

輝度ヒストグラムの概形に基づく最適な光源配置法

古川 権大^{1,a)} 太田 直哉^{2,b)} 高橋 成雄^{1,c)}

概要: CG ハードウェア技術の発展により CG で表現できる物体やシーンも複雑になるに従い、視認性の高い光源配置も重要な問題として認識されてきている。自動的に最適な光源配置を決定する手法として、レンダリング後の画像の輝度値のエントロピーを最大化するような手法が提案されているが、過度に陰やハイライトが生じる場合には、必ずしも最適な光源配置が求められない場合が存在した。本報告では、既存手法では考慮されなかった輝度値分布の形状にも考慮することにより、より適用範囲の広い光源配置法を提案する。提案手法と従来手法とで光源配置を行った結果のレンダリング画像を比較することにより、本手法が適切な光源配置を行えることを示す。

キーワード: 最適光源配置, 輝度値ヒストグラム, エントロピー, スケールスペース

Optimal Light Placement Based on the Profiles of Intensity Histograms

KENDAI FURUKAWA^{1,a)} NAOYA OHTA^{2,b)} SHIGEO TAKAHASHI^{1,c)}

Abstract: The evolution of computer graphics hardware makes it practical to render very complex objects or scenes. This increases the demand to automatically determine the optimal light positions that yield high visibility of the objects or scenes. Several methods have been proposed for this purpose, where the light positions are determined so as to maximize the entropy of intensity distribution of the rendered image. However, it is observed that these methods do not provide good results for some specific cases where the rendered image contains unnecessary shades and highlights over the target 3D object. In order to alleviate this problem, we propose in this report a new method that takes into account not only the entropy, but also the profile of the intensity distribution. By experiments, we show that our method generates better results in many cases through the comparison between the images rendered by the conventional and our methods.

Keywords: optimal light placement, intensity histogram, entropy, scale space

1. はじめに

近年の急速なコンピュータハードウェア技術の進歩に伴い、コンピュータグラフィクスが様々な分野で多く利用されるようになった。コンピュータグラフィクスの技術を用いて最適な画像の生成するためには、視点や光源の位置な

どの画像生成時のパラメータを最適に設定することが重要であるが、これを一般のユーザーが行うことは大きな負担である。したがって、これを自動化する研究が従来から行われてきている。本報告では、これら画像生成のためのパラメータのうち光源の配置に焦点を当て、最も良い画像を生成する光源の位置を自動的に決定する問題について考察する。

コンピュータグラフィクスで生成される画像の良さを考察する場合、どのような画像が良い画像であるかを明確にしておく必要があるが、画像の良さを一般的に定義することは難しい。たとえば写真家やデザイナーが芸術的な表現

¹ 東京大学大学院 新領域創成科学研究科
Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

² 群馬大学大学院 工学研究科
Graduate School of Engineering, Gunma University

a) furukawa@visual.k.u-tokyo.ac.jp

b) ohta@cs.gunma-u.ac.jp

c) takahashis@acm.org

を目的として画像を作成する場合には、その画像の良さの評価は見る人の好みによって大きく異なるのが通常であり、さらにこの良さの定量的評価を計算機のプログラムとして実現するのは大変困難であると考えられる。しかしコンピュータグラフィックスの一般的な用途を考えると、このような芸術的目的で使われることは少なく、対象物体の3次元形状を紙面、あるいはディスプレイといった2次元の媒体を通して人間に伝達することが重要な目的である場合が多い。その場合には画像の良さの基準として対象物体の持つ3次元形状の情報がどの程度画像から知覚できるかを評価するのが適当である。さらにそのような評価基準であれば、多くの人に共通する結果が期待できると共に、それを計算機のアルゴリズムとして実現することも可能であると考えられる。また対象物体の3次元形状の認識には、それを照明する光源の位置が大きく影響することが報告されており [5]、その観点からもこの評価基準によって光源位置を決定することは妥当であると思われる。

