によるモデルを用いる．
- スケルトンキューブ: 大きさと表面の反射特性は予め計測しておく．
- カメラ: シーンを撮影するカメラはスケルトンキューブを用いて校正されるため，撮影画像とシーン内の対応する点の関係は既知である．

3.3 定式化

光環境内に配置したスケルトンキューブ内壁の任意の点 x で，観測される輝度値は以下のように与えられる．

$$I(x) = \frac{1}{D_{V,x}^2} \left[\sum_{i=1}^N \frac{\mathcal{M}(x, L_i)}{D_{L_i,x}^2} (k_d R_d + k_s R_s) I_{L_i} \right] \quad (4)$$

ここで， N は近接点光源の数， $\mathcal{M}(x, L_i)$ はセルフシャドウの有無を表すマスク関数を示す．すなわち，光源 L_i が点 x を照射するとき $\mathcal{M}(x, L_i) = 1$ となり，それ以外は $\mathcal{M}(x, L_i) = 0$ となる．

スケルトンキューブ内壁の輝度値を M 点サンプリングすると，ベクトル $\mathbf{I} = [I(x_1), I(x_2), \dots, I(x_M)]^T$ が得られ， $\mathbf{S} = [I_{L_1}, I_{L_2}, \dots, I_{L_N}]^T$ を光環境を構成する点光源群の放射強度とし， $M \times N$ 行列 $\mathbf{K} = (K_{mn})$ の要素を，

$$K_{mn} = \frac{1}{D_{V,x_m}^2} \frac{\mathcal{M}(x_m, L_n)}{D_{L_n,x_m}^2} (k_d R_d + k_s R_s) \quad (5)$$

と定義すると， $\mathbf{I}, \mathbf{K}, \mathbf{S}$ の関係は

$$\mathbf{I} = \mathbf{K} \mathbf{S} \quad (6)$$

と書ける．ここで，充分な数の輝度値がサンプリングされれば(すなわち， $M \gg N$)，式(6)を \mathbf{S} について解くことができる．つまり，

$$\mathbf{S} = \mathbf{K}^+ \mathbf{I} \quad (7)$$

により， \mathbf{S} が求まる．ここで， \mathbf{K}^+ は行列 \mathbf{K} の擬似逆行列である．

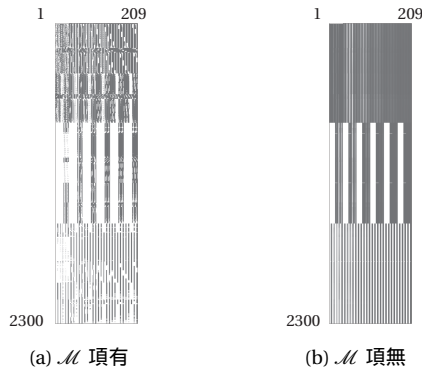


図5 行列 K . 行と列はそれぞれは、サンプル点と光源を示している．濃淡は行列の値を示しており、白は値が 0 であることを示している．

4. 評価実験

本節では、まず、スケルトンキューブの参照物体としての評価を行い、そして、CG シミュレーションにより本手法の有効性を示す．

4.1 スケルトンキューブの評価

スケルトンキューブの参照物体としての評価を行う．4.1.1 節では、式 (6) を構成する行列 K を解析することで、セルフシャドウを用いた光環境推定の有効性を示す．また、4.1.2 節では、光源位置に依存したスケルトンキューブ上のセルフシャドウの出現度について検証する．

4.1.1 セルフシャドウを用いた光環境推定の有効性

参照物体の反射特性を完全拡散反射であると仮定し、その陰影のみを用いた光環境推定問題は、数値解析的に不良設定問題であることが知られている [9], [1]．しかしながら、我々の方法は、参照物体の反射特性を鏡面反射を含めて仮定しており、さらに、非線形な要素であるセルフシャドウの項を含めているため、この光環境推定問題がより適切に解けることが期待される．そこで、セルフシャドウを用いた光環境推定の妥当性を、式 (5) における行列 K の M 項の有無による影響を調べることで、検証する．図 5a および 5b に、以下の条件の下で生成した行列 K を示す．

