

大規模全方向視差ポリゴン法 CGH における質感表現レンダリング

西 寛仁、松島 恭治

関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科

概要：近年コンピュータホログラフィにおいて重要視されている質感表現の研究成果を報告している。金属的な光沢の質感を表現するために用いた光の反射方向を制御する技術、さらにガラスなどの透明な物体を表現するための屈折光の計算技術を述べ、実際にこれらの技術により作製したホログラムの再生像を示す。

1. はじめに

近年のコンピュータホログラフィの技術進歩は著しく、大規模で全方向視差の計算機合成ホログラム (Computer-Generated Hologram: CGH) の製作が行えるようになった。関西大学はポリゴン法と呼ばれる物体光波計算手法とレーザーリソグラフィ技術を組み合わせて世界最先端の CGH を製作する技術を有し、現在ではその1つとしてサイネージ等の広告分野への展開も視野に入れている。この時、課題の1つとして質感表現技術が挙げられる。商品の魅力的に見せるには、車の光沢感、ガラスの透明感等をリアルに表現する必要がある。本稿では、我々が行った質感表現向上の研究成果について報告する。

2. コンピュータホログラフィ

図1は従来型のアナログホログラフィにおける一般的な記録光学系を示している。この技術では、コヒーレント光の干渉性を利用し、記録したい物体の物体光と参照光をフィルム等の感光材料に照射し、その干渉縞を記録する。これがホログラムである。再生時には、参照光のみをホログラムに照射する。

図1の光学系で記録した干渉縞は2次元の画像パターンであることから、計算機を用いて発生することもできる。コンピュータホログラフィは、このような干渉縞の数値合成からその描画や表示等の一連の技術であり、CGHはその成果物である

ホログラムを意味し、具体的には描画された干渉縞のことを指す。

CGH の観察者が広い範囲から3次元像を観察するには CGH の視域を広げる必要がある。CGH の視域角は干渉縞画像のピクセル間隔と再生光波長に依存しており、視域を広げるためにはピクセル間隔を狭める必要がある。例えば、波長 633nm でピクセル間隔が 1 μ m の場合、両側視域角は約 40 度となるが、このピクセル間隔で 10cm 角の画像サイズを確保するには 100 億ピクセルのピクセル数が必要となる。これは、フル HD ディ스플레이の 4 千倍以上のピクセル数となり、このサイズの干渉縞を数値合成するには膨大な計算量が必要となる。これは CGH の空間バンド積の問題と呼ばれている¹⁾。この問題により、実用的な CGH の計算は長らく困難であったが、PC の性能向上と効率的な光波解析手法の考案により、近年では 1000 億ピクセル以上の CGH も計算できるようになった。ただし、これほどのピクセル数を持った電子デバイスは現状では存在していないため CGH を動画で再生することは困難であり、コンピュータホログラフィの社会実装は主に静止画での利用を前提としている。