上記の議論により、我々の取り組むべき問題は、3次元形状が良く知覚できるという評価基準を、どのようにして計算機で実行可能なアルゴリズムと実現するかとなる。この問題に対しては、従来手法として、レンダリングされた画像の輝度分布のエントロピー (Illumination Entropy) が最大となるような光源配置を行うものがある [1]。この方法では、輝度が明るいものから暗いものまで万遍なく現れているような画像が優れていると判断され、そのような画像を生成する光源配置が行われるため、一般には奥行きが感じられる画像が得られることになる。しかしこの方法では、画像に影の暗い部分やハイライトなどによる明るい部分を多く含むような画像を、過度に良い画像であると評価する傾向がある。この問題に対し、[1] では画素値の暗い部分と明るい部分に重みをつける効果のある変換関数で画素値を変換してから輝度ヒストグラムを生成する改善方法が示されている。しかしこの関数を用いても効果が十分でなく、さらには人間によるパラメータの調整も必要であるという問題も残る。そこで本報告では輝度ヒストグラムのエントロピーのみでなく、ヒストグラムの分布パターンも考慮した評価関数を使用することにより、上記の問題の解決を含め、より良い画像を生成する光源の配置を自動的に決定する方法を考察する。

従来の輝度ヒストグラムのエントロピーのみを用いる方法に対して、本手法の基本的な着目点は以下の通りである。エントロピーはヒストグラムの各ビンの階級値とは無関係に計算される。たとえば図 1 に示すヒストグラムの例では、どちらのヒストグラムも 2 つのビンが大きな値になっているが、それらのビンの階級値は異なっている。このような場合でもエントロピーは同じ値になるが、画像のコントラストは明らかに異なり、画像の良さも異なってくると考えられる。そこで提案手法では、ヒストグラムのエント

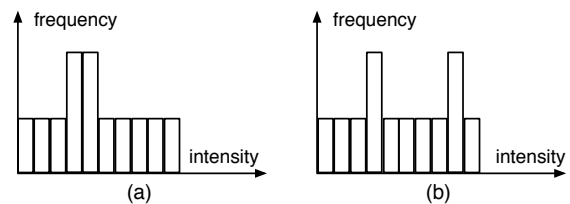


図 1 同じエントロピーを与えるヒストグラムの例
 Fig. 1 An example of two histograms having the same entropy.

ロピーに加え、その形状にも依存した評価関数を導入することにより、各ビンの階級値の情報も評価値に反映することを考える。本手法において、ヒストグラムの形状を解析する基本的な考え方は、[6] で提案されているようなスケールスペースのように、ヒストグラムのスケールを変化させていったときにエントロピーがどのように変化するかを観察することである。注目するスケールを変化させる具体的処理として、ヒストグラムのビンを統合して階級の幅を大きくしていく方法と、階級の幅はそのままにガウシフィルタによって平滑化する方法の 2 つの方法を試みた。

以下本報告では、2 節で関連研究に触れたのち、3 節にて従来手法の概略と問題点の例を示す。次に 4 節において提案手法を述べ、5 節で実験結果を示したのち、6 節でまとめを述べる。

2. 関連研究

コンピュータグラフィックスにおいて、画像生成時の最適なパラメータを自動決定する研究は数多くなされている。これらパラメータのうち、視点の位置について考察した代表的な例の一つが Vazquez らの研究 [2] である。ここでは、視点から得られる情報量をエントロピーによって評価して視点を決定している。一方エントロピーによる情報量の評価という考えを、光源の位置決定に導入したのが Gumhold の研究 [1] である。本報告で報告する研究はこの研究を改良したものと位置づけられる。照明の最適設計に関しては、エントロピーではなく幾何的に最適な照明設計を行う手法も Shacked らによって提案されている [3]。また O'Shea らは、実験によって物体の形状特徴が伝わり易いような照明配置を見積もる報告 [4] を行い、さらに Caniard ら [5] は 3D モデルに対し、異なる照明条件を用いて被験者に同一物体を選ばせるなどの実験を行って、照明条件が物体の形状認識に及ぼす影響を報告している。Caniard らの研究によれば、照明条件は物体の形状特徴を最終的に認識するうえで極めて重要な要素であり、このことから最適な光源の配置を自動決定する優れた手法を開発することは重要であると考えられる。

3. Illumination Entropy

本節では、本報告で提案する手法の基礎とした輝度分布のエントロピー (Illumination Entropy) を光源配置評価に

用いる方法 [1] と、その問題点を述べる。

Gumhold [1] は、照明によって画像から得られる情報量を最大化させるという考えに基づいた上、情報量の尺度として生成された画像の輝度分布のエントロピー (Illumination Entropy) を用いることで最適な光源配置法を提案した。Illumination Entropy は輝度値の情報量のみに基づいて計算される。提案された処理の概要は、まず適当な位置に光源を配置し、レンダリングを行なった結果の画像に対し輝度ヒストグラムを計算する。更に輝度ヒストグラムを総和が 1 となるように正規化を行い、確率分布と見なしてそのエントロピーを計算する。このエントロピーが最大になるように光源位置を変更するものである。以下に Illumination Entropy の具体的計算手順を示す。

