

特別研究報告書

物体の反射係数獲得のための 形状に応じた照明コントロール法

指導教員 美濃 導彦 教授

京都大学工学部情報学科

武内 重樹

平成 17 年 2 月 10 日

物体の反射係数獲得のための 形状に応じた照明コントロール法

武内 重樹

内容梗概

オンラインショッピングを中心に代表される電子商取引において、商品の電子的な展示を行うことを目的として、物体を任意視点から見た画像を生成する技術が要求されている。このような背景の下、任意視点画像を生成するために必要となる物体の3次元形状や物体表面の反射係数を計測する試みがなされている。実物体の3次元形状を獲得することに関しては、レーザレンジファインダを用いた手法やステレオ視、視体積交差法が一般に使われており、計測精度を向上させるための様々な研究がなされている。

一方、反射係数の獲得に関しては、光源の種類・位置・光量によって規定される照明環境と物体の3次元形状を与えれば、複数視点から撮影された複数枚の画像の組から物体表面の反射係数の推定が行えることが示されている。

ここで、反射係数を推定する際に重要となるのが照明環境の設定である。反射係数の推定には、反射光をカメラで撮影した画像を利用する。その際、画像が反射光を正確に反映できていなければ、そのような画像を利用して推定した反射係数にも誤差が生じることになる。画像が反射光を正確に反映できるかどうかは照明環境によって左右される。つまり、画像が反射光を正確に反映できるように照明環境を設定すれば、反射係数が正確に得られる。本研究の目的はなるべく画像が反射光を正確に反映できるような照明環境を決定することである。

物体表面に照射される入射光の光量に偏りが生じると、その偏りは反射光に影響を与え、反射光にも偏りを生じさせる。この反射光の偏りが画像の量子化誤差を増加させることになる。よって、物体表面に照射される入射光の光量に偏りが少なくなるように照明環境を決定すれば、本研究の目的は達成される。

入射光の光量は、光源の位置、光量と、物体表面の位置、法線方向から計算される。つまり、物体形状に応じて最適な照明環境が異なる。従来は、対象物体の形状に関わらず、明確な基準を設けることなく、経験的に光源を均等に配置することで、反射係数の推定を行っていた。それに対し、本研究では物体形状に応じて最適な照明環境を決定する。

提案手法では、様々な形状に応じて適切な照明環境を実現できるように、あ

らかじめ点光源を大量に配置しておき，その ON/OFF を調節することで様々な照明環境を構築できるようにする．

まず，視体積交差法を用いて，視体積を求め，これを一定の大きさの立方格子 (ボクセル) の集合で表現する．この視体積を対象物体の 3 次元形状とみなす．次に，視体積を構成するボクセルのうち，表面に位置するボクセルを表面ボクセルとして抽出し，各表面ボクセルごとに法線ベクトルを求める．これにより，光源の種類，位置，強さから，各表面ボクセルに照射される光量を計算することができる．各表面ボクセルに照射される光量の分散を最小とする照明環境が求められるべき照明環境である．

ここで生じる問題として，配置した光源台数が多くなってくると，ON/OFF の組合せの数が膨大となってしまうことが挙げられる．そのため，全ての ON/OFF の組合せでのばらつきを計算して比較することは，実用的な計算時間の範囲では不可能となってしまう．そこで提案手法では，探索空間を小さくするために ON/OFF を自動的に決定することができる照明を予め抽出し，それを探索対象から除外する処理を行う．

提案手法の有効性を確かめるために，シミュレーション実験を行った．対象物体の形状を複数のカメラを用いて獲得した後，対象物体を中心に大量の光源を均等に配置した状態で実験を行った．均等配置した光源を全て ON にした状態では物体表面毎に入射光の光量にばらつきが生じたが，提案手法を用いて決定された照明環境下では，入射光の光量のばらつきが小さくなることが確認され，本手法の有効性が示された．

Object-adaptive Lighting Control

Shigeki TAKEUCHI

Abstract

Technology of generating objects' image from an arbitrary viewpoint plays an important role in applications like displaying products in e-commerce. Such image can be generated when the object's 3D (three-dimensional) shape and its reflection property are acquired. As for 3D shape acquisition, laser range finders, the multi-baseline stereo method and the volume intersection technique are widely used.

As for reflection property acquisition, we can estimate the reflection property as lighting environment, the 3D shape of the object and the images from multiple viewpoints are given. Lighting environment consists of source of lights, their position and their power.

It is important to set up the lighting environment for the reflection property estimation. Camera images that observe reflected light are used for estimating the reflection property. If they have quantization error and don't exactly represent the reflected light, estimated reflection property contains error. Adequate lighting environment for reflection property estimation reduces the error. Our goal is to search adequate lighting environment.

Variation in the power of incident light on the surface can result in variations in reflected light. The variation in reflected light increases quantization error of the images. Therefore, when we find the lighting environment which minimizes the variation in the power of incident light, our goal is achieved.

Power of incident light is calculated from the position and the power of the light and the position, normal vector of the surface. That means, the best lighting environment is decided according to the object's shape. In previous work, lights are arranged evenly on a sphere. On the other hand, we choose the most suitable lighting environment for the object shape.

Many point lights are arranged beforehand in order to achieve various appropriate lighting environments. We can change lighting environment by controlling the lights' ON/OFF switches.

Summary of our method is as follows. First, the visual hull is constructed

by the volume intersection technique. It is expressed by sets of cubic lattices of a constant size (voxel). We consider the visual hull the shape of the object. Second, a voxel located on the surface of the visual hull is extracted as a surface voxel, and a normal vector of each surface voxel is calculated. Third, power of incident lights to each surface voxel is calculated from source of lights, their position and their power. Finally, we construct the lighting environment so that the variance of quantities of incident light to each surface voxel is minimized.

When the arranged number of the source lights increases, the number of combinations of ON/OFF becomes enormous. Therefore, calculating and comparing the decentralization by the combination of all ON/OFF is impossible in the range of practical calculation time. Then, to reduce the search space, we find the lights which ON/OFF setting can be automatically decided and exclude them from the search space.

We conducted simulation experiment and confirmed effectiveness of our approach. The shape of the object's body was acquired with cameras. Many point lights were evenly arranged. The variance of quantities of light environment decided by using our approach was smaller than the variance state to turn on all lights evenly arranged.