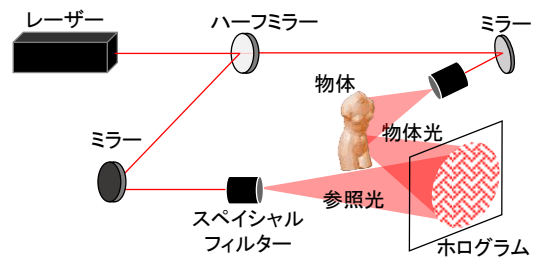


図1 ホログラムの記録光学系

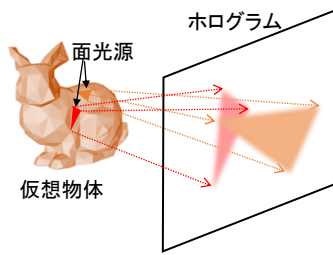


図2 ポリゴン法による物体光波計算

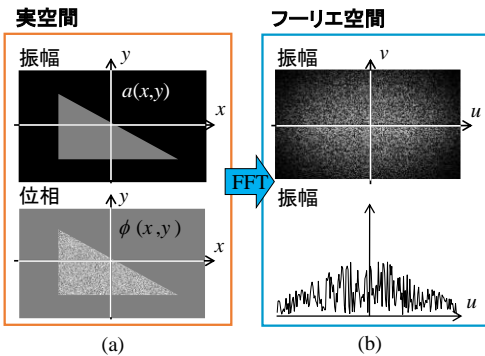


図3 表面関数の例

3. ポリゴン法

コンピュータホログラフィには複数の計算手法が存在するが、我々はポリゴン法を主に使用している。ポリゴン法とは、図2に示すように仮想物体上にポリゴン状の面光源を設置し、面光源単位で光波を計算する手法であり²⁾、FFTによる光波の回転変換³⁾を用いることが特徴である。ポリゴン法では全方向視差で大規模なCGHの数値合成が可能であり、ポリゴン単位の隠面消去法との相性も良く複雑な形状をもつ物体も計算可能である。

ポリゴン法における面光源は、表面関数と呼ばれる複素関数

$$h(x, y) = a(x, y) \exp[i\phi(x, y)] \quad (1)$$

で表現される。ここで、 x と y は面光源上の座標を表す。表面関数の振幅分布 $a(x, y)$ がポリゴンの形状と明るさを示し、通常、位相分布 $\phi(x, y)$ として乱数位相を用いることにより光波に拡散性を与える。図3に表面関数の例を示す。表面関数のフーリエスペクトルを図3(b)のようにブロードな形状とすることで広い範囲で面光源を視認することができる。

4. 鏡面性表面のレンダリング

ポリゴン法は大規模な全方向視差CGHの計算に適しているが、コンピュータグラフィックス(CG)で用いられる鏡面性表面のレンダリングとは相性が悪い。これは、CGでは光線として反射光を取り扱うのに対し、ポリゴン法では光波として取り扱うため、CGのレンダリング手法をそのまま適用できないためである。そこで、我々は表面関数の空間スペクトルを制御することで、ポリゴン法に適用できる手法を考案している^{4,5)}。

4.1. Phongモデルに基づく光波制御

ポリゴン法にCGのレンダリング手法を適用するため反射モデルとしてCGで良く知られたPhongの反射モデル⁶⁾に着目した。図4に示すように、このモデルでは、反射光が全方向に広がる拡散反射と、特定の方向のみに制限される鏡面反射の2種類に反射光を分類する。これを空間スペクトル的に考えると図5の様に拡散反射は広帯域、鏡面反射は狭帯域なスペクトルとなる。つまり、拡散性位相のスペクトル形状を適切に制御すればPhongモデルの反射特性を有する拡散性位相を生成することができる。本研究では、Phongモデルで鏡面反射光強度を表す式を基に、拡散性位相のスペクトル形状を

$$I_s(u, v; \mathbf{R}, \alpha) = [\mathbf{R} \cdot \mathbf{V}(u, v)]^\alpha = \begin{cases} \lambda^\alpha \left(R_x u + R_y v + R_z \sqrt{\lambda^2 - u^2 - v^2} \right)^\alpha & \mathbf{R} \cdot \mathbf{V}(u, v) \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

とした⁴⁾。ここで、 $\mathbf{R} = (R_x, R_y, R_z)$ は反射ベクトル、 \mathbf{V} は視線ベクトルを示し、 (u, v) は空間周波数である。また、 λ は光波の波長、 α はPhongモデルで

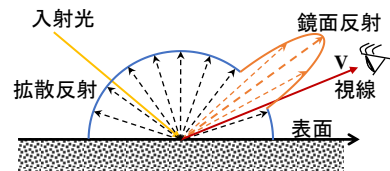


図4 Phongの反射モデル

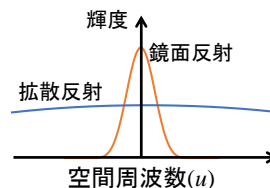


図5 鏡面反射と拡散反射のスペクトル形状

定義された光沢度を表している。 α を大きくすると帯域幅が狭くなり面光源の光沢感を増すことができる。

4.2. 鏡面性曲面のレンダリング

前述の方法のみでは、平面ポリゴン単位でしか光波の方向を制御することができないため、曲面をレンダリングする場合、単純にポリゴン数を増加させ形状を曲面に近づける必要がある。しかし、ポリゴン数が増加するとそれに比例して計算量も増加する問題が生じる。そこで、我々は図6の様に一つのポリゴン内をセグメント分割し、セグメント毎に反射方向を制御して疑似的に平面を曲面に見せる手法を考案した⁵⁾。