一般に、レンダリングされたカラー画像の色表現は、国際電気標準会議 (IEC) の sRGB に準拠しているため、これを次式を用いて XYZ 三刺激値の輝度成分 (Y) に変換する。

$$Y = 0.21262 R + 0.71514 G + 0.07215 B \quad (1)$$

ここで R, G, B は原画像の色成分 (画素値) である。輝度 Y の値は一般に 0 から 255 の範囲になるが、これをそのままヒストグラムの階級の数とするには多すぎるため、次にこれを 20 から 50 程度に落とす。Gumhold は階級数 m を $m = 30$ とし、輝度値 Y の範囲を $[0, 1]$ に正規化した上、以下の式でその輝度値の画素をカウントするヒストグラムのビン b_i の順位 i を決定している。

$$i = \lceil m(Y + \frac{1}{2}) \rceil \quad (2)$$

ただし $\lceil \cdot \rceil$ は ceiling function である。このようにして作成した輝度ヒストグラムのビン b_i の値を c_i とし、画像の画素の総数を N とすれば、その確率 p_i は $p_i = c_i/N$ となる。したがって Illumination Entropy H は次式で計算される。

$$H = - \sum_{i=1}^m p_i \log_2 p_i = - \sum_{i=1}^m \frac{c_i}{N} \log_2 \frac{c_i}{N} \quad (3)$$

従来手法では、この値を最大化するように光源の配置が決定される。

画像の良さを Illumination Entropy で測るという考え方は、基本的には一様分布の輝度ヒストグラムを持つ画像、すなわち暗い色から明るい色まで満遍なく分布している画像が優れているという考え方である。しかしどのような光源配置にしても輝度ヒストグラムが一様分布になることは少なく、一般には局在したヒストグラム間の優劣を評価することになり、そのような場合に適切な評価ができない場合がある。その例を、図 2 に示す。この図には 2 種類の画像とその輝度ヒストグラムが示されているが、Illumination Entropy による評価では、(b) が (a) よりも高くなる。これは、(b) のヒストグラムは低い輝度に偏った分布があるがそれ以外の部分ではほぼ一様に分布しているため、結果的

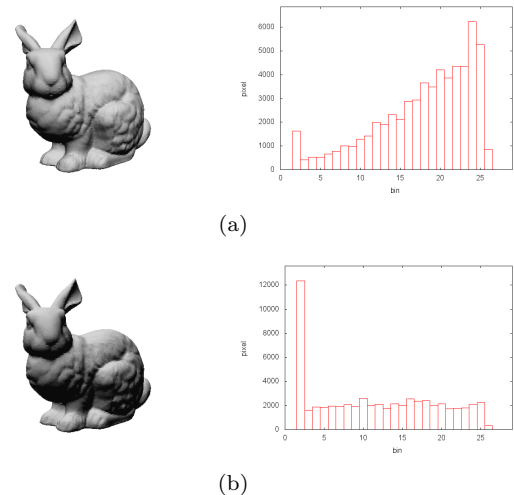


図 2 生成された画像とその輝度ヒストグラム。Illumination Entropy の値は (a) は 0.876, (b) は 0.885 で、従来手法では (b) の光源配置の方が良いと判定される。

Fig. 2 Rendered images and their intensity histograms. The illumination entropy values are 0.876 for (a) and 0.885 for (b), and (b) is regarded as the better image by the traditional method.

に (a) のヒストグラムより大きい値になる。しかし (a) の方がうさぎの下の部分の形状が良く認識でき、多くの人が (a) の方を選択すると思われる。従来手法では、このような問題に対し 3 次式の単調関数を用いて輝度値を変換してエントロピーを計算する改善策も示されているが、生成された画像に応じて人手で設定するパラメータが含まれている上、改善範囲も限定される。本研究ではこの問題の解決も含め、さらに良い光源配置を与える手法を提案する。

4. 提案手法

提案手法の基本的なアイデアは、注目するスケールを変化させていったときに輝度値ヒストグラムの形状がどのように変化するかにも注目することである。すなわち輝度値ヒストグラムのスケールを変化させてのエントロピーの変化を観測し、その変化の情報をエントロピーの値そのものに加えて画像の良さを算出する。