物体の反射係数獲得のための 形状に応じた照明コントロール法

目次

第1章	緒論	1
第2章	反射係数獲得における照明の影響	2
2.1	反射係数の獲得	2
2.2	反射モデル	3
2.3	カメラによる反射光の観測	5
第3章	物体形状計測	6
3.1	視体積交差法	6
3.2	表面ボクセルでの法線推定 [8]	7
第4章	照明コントロール	8
4.1	照明環境	8
4.2	照明環境に応じた光量の算出	9
4.3	物体形状に応じた照明環境	9
4.4	最適化	10
第5章	実験及び考察	11
5.1	実験環境	11
5.2	実験結果	13
5.2.1	光源台数の制限と無光ボクセル数の関係	13
5.2.2	ON/OFF の設定が可能な光源台数	13
5.2.3	入射光の光量のばらつき	14
5.2.4	入射光の光量の視覚化	18
5.3	考察	18
第6章	結論	22
	謝辞	23
	参考文献	23

第1章 緒論

インターネットの普及により、オンラインショッピングを中心とした電子商取引が盛んに行われている。このようなインターネットを介した商取引は、利用者が遠隔地にいる場合でも利用できるという利点があるが、商品を直接見ることができないという欠点がある。この欠点に対処するため、商品の3次元形状や色を決定する表面の反射係数を計測し、任意視点から見た画像を生成できるようなモデルを構築することで、商品を直接見ているかのような映像を利用者に提供する試みがなされている。このような背景の下、物体の3次元形状や表面の反射係数を獲得する研究がなされている。

実物体の3次元形状を獲得する手法として、レーザレンジファインダを用いた手法 [1] やステレオ視 [2]、視体積交差法 [3][4] が一般に使われる。また、反射係数の獲得に関しては、従来研究 [5] により、光源の種類、位置、強さによって規定される照明環境と物体の3次元形状を与えれば、複数視点から撮影された複数枚の画像の組から物体表面の反射係数の推定が行えることが示されている。

反射係数を推定する際に重要となるのが照明環境の設定である。反射係数の推定は、カメラで撮影された画像の画素値を用いて行われる。画素値で表現可能な階調は一定ビット数であるため、物体表面において、色の明るい部分と暗い部分が混在するような場合、1つの画素値で表現される色の範囲が広がるため、量子化誤差が大きくなってしまう。このような問題が起こらないように照明環境を設定する必要がある。

本研究では、反射係数を正しく求めることができるように、照明からの光量が物体の表面に対してなるべく偏って照射されないような照明環境を設定することを目的とする。光を物体の表面に対して偏らずに照射するためには、物体の形状が既知である必要があるが、従来は、対象物体の形状に関わらず、明確な基準を設けることなく、経験的に光源を均等に配置することで、反射係数の推定を行っていた。しかし、均等に配置した場合には、一般的に物体の表面に対して偏って照射される部分が存在することになる。このような偏りを小さくするための、物体形状に応じた照明環境を求める手法を提案する。

提案手法では、様々な観測物体の形状に応じて適切な照明環境を実現できるように、あらかじめ点光源を大量に配置した上で、対象物体の3次元形状形状を獲得する。物体表面を細かく分割して、その部分ごとに照射される光量を計

算し，照射された光量が反射係数を求めるために最適となるように照明をコントロールする．

また，配置した光源台数が多くなってくると，ON/OFFの組合せの数が膨大となってしまうため，全てのON/OFFの組合せでのばらつきを計算して比較することは，実用的な計算時間の範囲では不可能となってしまう．そこで，ON/OFFを自動的に決定することができる照明を予め抽出し，それを探索対象から除外することで探索空間を小さくした．

本稿の構成は以下の通りである．第2章では，適切な照明環境について考察し，それを求めるために必要な条件について述べる．第3章では，物体形状の計測を行い，光量を計算するのに必要な法線推定について述べる．第4章では，物体形状と照明環境から光量を計算し，照明の最適化を行う手法について述べる．第5章では，提案手法の有効性を確かめるために行った実験の結果とその考察を述べる．第6章で結論を述べる．

第2章 反射係数獲得における照明の影響

2.1 反射係数の獲得

物体の3次元形状と，物体に光を照射したときにどのような反射光が生じるかについてのモデル(反射モデル)を与えれば，任意照明環境下で物体を任意視点から見た画像を生成することができる．反射モデルが持つパラメータは反射係数と呼ばれ，照明環境に関係なく物体表面固有の値である．従来，既知照明環境下で物体をカメラで撮影し，得られた画像の画素値から物体表面で生じる反射光を推定し，その推定結果を元に反射係数を獲得する手法がとられている．その際，物体表面で生じる反射光を画像の画素値が忠実に表現できていなければ，正しく反射係数を獲得することができなくなってしまう．

本章では，まず反射モデルについて述べ，照明環境，反射光，物体形状を与えれば反射係数を獲得できることを示す．次に，カメラで物体を撮影する際に，画像の画素値が物体表面で生じる反射光を正確に表現できない状況について述べ，照明環境を適切にコントロールすることによってこのような状況による反射係数獲得への悪影響が改善できることを示す．

2.2 反射モデル

光の反射モデルとしては、Phong[6] や Torrance-Sparrow[7] の 2 色性反射モデルがよく知られている。2 色性反射モデルでは、反射光は拡散反射光と鏡面反射光の 2 つから構成される。拡散反射光はあらゆる方向に反射し、反射した地点から観測地点までの距離が等しい場合は、任意の方向から同じ強さで観測される。一方、鏡面反射光は強い指向性を持つため、限られた方向でしか観測されない。本稿では拡散反射光に着目して、自然界に存在する物体に対して良い近似を示すモデルの 1 つである Torrance-Sparrow 反射モデルをもとに、物体表面に入射する光量の定式化を行う。

有限個数 m の点光源 L_1, \dots, L_m からの入射光に対する反射光 I^{ref} は、光源 L_j が物体表面に対して与える光の強さを I_j^{in} を用いて、以下の式で表せる。

$$I^{\text{ref}} = \sum_{j=1}^m I_j^{\text{in}} k^{\text{diff}} \cos \theta(\mathbf{n}(s), \mathbf{l}_j) \quad (1)$$