- 光環境: 3 次元格子状に配置された近接点光源の集合．(-150, -100, 0) から (150, 100, 250) の範囲に 50 間隔で配置してある．近接点光源の数は 209 である．
- カメラ位置: (50, 50, 50)
- スケルトンキューブ:
 - サイズ: 辺長 10, 梁の幅 1．
 - 反射係数: $k_d = 0.8, k_s = 0.4, \sigma = 5.5$
 - サンプリング点の数: 2300

ここで、行列の行と列は、それぞれサンプリング点と光源を示しており、また、行はスケルトンキューブの法線方向に基づいて並べられている．画像の濃淡は、行列の値を示しており、白は値が 0 であることを示している．

さらに、 M 項有無の場合の行列 K のランクを、特異値の寄与率によって比較する．式 (7) を安定に解くには、ある程度の

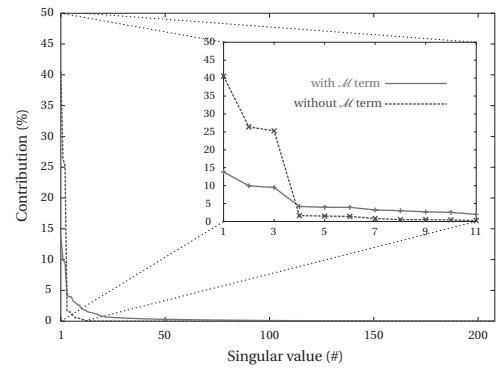


図6 行列 K の各特異値の寄与率．横軸は特異値を示し、縦軸はその特異値の寄与率を示している．また、一部を拡大した図を右上に示す．

ランクが要求されるが、図 6 によると、 M 項が無い場合は、寄与率が第 3 特異値以降で急激に落ちていくことから、ランクがほぼ 3 になっていることがわかる．これは、1 視点から観測可能な面の法線が高々 3 であることに起因しており、また、図 5b から、行列の値がほぼ 3 つの部分に分けられていることがわかる．すなわち、これらの部分ごとに見ると、各行の値は鏡面反射成分あるいは視点や光源からの距離に依存する箇所には違いがあっても、それらの影響があまり大きくないためほぼ同様となってしまう、結果としてランクの欠落が起きていると言える．

一方、 M がある場合、つまり、セルフシャドウの効果がある場合の方が、図 5a が示すように行列 K の各行は多様性を持つことがわかる．つまり、行列 K がより高いランクを持つため、式 (7) の解が安定に得られやすくなることが示されている．

以上の結果は、光源の放射強度をより安定に求める上で、セルフシャドウを用いる方法が有利であることを示している．

4.1.2 光源位置に依存したセルフシャドウの出現度

本節では、近接点光源の位置と、その光源によって生じるセルフシャドウの出現度について述べる．ここでは、光環境を構成する近接点光源の位置からスケルトンキューブを見たとき、スケルトンキューブ自身に隠蔽されるサンプル点の数を、その光源位置でのセルフシャドウの出現度と定義する．つまり、セルフシャドウの出現度が少なければ、式 (5) においてほとんどの M 項は 1 となるため、結果的に光環境推定が不安定となる．したがって、いかなる位置にある近接点光源によってもセルフシャドウが出現することが、安定に光源推定を行うために不可欠である．以上より、セルフシャドウの出現度を調べることで、スケルトンキューブの参照物体としての有効性を評価することになる．

図 7 に、セルフシャドウの出現度を画像として表した結果を示す．ここで光環境は、(-150, -150, 0) から (150, 150, 300) の範囲で 10 間隔の 3 次元格子状に配置した近接点光源の集合を用いた．図中の各平面は、例示するために選んだ高さ 0, 150, 300 の位置にある平面であり、その平面上に近接点光源が配置されている．濃淡はその位置におけるセルフシャドウの出現度を示しており、黒に近づくにつれて値が大きくなっている．サンプル点の合計は 5300 であり、出現度の一番小さい点は図中