ヒストグラムのスケールを変化させる手法は 2 つの方法を試みた。1 つ目はヒストグラムの階級数 (ビンの数) を減らす方法、もう 1 つはヒストグラムにガウシアンフィルタによる平滑化を行う方法である。これらの方法を提案手法 1 および提案手法 2 として、以下それらの説明を行う。

4.1 提案手法 1

提案手法 1 は、ヒストグラムの階級数 (ビン数) を減らすことでヒストグラムを粗くし、注目するスケールを変化させる方法である。ヒストグラムの階級数を 2^n とし、隣り合うビンを統合することにより n を減らしてゆく。すなわち元のヒストグラム階級数を 2^n 、そのビンを b_i とし、新

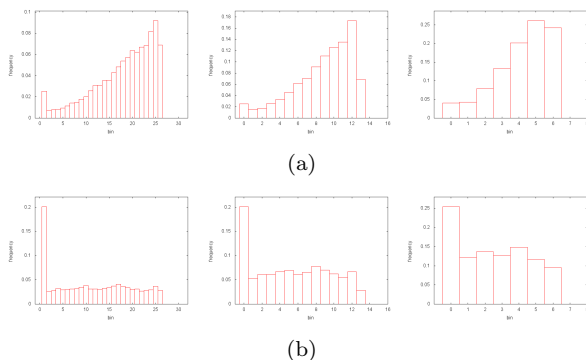


図 3 ビンの統合によるヒストグラムの変化．図 2 の (a) および (b) のヒストグラムに対する結果が，それぞれ (a) および (b) である．

Fig. 3 Changes in shape of the histogram by merging adjacent bins. (a) and (b) correspond to the histograms in (a) and (b) in Fig. 2, respectively.

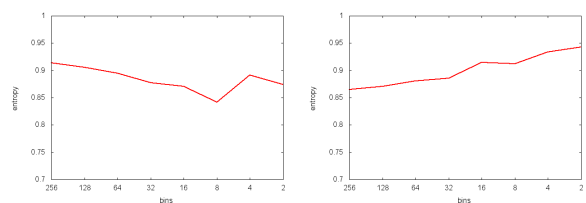


図 4 階級数の減少に伴うエントロピーの変化．エントロピーは一様分布の時の値が 1 になるように正規化してある．右に行くに従い階級数が少ない．(a) および (b) は図 3 の (a) および (b) に対応する．

Fig. 4 Changes in entropy by bin merging. (a) and (b) correspond to (a) and (b) in Fig. 3, respectively.

たな (階級数が半分の) ヒストグラムのビンを b'_i とすると

$$b'_i = b_{2i} + b_{2i+1} \quad (0 < i < n/2) \quad (4)$$

となる．ここで n の範囲は $3 \leq n \leq 5$ とし，階級数の数が 32 から 8 の間のエントロピーの変化を用いる．

図 3 は図 2 のヒストグラムに対して，このようにして階級数の減少を行ったもの，図 4 はそのときのエントロピーの変化をグラフに示したものである．なおエントロピーの値は各階級数での一様分布のエントロピーで割って，最大値が 1 になるように正規化した値である．ここではこれを正規化エントロピーと呼ぶ．正規化エントロピーの変化を図 2 の画像を含むいくつかの画像例で検証したところ，この処理によって正規化エントロピーは減少する方が，より好ましい画像になることが分かった．したがって以下のように入力エントロピーの変化に関する評価値 v_1 を定める．

元々のヒストグラムの正規化エントロピーを H_0 とし，階級数を半分にしたものを H_1 ，さらに半分にしたものを H_2 ，のように i 回半減させたものを H_i とする．これらを用いて評価値 v_1 を次のように計算する．

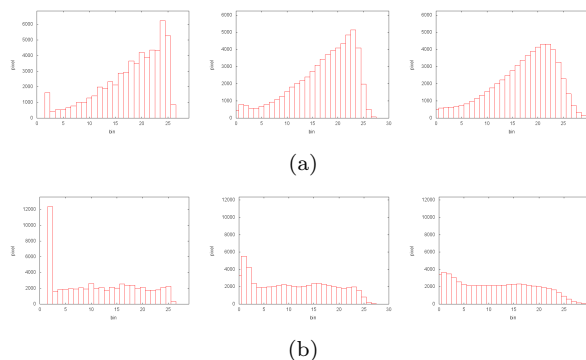


図 5 ガウシアンフィルタを用いた平滑化によるヒストグラムの変化．図 2 の (a) および (b) のヒストグラムに対する結果が，それぞれ (a) および (b) である．

Fig. 5 Changes in entropy by smoothing by Gaussian filter. (a) and (b) correspond to (a) and (b) in Fig. 2, respectively.