ここで、 s はある物体表面の 3 次元座標で、 $\mathbf{n}(s)$ は s における法線方向、 \mathbf{l}_j は物体表面から光源 L_j の光源位置に向かうベクトル、 $\theta(\mathbf{n}(s), \mathbf{l}_j)$ は \mathbf{l}_j と \mathbf{n} のなす角を表す。拡散反射光 I^{ref} は光源 L_j が物体表面に対して与える光の強さ I_j^{in} と $\theta(\mathbf{n}(s), \mathbf{l}_j)$ の余弦との積の光源毎の和に比例することが分かる。なお、 k^{diff} は物体の各表面に固有の拡散反射係数であり、本研究では、この k^{diff} を反射係数とする。

$$\begin{aligned} k^{\text{diff}} &= \frac{I^{\text{ref}}}{\sum_{j=1}^m I_j^{\text{in}} \cos \theta(\mathbf{n}(s), \mathbf{l}_j)} \\ &= \frac{I^{\text{ref}}}{I} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、点光源 L_j が物体表面に対して与える光の強さ I_j^{in} について述べる。 L_j の 3 次元位置を \mathbf{p}_j 、光量を P_j とする。物体表面上のある位置 s に L_j から照射される光量は、 L_j が点光源であるため、 \mathbf{p}_j から s まで光が届くまでに距離の 2 乗に反比例して減衰する。よって、 I_j^{in} は、

$$I_j^{\text{in}} = \frac{1}{|\mathbf{p}_j - \mathbf{s}|^2} P_j \quad (3)$$

となる。

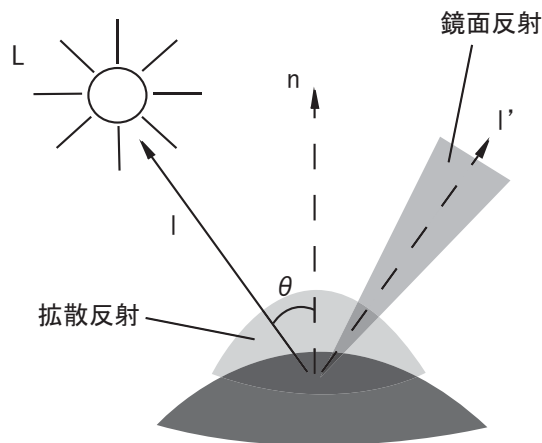


図 1: 光の反射

また, $\theta(\mathbf{n}(s), \mathbf{l}_j)$ は,

$$\cos \theta(\mathbf{n}(s), \mathbf{l}_j) = \frac{\mathbf{n}(s) \cdot (\mathbf{p}_j - s)}{|\mathbf{n}(s)| |\mathbf{p}_j - s|} \quad (4)$$

と表される.

光源 L_j が物体表面 s に照射する光量 I_j を

$$I_j = I_j^{\text{in}} \cos \theta(\mathbf{n}(s), \mathbf{l}_j) \quad (5)$$

として定義することで, 全ての光源から s に照射される光量の総和 I は, 式 1,3,4 より

$$\begin{aligned} I &= \sum_{j=1}^m I_j \\ &= \sum_{j=1}^m I_j^{\text{in}} \cos \theta(\mathbf{n}(s), \mathbf{l}_j) \\ &= \sum_{j=1}^m \frac{1}{|\mathbf{p}_j - s|^2} P_j \cos \theta(\mathbf{n}(s), \mathbf{l}_j) \\ &= \sum_{j=1}^m \frac{\mathbf{n}(s) \cdot (\mathbf{p}_j - s)}{|\mathbf{n}(s)| |\mathbf{p}_j - s|^3} P_j \end{aligned} \quad (6)$$

となる.

式 2,6 から, カメラで観測した I^{ref} と照明環境 \mathbf{p}_j, P_j , 物体形状 $s, \mathbf{n}(s)$ を与えれば k^{diff} を得ることができる.

2.3 カメラによる反射光の観測

本節では、カメラが観測する反射光 I^{ref} とそれを表現した画素値の関係について考える。

カメラで観測できる光量には限界がある。これはダイナミックレンジと呼ばれ、カメラで画素値として再現できる光量の最大値 S_{max} と最小値 S_{min} の比率を dB 単位で表したものである。 S_{max} を超える光量を観測する場合、光量の大小に関わらず、画素値は全て白になり、一方 S_{min} を下回る場合、画素値は黒となってしまう。このような場合、色の区別が付かなくなってしまうため、通常、ダイナミックレンジの幅が観測される反射光の最大値と最小値と合うようにダイナミックレンジを設定しておく。

しかし、カメラで獲得した反射光の光量が S_{max} と S_{min} の範囲の間であっても、 S_{max} と S_{min} の差が大きくなってしまふと、観測光を量子化する際、細かい色の違いを表現できなくなる。そのため、観測される反射光の最大値と最小値の差がなるべく小さくなるようにした方が反射光を観測する際の、量子化誤差を小さくすることができる。

入射光と反射光の関係は、式 1 から、拡散反射係数 k^{diff} に比例する。反射光の光量を量子化して、画素値に置き換える時に細かい光量の違いを反映させるためには、反射光の光量の最大値と最小値の幅を小さくする必要があるが、 k^{diff} に関しては未知であり、かつ、物体表面の各場所によって様々な値を持つ。反射光の光量は入射光に比例するため、本手法では、反射光の光量のばらつきを小さくするために、入射光のばらつきを小さくする。

また、反射光の光量が少ない場合にカメラが正確な反射光を観測できないことにも留意する必要がある。

原理的にはカメラはダイナミックレンジを調節することで、光量の多少に関わらず反射光を観測することができる。しかし、入射光の光量が小さい場合は、反射光の光量は、反射係数に関わらず小さくなる。そのため、ダイナミックレンジの範囲においても、 S_{min} 付近の反射光が多く存在する場合は、それぞれの反射光の光量に差がつかなくなってしまう。反射係数は反射光から推定するため、入射光が小さいと反射係数を正確に推定できなくなる。

このような問題に対処するために、カメラが反射光を観測する時に最低限必要な光量 I_{min} を定め、入射光の光量 I がこれを超えるようにする。

以上から，反射係数を獲得する際に，適切な入射光の光量となるためには，以下の入射光条件を満たす必要がある．

入射光条件

- 入射光の光量のばらつきを小さくすること
- 入射光の光量がカメラが反射光を観測する時に最低限必要な光量を超えること

第3章 物体形状計測

3.1 視体積交差法

2.2節において，適切な照明環境を求めるためには物体形状が必要であることを述べた．本研究では，物体形状を獲得する手法として，対象物体の表面特性に依存しないという利点から，視体積交差法を採用する．以下では視体積交差法の原理について説明する．

n 台のカメラ C_1, \dots, C_n を利用して，物体を観測する．物体は全てのカメラの撮影範囲内に収まるように配置してあるものとする．また，カメラはピンホールカメラモデルで表現可能な光学系を持つとし，カメラの位置，向きは既知であるものとする．