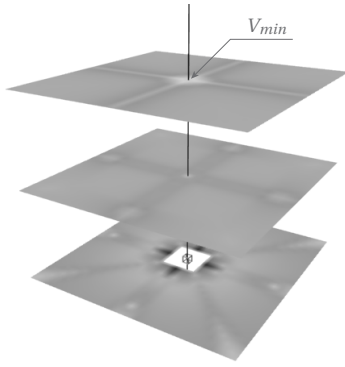


図7 セルフシャドウの出現度．各平面は高さ 0, 150, 300 の位置にある平面であり，その平面上に近接点光源が配置されている．濃淡はその位置におけるセルフシャドウの出現度を示しており，黒に近づくにつれて値が大きくなっている．また， V_{min} は出現度が最小の点を示している．

表1 光環境の設定

| | 実験 1 | 実験 2 | 実験 3 |
|------|---------|------|------|
| 光環境 | 3 次元格子状 | 半球状 | 面状 |
| 配置間隔 | 50.0 | 69.2 | 5.0 |
| 光源数 | 209 | 341 | 100 |

の V_{min} であり数は 704 であった．また，最大値は 3540 であった．以上の結果より，スケルトンキューブは，空間中のあらゆる位置にある光源からセルフシャドウを生じることができるため，光環境推定のための参照物体として適しているといえる．

4.2 光環境推定

4.2.1 シミュレーションによる光環境推定

本節では，表1および図8に示す3つのタイプの光環境の推定結果を示す．実験1では，任意の光環境を表現可能な，3次元格子状に分布した近接点光源の集合による光環境の推定を行う．実験2では，オープンスペースの光環境を表現する際によく用いられる，半球状に分布した近接点光源の集合による光環境の推定を行う．最後に，実験3では，複数の蛍光灯による光源を表現する，面状に分布した近接点光源の集合による光環境の推定を行う．

各近接点光源の放射強度は 0 から 10000 の範囲でランダムに与えた（これを真値とする）．撮影カメラ位置は (-50.0, 50.0, 50.0) とし，スケルトンキューブのサイズや反射特性は前節で用いた値を用いる．また，サンプル点 5300 のうち撮影カメラから可視である点は 2300 である．この条件の下，観測されるスケルトンキューブ内壁のサンプル点の輝度を計算し，これを基に各近接点光源の放射強度値を推定し，真値との比較を行う．

表2に，近接点光源の放射強度の，真値と推定値との差の二乗平均平方根を示す．なお，実験では，撮影画像の輝度値の量子化レベルを考慮するため，8-bit, 12-bit, 16-bit, 32-bit, 64-bit のそれぞれの量子化レベルについて誤差を計算した．

表2を見ると，3次元格子状光環境の推定と比べて，半球状光環境や面状光環境の推定は精度良く行えていることがわかる．例えば，3次元格子状光環境の 16-bit の量子化レベルにおける誤差の値はほぼ 2%となっているが，これら2つの光環境の誤

表2 各量子化レベルにおける推定放射強度の誤差の二乗平均平方根 (最大輝度: 10000)

| | 実験 1 (3 次元格子状) | 実験 2 (半球状) | 実験 3 (面状) |
|--------|-------------------|---------------|--------------|
| 8-bit | 3.5975E+5 | 5.4348E+2 | 4.2992E+2 |
| 12-bit | 2.1827E+4 | 2.4132E+1 | 2.6916E+1 |
| 16-bit | 2.0606E+2 | 2.2890E+0 | 1.5805E+0 |
| 32-bit | 5.5777E-2 | 3.2268E-5 | 2.5823E-5 |
| 64-bit | 6.5423E-7 | 6.5637E-10 | 2.9177E-10 |

差はその 100 分の 1 程度である（真値の最大値との比較）．その理由は，この2つの光環境は3次元格子状光環境と異なり，各近接点光源間での距離による差異が小さいため式(6)における鏡面反射の項の影響が大きく現れ，行列 K の大幅なランク落ちが避けられた結果，より安定した推定計算が行われているためだと考えられる．また，量子化レベルが小さい場合には，各光環境とも推定の誤差が比較的大きく現れているが，これは，行列 K が高いダイナミックレンジを求めためである^(注2)．以上のように，低い量子化レベルにおいては誤差が生じているが，高いダイナミックレンジを持つ画像が得られれば，複雑な光環境においても正確な推定ができることを示唆している．