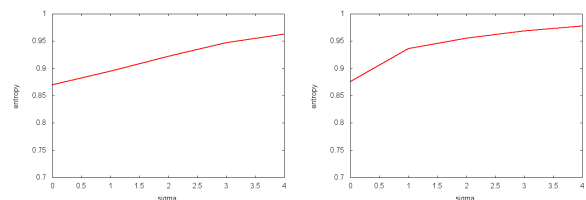


図 6 平滑化に伴うエントロピーの変化．(a) および (b) は図 5 の (a) および (b) に対応する．

Fig. 6 Changes in entropy by smoothing by Gaussian filter. (a) and (b) correspond to (a) and (b) in Fig. 5, respectively.

$$\Delta H_i = H_i - H_{i-1} \quad (5)$$

$$v_1 = - \sum_{i=1}^m \Delta H_i \quad (6)$$

ここで m は階級数を半減させた回数， ΔH_i は H_{i-1} から H_i への i 回目の半減の際のエントロピーの増加量である．評価値 v_1 は値が大きいとき画像がより好ましいことを表す．

評価値 v_1 はエントロピーの変化に関する指標なので，エントロピーの大きさに関する評価値 v_2 は最初の階級数でのエントロピー H_0 とし，それらを重み α と β を用いて加算して最終的な評価値 V とする．

$$v_2 = H_0 \quad (7)$$

$$V = \alpha v_1 + \beta v_2 \quad (8)$$

なお，重み α と β の決定法については後述する．

4.2 提案手法 2

2 番目の方法はガウシアンフィルタを用いて，輝度値ヒストグラムの平滑化を繰り返し行い，その時のエントロピーの変化を使用する方法である．ここでガウシアンフィルタのカーネル $g(x)$ は，標準偏差を 1 階級値とした次式を用いた．

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (9)$$

なお実際の計算ではこれを離散化したものを用い、さらにヒストグラムの両端での計算でカーネルのサポートがヒストグラムの階級範囲をはみ出る場合、階級がある部分だけカーネルの値の和が1になるように正規化した。これによりヒストグラムが一様分布であったときには、このガウシアンフィルタをかけてもヒストグラムは変化しない。

図2のヒストグラムに対して平滑化を行った結果が図5である。またこの処理によるエントロピーの変化をグラフにしたのが図6である。図5(a)のようなヒストグラムの概形が滑らかな山形をしている場合、平滑化によって概形に大きな変化は起こらないが、(b)のようなある階級の値が単独で大きいようなヒストグラムでは、その部分が平滑化により急激に変化する。したがってエントロピーは(a)のような場合少しづつ一定の割合で増加してゆくのに対し、(b)のような場合は最初の平滑化で大きく変化し、その後あまり変化をしない。この画像例に限らず、前者のように一定の変化が続く場合に好ましい画像になっている例が多かったので、このような場合に評価値が高くなるように、提案方法2でのエントロピー変化に関する指標 v_1 を定義する。

ここで m 回の平滑化を行うこととし、それぞれの段階でのエントロピーをそれぞれ $H_1, H_2, \dots, H_i, \dots, H_m$ とする。そして $i-1$ 回目の平滑化処理を行ったヒストグラムのエントロピーと i 回目の平滑化処理を行ったヒストグラムのエントロピーの差 ΔH_i を計算する。

$$\Delta H_i = H_i - H_{i-1} \quad (10)$$

なお H_0 は平滑化を行わないヒストグラムのエントロピー(従来の Illumination Entropy の値)である。そしてこれらの各平滑化段階における差分 ΔH_i を総和が1になるように正規化し、次の h_i を得る。

$$h_i = \frac{\Delta H_i}{\sum_{i=1}^m \Delta H_i} \quad (11)$$

すると h_i を確率分布とみなすことで、 h_i に対するエントロピー $H(h_i)$ を計算することができ、それを用いて次のように評価値 v_1 を定義する。

$$v_1 = \frac{H(h_i)}{\log_2 m} = -\frac{\sum_{i=1}^m h_i \log_2(h_i)}{\log_2 m} \quad (12)$$