図2で示すように，カメラ C_i で対象物体 O を撮影すると，物体 O は画像上に投影され，その投影像は2次元画像平面上の領域として得られる．この領域を物体投影領域 R_i と呼ぶ．物体 O はカメラ C_i のレンズ中心を端点とし，物体投影領域 R_i 上の任意の点を通る半直線の集合からなる錐体上の開空間に内接して存在する．この開空間をカメラ C_i における視錐体 V_i と呼ぶ．

ここで，各カメラの画像から得られる視錐体 V_1, \dots, V_n について，式7で表される V を考える．

$$V = \bigcap_{i=1}^n V_i \quad (7)$$

このように構築された V を視体積と定義する．以下では，この視体積 V を対象物体の形状として考え，照明のコントロールに利用する．

視体積 V を一定の大きさの立方格子（ボクセル）の集合で表現する．

また，視体積 V 以外の領域を V' とすると，視体積 V を構成するボクセルのうちで， V' と隣接する6近傍のボクセルを表面ボクセルとして抽出する．この表面ボクセルが物体の表面を含んでいると見なし，それぞれの表面ボクセルに

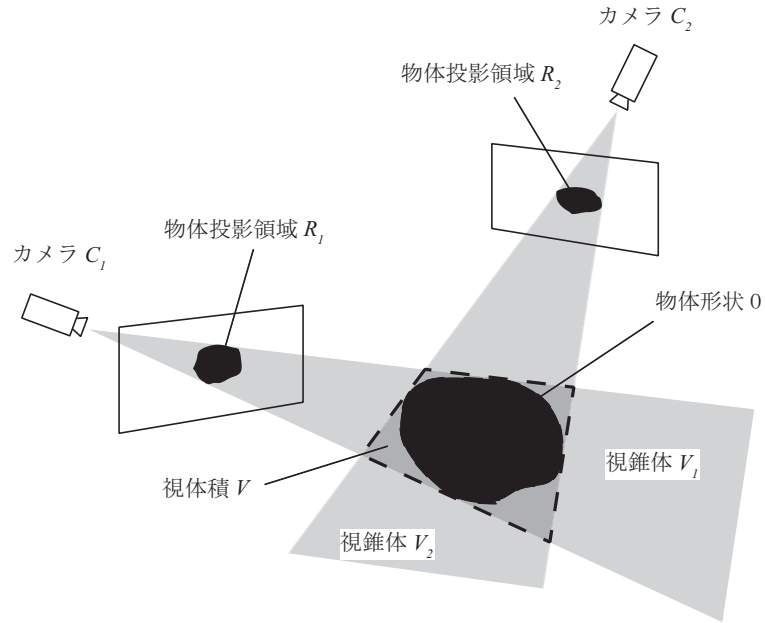


図 2: 視体積交差法

対し，照射される光量を計算する．

3.2 表面ボクセルでの法線推定 [8]

視体積交差法の原理より，視体積の表面ボクセルは，少なくとも 1 台以上のカメラに対して，そのカメラで得られた物体投影領域の境界上の画素に含まれる．このことを利用して，物体投影領域の境界上の画素の 2 次元法線を用いて表面ボクセルの法線を推定する．

3 次元位置が v である表面ボクセル v の法線ベクトル $n(v)$ について考える． v は，全てのカメラの物体投影領域内に投影される．その中で少なくとも 1 つ以上の物体投影領域において，表面ボクセル v は物体投影領域の境界線上に投影される．ここで，表面ボクセル v がカメラ C の物体投影領域 R の境界線上に投影されるとき， v の法線方向は，物体投影領域 R の境界線上の点における 2 次元法線として投影される．よって，まず v が投影される物体投影領域 R 上の画素における 2 次元法線 $n^{img}(v)$ を求める．次に，これに投影され，かつカメラのレンズ中心から v へ向かうベクトルに垂直なベクトルを求め，これを v の法線ベクトル $n(v)$ とする．

また，表面ボクセル v が複数のカメラで物体投影領域の境界上に投影される

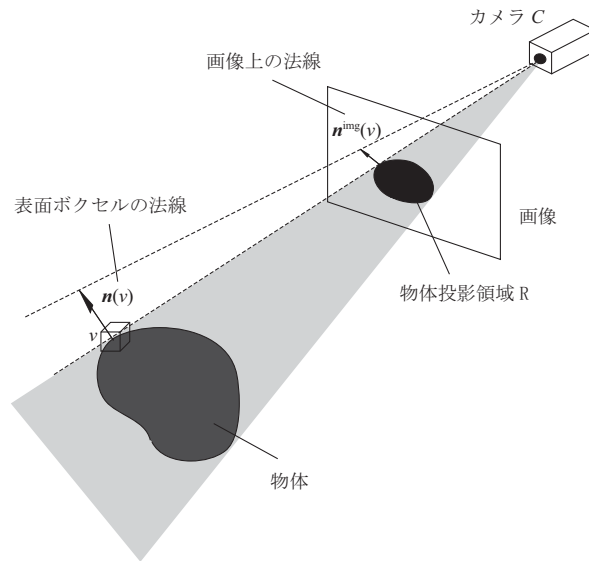


図 3: 表面ボクセルの法線

場合は，それぞれのカメラにおいて求められた法線ベクトルの平均を v の法線ベクトルとする．

第 4 章 照明コントロール

4.1 照明環境

各表面ボクセルの入射光が最低限必要な光量 I_{\min} を下回らず，かつ表面ボクセル毎に偏りがないようにするために照明をコントロールする手法を提案する．物体形状に応じて最適な照明環境が原理的には必ず存在するが，実際は配置できる光源の数や，配置可能な位置，照射可能な光量に対して，物理的制約があるため，物理的に実現可能な照明環境の中で最適なものを探索する必要がある．

本手法では配置可能な位置に多数の点光源を設置し，その ON/OFF を制御することで様々な照明環境を実現する．ただし，ありとあらゆる照明環境を実現することはできないため，物体形状によってはどのように照明をコントロールしても照射される光量が I_{\min} を下回る表面が発生したり，表面ボクセル毎の入射光にある程度の偏りが生じる場合がある．この問題については 4.2 節で述べる．

以降，光源数 m ，各光源の位置 p_j と光量 P_j は既知であるものとし，照明のコントロール方法について述べる．

4.2 照明環境に応じた光量の算出

視体積 V が, G 個の表面ボクセルを持つとする. それぞれの表面ボクセル v_g の中心を表面の 3 次元座標 v_g として見なし, 各ボクセル毎に法線ベクトル $n(v_g)$ を計算する. また m 個の点光源が配置されているとする. 以上を用いて, 光源から各ボクセル v_1, \dots, v_G に入射する光量 I_1, \dots, I_G を計算する.