4.2.2 セルフシャドウとキャストシャドウに関する考察

本論文は，キャストシャドウ法と共通の枠組みを持つ方法を提案している．キャストシャドウ法は，既知の形状の物体が，他の物体に落とす影の部分の画像を解析することで，簡易に実世界の光環境を推定することができる方法である．しかしながら，この方法では，キャストシャドウが観測される面の上方に存在する光環境が対象とされ，また，近接光源は考慮されていない．こうした課題を解決するために，単純に影が落とされる物体を増やして全空間の光環境を対象とすると，それらの適切な配置という難しい問題が生じる．また，キャストシャドウを観察する面の上方に3次的に分布した光環境のみを扱う場合においても，キャストシャドウの多様性を確保するために，より広範囲のサンプリングが必要となってしまう^(注3)．

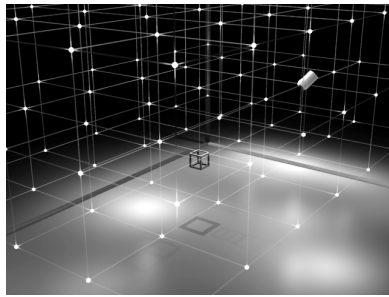
したがって，3次元格子状の光環境とキャストシャドウ法を単純に組み合わせただけでは，任意の光環境を推定することは困難であることがわかる．

一方，本論文の提案するセルフシャドウ法では，全方向の光環境に対応できる参照物体であるスケルトンキューブを用いることで，任意の近接点光源による光環境の推定ができる可能性を示した．

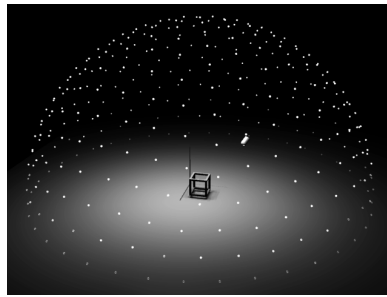
最後に，セルフシャドウ法とキャストシャドウ法の光環境推定の安定性を検証するため，床に置いたスケルトンキューブを用いた光環境推定（セルフシャドウ法）と，スケルトンキューブの代わりに全く同じ大きさの立方体を用いた光環境推定（キャストシャドウ法）を行い，推定誤差の二乗平均の平方根を求めた（表3）．なお，サンプリング数は両方法とも同じとなるよう

(注2): 本研究で用いる光環境は，距離の二乗で減衰する近接点光源で構成されているため，高いダイナミックレンジが必要とされる．

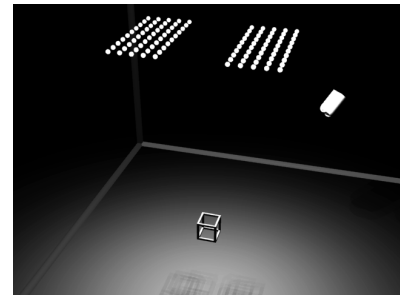
(注3): 一般に，近接光源は無限遠光源よりも広範囲に影を生じさせる．



(a) 3次元格子状光環境



(b) 半球状光環境



(c) 面状光環境

図8 推定する光環境．図 (b) 中のスケルトンキューブは例示のため拡大して表示している．

表3 セルフシャドウ法及びキャストシャドウ法による光環境推定結果 (誤差の二乗平均の平方根) ここで, キャスト1, キャスト2は, それぞれ, キャストシャドウが生じる全ての範囲をサンプリングした場合と一部のみをサンプリングした場合のキャストシャドウ法の結果を表している. 16-bit, 64-bit は輝度値の量子化レベルである.

| | セルフ | キャスト1 | キャスト2 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 16-bit | 2.2952E+3 | 3.7063E+4 | 4.3799E+8 |
| 64-bit | 1.4870E-2 | 2.8343E-1 | 4.2342E+3 |

にした. 表3が示すように, セルフシャドウ法によって光環境推定の安定性が向上しているのがわかる.

5. まとめ

本論文では, スケルトンキューブという新たな参照物体を提案し, 近接点光源の集合による光環境表現及びその推定方法をシミュレーションにより示した. スケルトンキューブは, 全方位の光環境推定に適した参照物体であり, また, コンパクトな形状であるといった優れた特徴を持っている.