ここで $\log_2 m$ は階級数 m の一様分布のエントロピーであり、これにより評価値 v_1 の範囲が $[0, 1]$ に正規化される。評価値 v_1 は、その値が1に近ければ、輝度値ヒストグラムに平滑化を施していった場合のエントロピーの変化が一定に近いことを示している。

提案方法1と同様に、 v_1 はエントロピーの変化に関する指標なので、エントロピーの値自体を反映する評価値 v_2 を

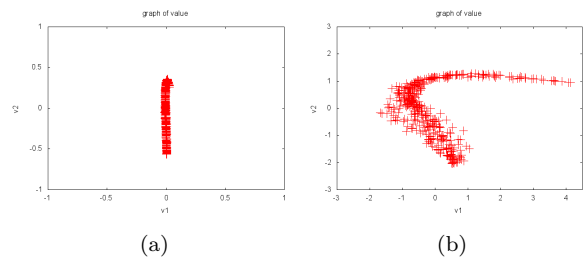


図7 重み α と β の決定。横軸を v_1 、縦軸を v_2 としてプロットした図。(a)は重みによる変換前、(b)は変換後のプロット。

Fig. 7 Automatic computation of weightings α and β . The horizontal axis is for v_1 , and the vertical for v_2 . (a) and (b) are before and after conversion, respectively.

H_0 とし、それらを重み α と β を用いて統合し、最終的な評価値 V とする。

$$v_2 = H_0 \quad (13)$$

$$V = \alpha v_1 + \beta v_2 \quad (14)$$

4.3 適切な重みの決定

提案手法1の式(8)および提案手法2の式(14)に含まれる重み α と β は人手によって設定することもできるが、適切な値になるよう自動的に決定されることが望ましい。そこで光源を様々に変化させてレンダリングされた画像から得られる v_1 および v_2 を計算し、それらの分布の分散が1になるように重み α および β を決定することとした。具体的には光源配置と配置評価を繰り返し行う過程で計算される v_1 および v_2 の値の標準偏差を計算する。そして v_1 の標準偏差を σ_1 、 v_2 の標準偏差を σ_2 とすると、式(8)または式(14)は次のように計算される。

$$V = \alpha v_1 + \beta v_2 = \frac{1}{\sigma_1} v_1 + \frac{1}{\sigma_2} v_2 \quad (15)$$

図7は上記の処理によって決定された重みの効果を示した図である。提案方法1を用いたある最適光源位置計算において、 v_1 および v_2 の元々の分布をプロットしたのが(a)であり、上記のように決定された重み α と β を乗じた結果をプロットしたのが(b)である。この重み付けにより、2つの評価値の効果が適切に混合されている。

5. 実験結果

図8は従来手法[1]と本手法をそれぞれ適用して最適光源配置を行なった結果である。図の(a)が提案手法1、(b)が提案手法2、(c)が従来手法による結果で、対象物体は左から順に bunny, dragon, buddha である。手法1と手法2の結果画像の下段には自動計算された重み α, β を示す。物体のモデルは色は白色、鏡面反射光無しとしている。光源は無遠方に置いた単一光源(平行光)で、最適位置を探索する光源位置の範囲は、物体を中心とした球面上に均等に分布する420点に対応する方向とした。尚、計算時間にいつ