ただし, 実際には光源からの光が届かないボクセルが存在する. 光源ごとにすべての表面ボクセルに対して照射される光量を計算するが, 実際には裏面に光源が存在する場合や, 光源と表面ボクセルの間に対象物体の他の部分が存在する場合は, 光源からの光が届かずにその光源からの入射光の光量は 0 となる. そのような光源からの光が届かないボクセルを判定するために Z バッファ法を利用する.

Z バッファ法は, 奥行きに関する情報である Z バッファを用意し, Z バッファを参照することにより奥行きの判定を行う手法である. 全ての光源ごとに, 表面ボクセルのうち, 光源から見て手前にあるものを Z バッファの値を参照して選択する. Z バッファを利用することで, 表面ボクセルが裏側や陰になっていることを判定でき, その部分の入射光の光量を 0 とすることができる.

4.3 物体形状に応じた照明環境

4.2 節で求めた入射光の総量 $I_g (g = 1, \dots, G)$ が 2.3 節で述べた入射光条件を満たすように, 照明のコントロールを行う

各光源の ON/OFF によって, I_g が 2.3 節で述べた条件を満たすようにするが, ここで問題となるのは, すべての光源を ON にしたとしてもオクルージョン等により, 照射される光量が I_{\min} 以下となる表面ボクセルが存在する場合である. これを無光ボクセルと呼ぶ. 本研究では, この無光ボクセルに対する入射光は考えないこととし, 表面ボクセルのうち無光ボクセルを除いた残りのボクセルに照射される入射光を評価対象とする. つまり, 無光ボクセルの数が G' 個であるとすると, 照明をコントロールする際には, 表面ボクセルの総数 G 個から無光ボクセルの数 G' 個を引いた, $\hat{G} = G - G'$ 個の表面ボクセル $v_{\hat{g}}$ についての入射光の総量 $I_{\hat{g}}$ を利用する. 無光ボクセルを抽出するため, 前処理として, 全ての光源を ON にした状態で, 光量が I_{\min} 以下となる表面ボクセルを見つけ出す.

以上をまとめると, 無光ボクセルを除く全ての表面ボクセル $v_{\hat{g}}$ に照射される

光量 $I_{\hat{g}}$ の最小値が I_{\min} 以上となり，かつ，ばらつきが最小になるよう各光源の ON/OFF の組合せを決定する．ばらつきの評価として， $I_{\hat{g}}$ の分散を用いる．このことを以下で定式化する．

無光ボクセルを除いた表面ボクセル $v_{\hat{g}}$ に照射される光量の総和を $I_{\hat{g}}$ ，無光ボクセルを除いた表面ボクセルの総数を \hat{G} とすると，平均 \bar{I} および分散 σ^2 は，

$$\bar{I} = \frac{1}{\hat{G}} \sum_{\hat{g}} I_{\hat{g}} \quad (8)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{\hat{G}} \sum_{\hat{g}} (I_{\hat{g}} - \bar{I})^2 \quad (9)$$

となる．よって，目的関数と制約条件は，

$$\text{目的関数: } \sigma^2 \longrightarrow \text{最小} \quad (10)$$

$$\text{制約条件: } I_{\min} < I_{\hat{g}} \quad (11)$$

となり，この制約条件つき最適化問題を解くことで最適解を求めることができる．

4.4 最適化

4.1 節で述べた照明環境下で，とりうる照明の設定の組合せは $O(2^m)$ のオーダーである．そのため，配置した光源数 m が多くなってくると，ON/OFF の組合せの数が膨大となってしまう，全ての状態ごとに分散を求めることは，実用的な計算時間の範囲では不可能となってしまう．よって，最適な照明環境を求めるためには，全ての状態の分散を求めるのではなく，何らかの手法を用いて，探索空間を小さくする必要がある．

4.3 節において，全ての光源から照射される光量が I_{\min} 以下となる無光ボクセルを定義し，照明のコントロールには利用しないようにした．適切な照明環境を求めるための前処理として，ここではさらに，全ての表面ボクセルのうち，照射される光源の数が 1 つしかない表面ボクセルを求め，その表面ボクセルに照射している光源を常に ON に設定することで，ON/OFF の設定をする光源の台数を減らし，探索空間を小さくする．

さらに以下に述べる方法により，探索空間を小さくする．まず，全ての光源を ON にした状態を初期状態として設定した上で，以下の処理を行う．

処理 1 現状態から，ON/OFF の設定をする光源のうち 1 つの ON/OFF を逆に設定し，変化させた状態における入射光の分散 σ^2 をそれぞれ計算し，その中で σ^2 が最小となる状態を次の状態として選択する．その際に，制約条件である $I_{\min} < I_{v_g}$ を満たさない I_{v_g} が存在するような場合は，次の状態として選択しないようにする．この操作を繰り返し，現状態よりも σ^2 が小さくなる状態が見つからなくなるまで繰り返す．

処理 2 現状態から，ON/OFF の設定をする光源のうち 2 つの ON/OFF を逆に設定することを同時に行い，変化させた状態における入射光の分散 σ^2 をそれぞれ計算し，その中で σ^2 が最小となる状態を次の状態として選択する．その際に，制約条件である $I_{\min} < I_{v_g}$ を満たさない I_{v_g} が存在するような場合は，次の状態として選択しないようにする．この操作を繰り返し，現状態よりも σ^2 が小さくなる状態が見つからなくなるまで繰り返す．

処理 1 と処理 2 のどちらを行っても現状態から変化しなくなるまで繰り返し行う．最終的に得られた照明環境を，求めるべき適切な照明環境とする．

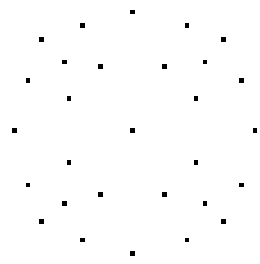
第 5 章 実験及び考察

5.1 実験環境

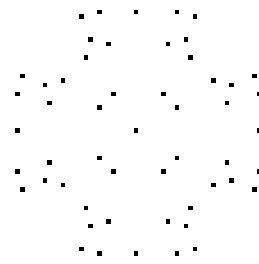
第 4 章で提案した物体形状に応じた照明コントロール法の有効性を確かめるために，シミュレーション実験を行った．複数の対象物体に対して実験を行い，従来の光源を均等に配置した場合と，照明コントロールを行った場合で物体表面に入射する光量にどのような違いが生じるかを比較した．