4.3. 鏡面性表面でレンダリングしたCGHの実例

異なったレンダリング処理を施したCGHの光学再生像の例を図7に示す。これらのCGHの共通パラメータを表1に示す。拡散反射のみの(a)とは異なり、光沢度を $\alpha=10$ として鏡面反射処理をした(b)及び(c)では光沢感が現れていることを確認できる。なお、各ポリゴンが平面である(b)とは異なり、(c)では4.2節の手法により曲面をレンダリングしている。

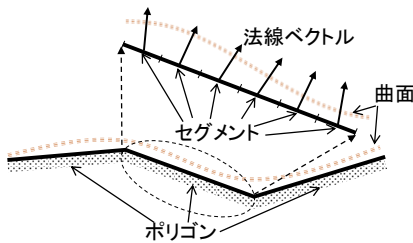


図6 セグメント分割による平面の曲面近似

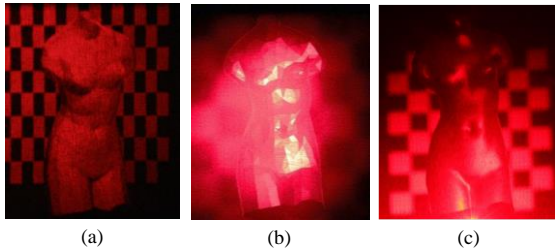


図7 異なるレンダリング処理を施したCGHの再生像

表1 CGHの共通パラメータ

ピクセル数	65,536 × 65,536
ピクセル間隔	1 μm × 1 μm
波長	632.8 nm

5. 透明物体のレンダリング

5.1. 波動光学における屈折光の扱い

我々は透明物体をレンダリングする手法も考案している⁷⁾。光が物体を透過する際、図8の様に屈折現象が生じる。屈折率 n_0 の空気から屈折率 n_1 の媒質に入射する直前の光波を $u_0(x,y,0;\lambda_0)$ とし、入射直後の光波を $u_1(x,y,0;\lambda_1)$ とすると、

$$u_0(x,y,0;\lambda_0) \propto u_1(x,y,0;\lambda_1) \quad (3)$$

の関係が成り立つ。ここで、 λ_0 は空気中の光波の波長であり、 $\lambda_1(=n_0\lambda_0/n_1)$ は媒質中の波長である。つまり、光波の振幅は入射前後で線形に変化するが、位相は境界面の前後で連続であるため変化せず比例関係が成立する。境界面の反射損失を無視する場合は、

$$u_0(x,y,0;\lambda_0) = u_1(x,y,0;\lambda_1) \quad (4)$$

とすることができる。つまり、入射するポリゴンの境界面で波長を変化させるだけで屈折光をシミュレートすることができる⁷⁾。

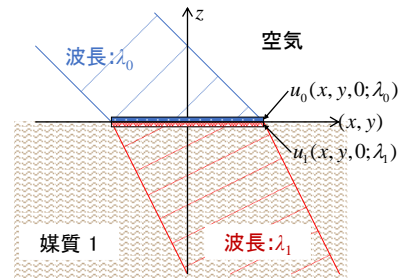


図8 異なる媒質に入射する光波

5.2. 物体分割による計算量の削減

透明物体をレンダリングする場合、図9(a)の様に光波が入射する物体背面の全ポリゴンから出射する全ポリゴンへの伝搬計算を行う必要があり、その回数は入射ポリゴン数 M と出射ポリゴン数 N の積 $M \times N$ となり膨大な計算量が必要となる。そこで、図9(b)の様に、最大断面積で2分割し背面ポリゴン(入射側)と前面ポリゴン(出射側)に分離できる形状に物体形状を制限した。これにより、背面ポリゴンの入射光波を最大断面まで伝搬して重畳し、それを前面の各ポリゴンに伝搬処理することができる。これにより伝搬計算回数は $M+N$ となり、計算量を大幅に削減することができる。