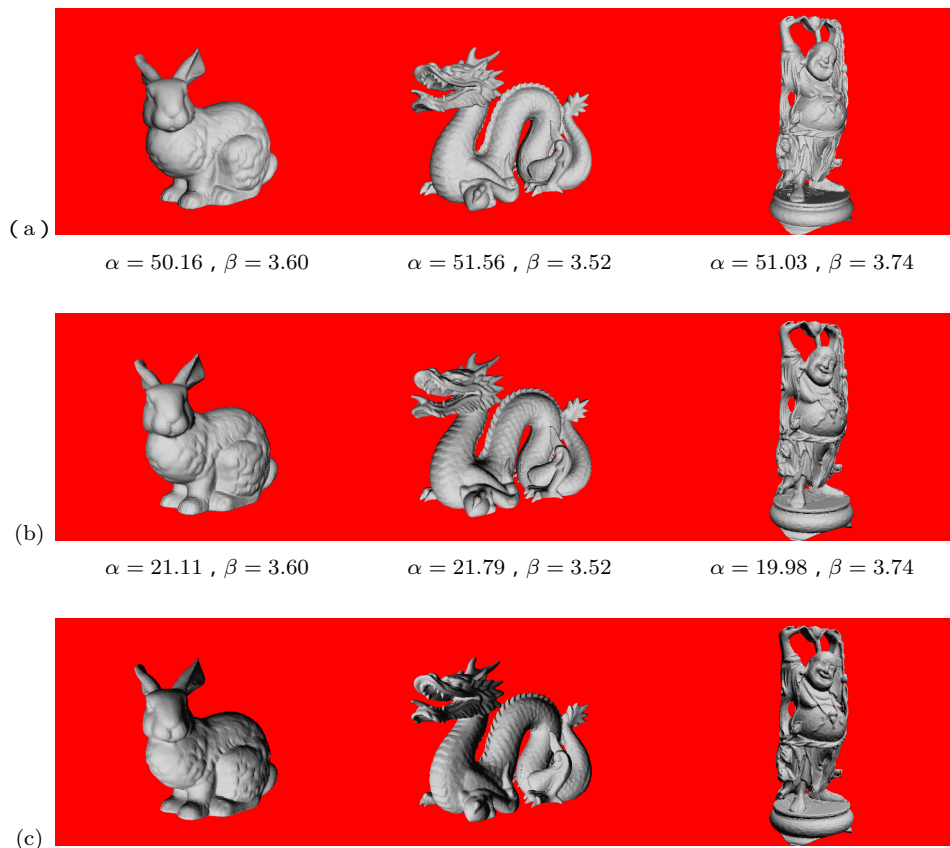


図 8 最適な光源位置による画像 . (a) 提案手法 1 , (b) 提案手法 2 , (c) 従来手法 .

Fig. 8 Rendered images with optimal illuminations.

(a) Proposed method 1, (b) Proposed method 2, and (c) Conventional method.

いては、実験環境として CPU Intel Core2Quad (2.4GHz , 4M × 2 Cache) , メモリ 8GB RAM , GPU GeForce8600GT の計算機で、今回用いた頂点数 50000 程度の 3D モデルの場合、従来手法は約 25 秒、手法 1、手法 2 はで約 30 秒程度の計算時間を要する。従来法 (c) では影の部分が多く現れ、その部分では物体形状の把握が困難な画像が選択されているが、提案手法の (a) と (b) ではそのような部分が少なく、全体的に形状が良く把握できる。提案手法のうちどちらが優れているかは評価者による好みも影響すると思われるが、形状の把握という意味では、ある程度陰影が強調された (b) の提案手法 2 が優れていると思われる。一方より自然な照明という観点からは (a) の提案手法も好ましい画像を選択している。

6. おわりに

本報告では画像の輝度値分布のエントロピーによって画像の良さを評価し、それに基づき最適な光源配置決定する手法において、輝度値分布のエントロピーに加え、その分布形状の情報も使用することで、より適した光源配置を与える手法を提案した。実験による検証では、従来手法で問題であった暗くつぶれた部分の発生を避けることができ、より対象物体の形状を認識しやすい光源位置が選択された。

今回は定量的な結果が得られる十分な量の実験を行うことができなかったため、今後多くの被験者による実験を行い、客観的な検証を行う必要がある。

参考文献

- [1] S. Gumhold, "Maximum entropy light source placement," Proceedings of the conference on visualization '02 (VIS '02), pp.276–282, Washington DC, USA (2002).
- [2] P. Vazquez, M. Feixas, M. Sbert, and W. Heidrich, "View-point selection using viewpoint entropy," Proceedings of vision, modeling, and visualization '01 (2001).
- [3] R. Shacked, and D. Lischinski, "Automatic lighting design using a perceptual quality metric," Computer graphics forum, Vol.20, No.3. pp. 215–227 (2001).
- [4] J. P. O'Shea, M. S. Banks, and M. Agrawala, "The assumed light direction for perceiving shape from shading," Proceedings of the 5th symposium on applied perception in graphics and visualization '08 (APGV'08), pp. 135–142 (2008).
- [5] F. Caniard, and R. W. Fleming, "Distortion in 3d shape estimation with changes in illumination," Proceedings of 4th symposium on Applied perception in graphics and visualization, pp. 99–105 (2007).
- [6] A. P. Witkin, "Scale-space filtering," Proceedings of 8th International Joint Conference Artificial Intelligence, pp. 1019–1022, Karlsruhe, Germany (1983).