本シミュレーション実験では，ピンホールカメラモデルでモデル化したカメラ 20 台と多数の点光源を同一球面上に均等配置した照明環境を用意した．照明環境を構成する光源の数は 30 台，54 台，102 台，198 台と変更して実験を行った．均等配置した光源の位置を図 4 に示す．各光源の位置と光量，各カメラの位置と向きをあらかじめ与えた．光源の光量は全て等しく 1 とした．対象物体として，直方体 (Cube)，人体の全身形状 (Body)，人体の頭部と胴体を組み合わせた形状 (Torso) の 3 次元パッチモデル (図 5) を用意した．

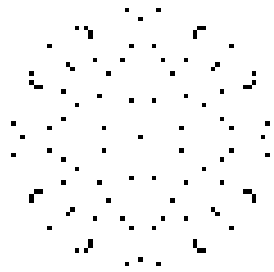
視体積の構築には 20 台のカメラを用いて行った．また， $I_{\min} = 0$ とした．



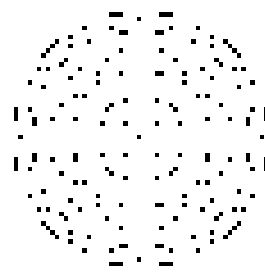
(a) 30 台



(b) 54 台



(c) 102 台



(d) 198 台

图 4: 光源配置



(a) Cube



(b) Body



(c) Torso

图 5: 对象物体

5.2 実験結果

5.2.1 光源台数の制限と無光ボクセル数の関係

照明コントロールにおいて、あらゆる場所に光源を配置することが可能であるとすれば、全ての表面ボクセルに対して入射光の光量を均等にする光源配置が存在する。しかし、実際には配置する光源台数に限界があるため、入射光の光量が均等にはならない。光源台数が有限であるために、無光ボクセルが生じる。

ここでは、光源台数と無光ボクセルの関係を調べることで、照明コントロールがどの程度の制約を受けて行われているかを調べた。

3つの対象物体 (Cube, Body, Torso) それぞれに対して、照明環境を構成する光源台数を 30 台、54 台、102 台、198 台と変化させた時の無光ボクセル数を調べた。対象物体の表面ボクセル数は Cube が 22338 個、Body が 26856 個、Torso が 11291 個であった。表 1 にそれぞれの光源台数において、発生した無光ボクセルの数と表面ボクセル全体の対する割合を示す。

表 1: 光源台数ごとの無光ボクセルの数

	30 台	54 台	102 台	198 台
Cube	1(0.00%)	0(0.00%)	0(0.00%)	0(0.00%)
Body	280(1.04%)	210(0.78%)	121(0.45%)	87(0.32%)
Torso	149(1.32%)	143(1.27%)	136(1.20%)	130(1.15%)

表 1 から分かるように、Body のような複雑な形状だと、少ない割合ながらも無光ボクセルが存在することが確認された。無光ボクセルが存在するということは、その部分の表面ボクセルに関しては、照明コントロールの対象から外れるため、入射光の光量の調整が行われない。

5.2.2 ON/OFF の設定が可能な光源台数

設置する照明台数を増やすことによって、より適切な照明コントロールを行うことができる。しかし、常に設置した照明の全ての ON/OFF を設定出来るわけではない。

その原因となるのが、常に ON の設定を行う必要のある光源の存在である。全ての光源を ON にした状態からその中の 1 つの光源を OFF にしたとき、表面ボクセルの中で入射光の光量が I_{\min} 以下になってしまうものが存在するならば、

その光源は常に ON にする必要がある。

このような光源の台数を調べることで、実際に照明コントロールが行われている光源台数を調べる。

3つの対象物体 (Cube, Body, Torso) それぞれに対して、照明環境を構成する光源台数を 30 台、54 台、102 台、198 台と変化させた時に、常に ON にする必要がある光源台数を調べ、全体の光源台数から差し引くことで、ON/OFF を設定が可能な光源台数を求めた。表 2 に ON/OFF を設定が可能な光源台数と全体の光源に対する割合を示す。

表 2: ON/OFF の設定が可能な光源台数

	30 台	54 台	102 台	198 台
Cube	25(83.33%)	54(98.15%)	102(100.00%)	198(100.00%)
Body	3(10.00%)	13(24.27%)	69(67.65%)	156(78.79%)
Torso	15(50.00%)	45(83.33%)	95(93.14%)	192(96.97%)

表 2 から分かるように、設置してある光源台数と比べて、実際に照明コントロールの際に ON/OFF を設定できる光源台数は減少する。特に Body のような複雑な形状では、設置した光源のうちの多くを常に ON にする必要があることが分かる。

5.2.3 入射光の光量のばらつき

提案手法の照明コントロールを行った場合と均等配置した全ての光源を ON にした場合を比べて、入射光の光量のばらつきにどの程度の変化があるのかを調べるために入射光の光量の分散とヒストグラムを求めた。

表 3,4,5 では、対象物体ごとに、異なる光源台数において、照明コントロールを行った場合と均等配置の場合での分散を示す。

表 3: 入射光の光量の分散 (Cube)

	30 台	54 台	102 台	198 台
提案手法 ($\times 10^{-11}$)	1.11	1.30	1.33	0.90
均等配置 ($\times 10^{-11}$)	6.62	32.11	87.68	275.37

表 4: 入射光の光量の分散 (Body)

	30 台	54 台	102 台	198 台
提案手法 ($\times 10^{-11}$)	15.25	40.93	45.95	92.51
均等配置 ($\times 10^{-11}$)	17.00	59.17	201.60	744.39

表 5: 入射光の光量の分散 (Torso)

	30 台	54 台	102 台	198 台
提案手法 ($\times 10^{-11}$)	2.03	3.24	3.39	3.38
均等配置 ($\times 10^{-11}$)	4.32	16.05	52.24	182.61

表 3,4,5 から分かるように、均等配置と比較すると、提案手法の方が分散が小さくなった。光源台数を増やすことによって、提案手法と均等配置の共に分散が増加する場合があった。これは表 1 から確認できるように、無光ボクセルが減少することによって、分散の計算対象となる表面ボクセルが増加するためである。

次に、光源台数を増加することによって、均等配置よりも提案手法の有効性が上昇することを調べた。表 3,4,5 で示した分散を用いて、各光源台数ごとに、均等配置から提案手法を適用することでどの程度分散が減少したかを表 6,7,8 に示す。

表 6: 提案手法を適用した際の分散の変化 (Cube)

	30 台	54 台	102 台	198 台
分散の変化	83%減	96%減	98%減	100%減

表 7: 提案手法を適用した際の分散の変化 (Body)