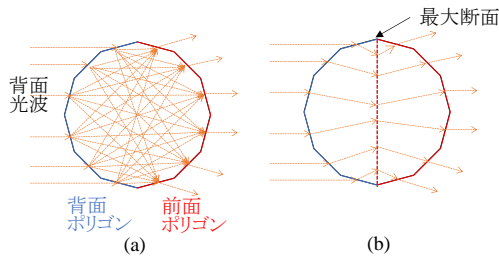


図9 物体分割による伝搬回数の削減

5.3. 透明物体を再生する CGH の実例

透明物体を再生する CGH のパラメータを表 2 に示し、図 10 に 3D シーンを示す。また、このシーンを CG でレンダリングした結果と CGH の光学再生像の比較を図 11 に示す。壁紙の前に置かれた球体がボールレンズとなり、背景が拡大されて見えている。CG で求めた画像と CGH の再生像はほぼ一致しており、本手法で正しくレンダリングできていることが確認できる。

表 2 透明物体を再生する CGH のパラメータ

ピクセル数	65,536 × 65,536
ピクセル間隔	1 μm × 1 μm
波長	632.8 nm
屈折率	空気 : 1.0、球体 : 1.5

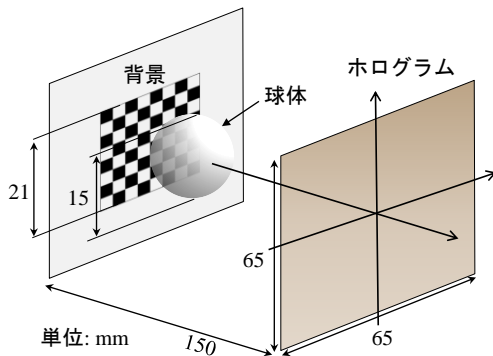


図 10 透明物体を再生する CGH の 3D シーン

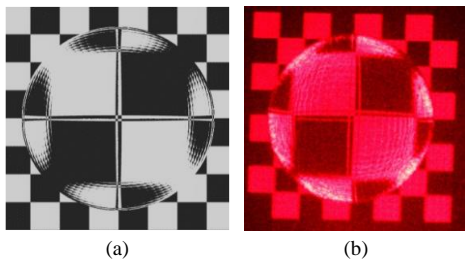


図 11 CG で求めた画像(a)と CGH の再生像(b)の比較

6. まとめと展望

ポリゴン法 CGH において筆者らが開発した質感表現レンダリングの手法について報告した。CGH の大規模化により社会実装の可能性が高まり、質感表現レンダリングの研究の重要性が増している。現在は、写実的に実物体の質感に近づける研究が主流であり、印象派絵画やアニメーションのデフォルメ等、3次元像の印象を大きく強調するレンダリング表現の研究はほとんど行われていない。コンピュータホログラフィの社会実装においては、観察者に驚きや感動を与えるようなレンダリング技術が必要不可欠になると考えており、これらのテーマも今後は研究したいと考えている。

また、透明物体のレンダリング技術は、映像分野以外にもレーザー加工や計測用光学系の解析にも応用できる技術であり、このような応用研究も今後行いたいと考えている。

参考文献

- (1) K. Matsushima, *Introduction to Computer Holography*, Sec. 8.2 (Springer, 2020).
- (2) K. Matsushima and S. Nakahara, Extremely high-definition full-parallax computer-generated hologram created by the polygon-based method, *Appl. Opt.* **48**, H54–H63 (2009).
- (3) K. Matsushima, H. Schimmel, and F. Wyrowski, Fast calculation method for optical diffraction on tilted planes by use of the angular spectrum of plane waves, *J. Opt. Soc. Am.* **A20**, 1755-1762(2003).
- (4) N. Nishi and K. Matsushima, and S. Nakahara, Rendering of specular surfaces in polygon-based computer-generated holograms, *Appl. Opt.* **50**, H245-H252(2011).
- (5) N. Nishi and K. Matsushima, Rendering of specular curved objects in polygon-based computer holography, *Appl. Opt.* **56**, F37-F44 (2017).
- (6) B. T. Phong, Illumination for computer generated pictures, *Commun. ACM* **18**, 311–317(1975).
- (7) N. Nishi and K. Matsushima, Rendering of transparent objects in large-scale polygon-based computer holography, *Digital Holography and 3-D Imaging 2022*, Cambridge(UK), Tu1A.4 (2022).