今後の課題としては, 実環境での光環境推定実験が不可欠である. また, スケルトンキューブの最適性(その大きさと梁の比率など)の検証や光環境の適切な設計法などが挙げられる.

謝 辞

本研究は, 科学研究費補助金 特定領域研 13224051 及び若手研究 (A)16680010 の補助を受けて行った.

文 献

- [1] R. Basri and D. W. Jacobs. Lambertian Reflectance and Linear Subspaces. *IEEE Trans. PAMI*, Vol.25, No. 2, pp. 218–233, 2003.
- [2] P. Debevec. Rendering Synthetic Objects into Real Scenes: Bridging Traditional and Image-based Graphics with Global Illumination and High Dynamic Range Photography. *Proc. ACM SIGGRAPH*, pp. 198–198, 1998.
- [3] K. Hara, K. Nishino, and K. Ikeuchi. Determining Reflectance and Light Position from a Single Image Without Distant Illumination Assumption. *In Proc. ICCV2003*, pp.560-567, 2003.
- [4] S. R. Marschner and D. P. Greenberg. Inverse Lighting for Photography. *In Fifth Color Imaging Conference*, pp. 262–265, 1997.
- [5] P. Nillius and J.-O. Eklundh. Automatic Estimation of the Projected Light Source Direction. *In Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. I-1076–1083, 2001.
- [6] A. P. Pentland. Finding the Illumination Direction. *Journal of Optical Society of America*, Vol. 72, No. 4, pp. 448–455, 1982.
- [7] B. Phong. Illumination for Computer Generated Pictures. *Communi-*

nications of the ACM, vol. 18, pp.311–317, 1975.

- [8] M. W. Powell, S. Sarkar, and D. Goldgof. A Simple Strategy for Calibrating the Geometry of Light Sources. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.23, pp. 1022–1027, 2001.
- [9] R. Ramamoorthi and P. Hanrahan. A Signal-Processing Framework for Inverse Rendering. *Proc. ACM SIGGRAPH*, pp. 117–128, 2001.
- [10] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi. Illumination Distribution from Brightness in Shadows: Adaptive Estimation of Illumination Distribution with Unknown Reflectance Properties in Shadow Regions. *In Proc. ICCV*, pp. 875–882, 1999.
- [11] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi. Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene. *IEEE Trans. VCG*, vol. 5, no. 1, pp. 1–12, 1999.
- [12] K. E. Torrance and E. M. Sparrow. Theory for Off-Specular Reflection From Roughness Surface. *Journal of the Optical Society of America*, vol. 57, pp. 1105–1114, 1967.
- [13] K. Ikeuchi and K. Sato. Determining Reflectance Properties of an Object Using Range and Brightness Images. *IEEE Trans. PAMI*, Vol. 13, No. 11, pp. 1139–1153, 1991.
- [14] Y. Wang and D. Samaras. Estimation of Multiple Illuminants from a Single Image of Arbitrary Known Geometry. *In Proc. ECCV2002*, pp. 272–288, 2002.
- [15] Y. Yang and A. Yuille. Sources from Shading. *In Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 99*, pp. 534–539, 1991.
- [16] Y. Zhang and Y. Yang. Multiple Illuminant Direction Detection with Application to Image Synthesis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.23, pp. 915–920, 2001.
- [17] Q. Zheng, R. Chellappa: Estimation of Illuminant Direction, Albedo, and Shape from Shading. *IEEE Trans. PAMI*, vol. 13, no. 7, pp. 680–702, 1991.
- [18] W. Zhou and C. Kambhamettu. Estimation of Illuminant Direction and Intensity of Multiple Light Sources. *Proc. ECCV2002*, pp. 206–220, 2002.
- [19] B.K.P. Horn: Image intensity understanding. *Artificial Intelligence*, Vol.8, pp. 201–231, 1977.
- [20] D. R. Hougen and N. Ahuja: Estimation of the light source distribution and its use in integrated shape recovery from stereo and shading. *4th ICCV*, pp. 148–155, 1993.
- [21] R. Y. Tsai: A versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 4, pp. 323–344, 1987.
- [22] Z. Zhang: A Flexible New Technique for Camera Calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11):pp. 1330–1334, 2000.