	30 台	54 台	102 台	198 台
分散の変化	10%減	31%減	77%減	88%減

表 6,7,8 から分かるように、光源台数を増加させることによって、少ない光源台数の時よりも、分散の減少の割合が大きくなっていることが分かる。提案手

表 8: 提案手法を適用した際の分散の変化 (Torso)

	30 台	54 台	102 台	198 台
分散の変化	53%減	80%減	94%減	98%減

法において、光源台数の増加はより適切な照明コントロールを行うことを可能にすることが分かる。また、対象物体 Body における分散の減少の割合は、他の Cube, Torso に比べて小さい。これは表 2 で確認されるように、常に ON にする必要のある光源が多く、実際に ON/OFF の設定を行うことのできる光源台数が少ないためである。

次に、図 6,7,8 に対象物体ごとに光源台数を 102 台に設定した時の入射光の光量のヒストグラムを示す。

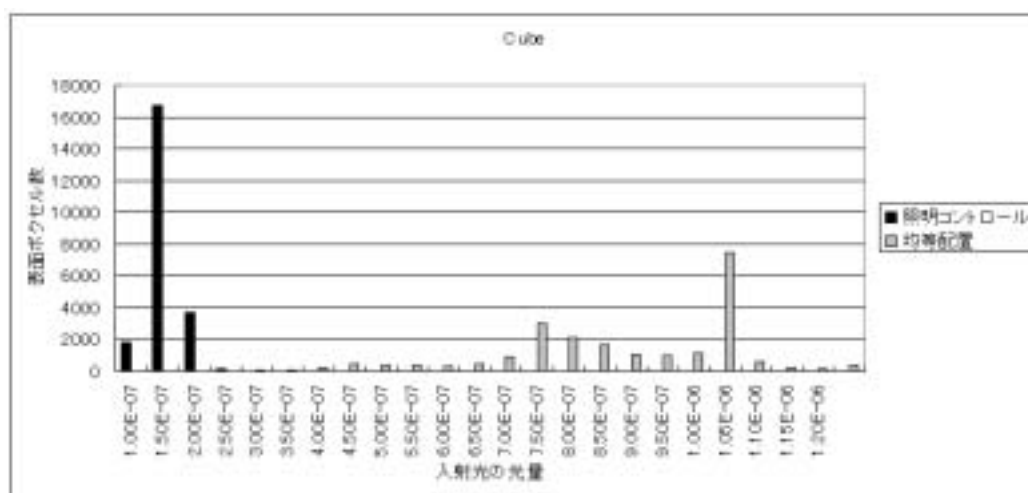


図 6: 入射光の光量のヒストグラム (Cube)

図 6,7,8 から、提案手法を用いた場合の入射光の光量のヒストグラムの方が、均等配置の場合に比べて、ばらつきが小さいことが確認される。しかし、対象物体 Cube においては、形状が複雑ではないため均等配置でもばらつきは他の Body, Torso に比べて小さいことが分かる。全ての対象物体において、提案手法と均等配置の共に、入射光の光量の小さい表面ボクセルが多いことが確認される。このような表面ボクセルは、配置される光源台数に制限があるために、全ての光源を ON した状態でも、入射光の光量が小さくなってしまふ。

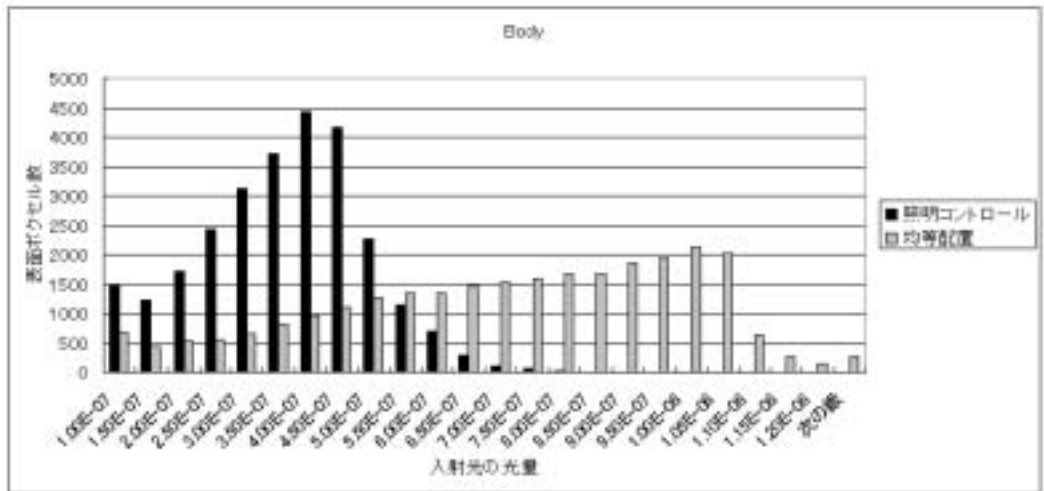


図 7: 入射光の光量のヒストグラム (Body)

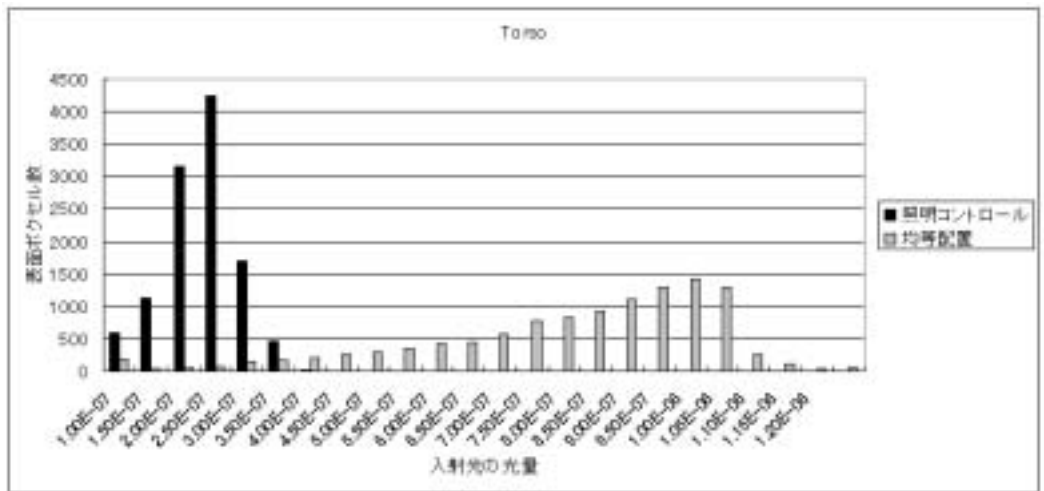


図 8: 入射光の光量のヒストグラム (Torso)

5.2.4 入射光の光量の視覚化

入射光の光量の分布がどのようなになっているかを調べるために、入射光の光量の視覚化を行った。

各表面ボクセルに照射された光量を求め、その中で最大となる光量に対応する表面ボクセルの色が1とした。入射光の光量に基づいて、0から1に収まるように正規化を行い、表面ボクセルの色を決定した。

図9,10,11では、対象物体ごとに、光源台数が102台の照明環境において、均等配置の場合と照明コントロールを行った場合で視覚化を行った結果を示す。

図9では、単純な形状のため、提案手法と均等配置のどちらにおいても、入射光の光量のばらつきは確認しにくい。図10では、均等配置の場合、明るい部分と暗い部分が混在しているのに対し、提案手法の場合では、全体的にばらつきが減少している。また、均等配置では、正面からの首の部分や脇の下など光の届きにくい部分の光量が少なくばらつきがあるのに対し、提案手法ではばらつきが減少している。図11では、均等配置では、正面からの首の部分の光量が少ないのに対し、提案手法では改善されているのが分かる。

5.3 考察

実験結果より、照明コントロールを行うことで、均等配置と比較して入射光の光量のばらつきが減少することが確認された。

本実験では、光源を均等配置した照明環境において、照明コントロールを行った。そのため、全ての光源をONにした状態でも、照射する入射光の光量が少ないような表面ボクセルに対しては、照明コントロールを行っても同じ結果となる。このことは図6,7,8で示されたヒストグラムからも確認される。特に対象物体 Body においては、照射する入射光の光量が少ないような表面ボクセルが非常に多い。

この問題に対処するためには、配置する光源台数を増加させるという手法の他に、光源を配置する位置を変化させるという手法が考えられる。本実験では、同一球面上に光源を均等配置したが、その球面よりも内部に光源を配置することで、同一球面上の均等配置よりも少ない光源台数で、1度に多くの表面ボクセルに光を照射することができる場合がある。

また、今回は I_{\min} を0に設定した。0に設定することで、全ての光源をONにした状態で入射光の光量が0でない表面ボクセルは、その入射光の光量が0に



(a) 前面 (均等配置)



(b) 背面 (均等配置)



(c) 前面 (提案手法)



(d) 背面 (提案手法)

図 9: Cube に照射する入射光の光量の視覚化



(a) 前面 (均等配置)



(b) 背面 (均等配置)



(c) 前面 (提案手法)



(d) 背面 (提案手法)

図 10: Body に照射する入射光の光量の視覚化



(a) 前面 (均等配置)



(b) 背面 (均等配置)



(c) 前面 (提案手法)



(d) 背面 (提案手法)

図 11: Torso に照射する入射光の光量の視覚化

ならないように，常にどれかの光源から光が照射される．このように常に ON となる光源が存在することは，照明の偏りの原因となる．大量の光源を配置しているにも関わらず，入射光の光量が少なくなる表面ボクセルは，他のボクセルの陰となるような部分であり，このような部分の反射係数の獲得を重要視しないのであれば， I_{\min} の値を 0 よりも大きな値に設定し，無光ボクセルの数を増やすことで，常に ON と設定する必要がある光源台数を減らし，無光ボクセル以外の表面ボクセルに関しては入射光の光量のばらつきを小さくすることができると考えられる．そのため， I_{\min} の設定は，用途に応じて適切な値を設定する必要があると考えられる．

第6章 結論

本研究では，物体形状の応じた照明コントロール法について提案し，光源を均等配置した場合との比較を入射光の光量を調べる実験を行うことで有効性を確かめた．

提案手法では，大量の光源を配置した照明環境を構築した上で，視体積交差法を用いて対象の 3 次元形状を獲得し，3 次元形状の表面を分割した表面ボクセルごとに光源から入射する光量を計算した．それらの入射光の光量のばらつきが小さくなるように各光源の ON/OFF を設定することで照明コントロールを行う．また光源台数の増加により，計算時間が膨大となるのを防ぐために，最適化を行った．

本研究の目的としては，様々な物体形状に応じた照明コントロールを行うことであるが，あらかじめ特定の形状 (人体等) に対して利用することが分かっている場合は，提案手法で求めた照明コントロールにおいて，常に OFF になるような光源を取り外し，対象によって ON/OFF の設定が頻繁に行われるような光源の近くに配置し直すことで，より適切な照明コントロールが可能になると思われる．

本研究では，反射光として拡散反射光のみに着目して照明コントロールを行った．さらにカメラ位置を基にして，鏡面反射光も扱うことが可能になり，より有効な照明コントロールを行えるようになると考えられる．これを今後の課題とする予定である．

謝辞

本研究を行うにあたり多くの御教示，熱心な御指導を賜りました美濃導彦教授に深く感謝致します。また，日頃より熱心な御指導くださいました角所考助教授に深く感謝致します。最後に，日頃より熱心な御指導と本報告書の作成においても数多く助言を頂きました飯山将晃助手をはじめとするモデルグループの方々，並びに美濃研究室の皆様にお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] 成田大助, 大谷幸三, 馬場 充, “レンジファインダを用いた三次元形状と表面反射特性の同時計測”, 2002 年電子情報通信学会総合大会講演論文集, D-11-150, 2002
- [2] Umesh R.Dhond and J.K.Aggarwal. “Structure from stereo—a review”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 19(6):pp.1489-1510,1989
- [3] A.Laurentini, “The visual hull concept for silhouette-based image understanding”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 16(2):pp.150-162, Feb. 1994.
- [4] W.Matusik, C.Buehler, R.Raskar, S.Gortler, and L.McMillan, “image-based visual hulls”, Proc. on SIGGRAPH 2000, pp.369-374, 2000.
- [5] Yu, Y.,Debevec, P.E., Malik, J. and Hawkins, T., “Inverse Global Illumination:Recovering Reflectance Models of Real Scenes from Photograph”, Proc. SIGGRAPH 99 Conference, pp.215-224, 1999.
- [6] B.T. Phong, “Illumination for computer generated pictures”, Commun. ACM, vol.18, no.6, pp.311-317, 1975.
- [7] K.E. Torrance, E.M. Sparrow, “Theory for offspecular reflection from roughened surface”, J. Opt. Soc. Am., vol.57, pp.1105-1114, 1967.
- [8] 飯山将晃, 青木啓史, 亀田能成, 美濃導彦, “未知光源環境での物体形状と反射特性のボクセル独立な再構成法” 情報処理学会論文誌, pp.3185-3193, 2001.