

全方向視差 CGH における Babinet の原理と部分光波伝搬を用いた隠面消去法

中村 将樹[†] 松島 恭治[†] 中原 住雄[‡]

[†] 関西大学 システム理工学部 電気電子情報工学科

[‡] 関西大学 システム理工学部 機械工学科

〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

E-mail: [†] nakamura@laser.ee.kansai-u.ac.jp

あらまし CGH において自然な再生像を得るためには隠面消去や光波遮蔽が不可欠である。しかし CGH の数値合成によく用いられる点光源法のような光線光学的手法では、全方向視差で光波遮蔽を行うことが難しい。一方、波動光学的手法を用いれば全方向視差でも比較的容易に隠面消去が行える。しかし、従来の波動光学的手法では遮蔽の回数だけ全光波の伝搬計算が必要であり、分割計算が必要な大規模な CGH では非常に長い計算時間が必要であった。そこで本研究では、シフトフレネル回折計算法を用いて部分光波伝搬計算を行い、Babinet の原理に基づいて、物体が存在する部分のみの部分光波をシルエット法により遮蔽する高速な隠面消去法を提案する。

キーワード 隠面消去, シルエット法, 全方向視差, シフトフレネル伝搬計算法

Hidden-Surface Removal Based on Babinet's Principle and Partial Wave Field Propagation in Full Parallax Computer-Generated Holograms

Masaki NAKAMURA[†] Kyoji MATSUSHIMA[†] Sumio NAKAHARA[‡]

[†] Department of Electrical and Electronic Engineering, Kansai University

[‡] Department of Mechanical Engineering, Kansai University

Yamate-cho 3-3-35, Suita, Osaka, 564-8680 Japan

E-mail: [†] nakamura@laser.ee.kansai-u.ac.jp

Abstract A novel method for hidden surface removal is proposed in full parallax CGHs. This method is an improvement of the conventional silhouette method and calculates the object field faster than the conventional method in cases of creation of large-scale CGHs. The conventional method requires the same number of operations of total field propagation with the number of objects, whereas this method shields light based on the Babinet's principle and partial field propagation and does not use total field propagation at all. Therefore, in creation of large-scale CGHs that needs segmented frame buffers, the proposed method calculates the object field of occluded scenes much faster than the conventional method.

Keyword Hidden-Surface Removal, Silhouette-Masking, Full Parallax, Shifted Fresnel Calculation Method

1. はじめに

計算機合成ホログラム (以下 CGH) における物体モデルからの光波の数値合成法には点光源法のような光線光学的手法やポリゴン法[1]のような波動光学的手法がある。光線光学的手法はその実装の容易さから最もよく用いられているが、全方向視差 CGH では光線遮蔽や隠面消去処理が困難なことが問題である。一方、波動光学的手法では全方向視差 CGH において比較的容易に光波遮蔽が行える。

波動光学的手法における最も手軽な隠面消去としては物体毎に行うシルエット法[2]がある。このタイプ

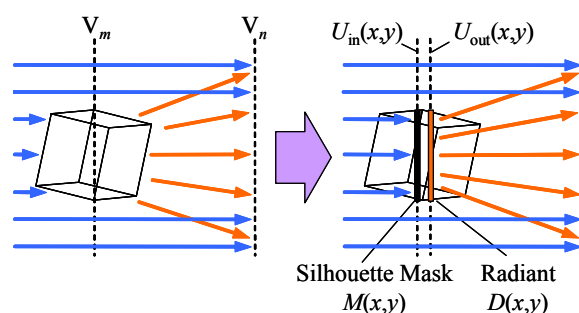


Fig.1 The theoretical model of the silhouette-masking

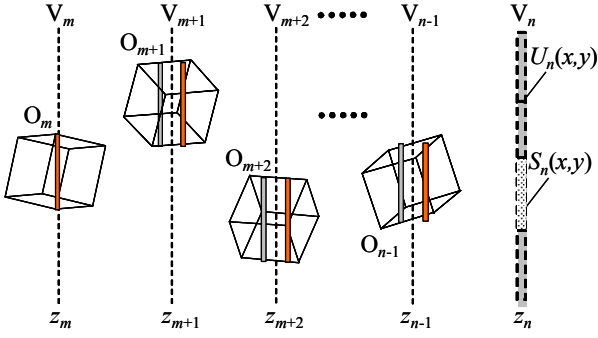


Fig.2 Light shielding in multiple objects by silhouette-masking.

のシルエット法は物体の背面より入射する光波を物体モデルのシルエットをマスクとして遮蔽する手法である。しかし大規模な CGH の作成時においては多量のメモリが必要となるため光波伝搬計算の分割計算が不可欠であるが、光波伝搬を分割計算すると非常に計算量が増えることがわかっている。このような CGH にシルエット法を用いた場合、物体空間の断面全体の光波を物体の個数だけ繰り返し伝搬計算する必要があるため、計算時間が長時間になる。そこで本研究では影伝搬法[3]と同様の Babinet の原理および分割伝搬計算[4]における部分光波伝搬を用いて、大規模な CGH において効率的にシルエット法を実行する手法を提案する。

2. 物体毎のシルエット法とその問題点

物体モデルに対するシルエット法の理論モデルを Fig.1 に示す。この理論モデルでは物体と交差しホログラムと平行な仮想平面上に背面より入射する光を遮蔽するマスク $M(x,y)$ 、さらにポリゴン自体の光波を仮想平面上で表した発光部 $D(x,y)$ があるものと考えている。仮想平面 V_m に入射する全光波分布を $U_{in}(x,y)$ とすると、 V_m から射出する全光波分布 $U_{out}(x,y)$ は

$$U_{out}(x,y) = U_{in}(x,y)M(x,y) + D(x,y) \quad (1)$$

と表せる。Fig.2 に示すように物体が多数ある場合、シルエット法を用いて遮蔽処理を施すには、(1)式の光波

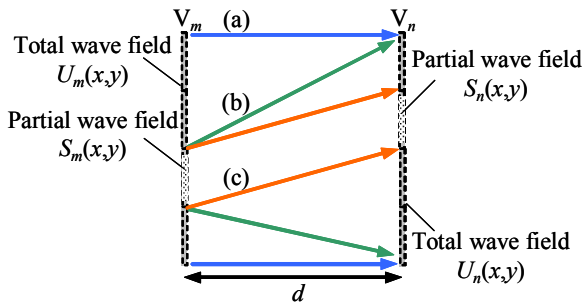


Fig.3 Three types of numerical propagation of a wave field.

を平面 V_{m+1} まで伝搬計算して物体 O_{m+1} について再び同じ処理を行ない、以下それをホログラム面まで繰り返す。そのため、シーンを構成する物体の個数と同じ回数の伝搬計算を用いる必要があり、分割伝搬計算では非常に大きな計算量が必要となる。

3. 回折伝搬計算の種類とその計算量

仮想平面 V_m 上の光波分布を距離 d 離れた V_n 上への伝搬計算を行うとき、Fig.3 に示す 3 種の回折伝搬を考える。(a)は V_m 上の全光波分布を距離 d 離れた V_n 上に伝搬計算し全光波分布 $U_n(x,y)$ を求める伝搬計算を表している。これは上で述べた従来法で用いられる伝搬計算である。また、(b)は V_m 上の部分光波分布 $S_m(x,y)$ を V_n 上に伝搬計算し V_n 上の全光波分布 $U_n(x,y)$ を求める伝搬計算を表しており、

$$U_n(x,y) = W_d \{S_m(x,y)\} \quad (2)$$

と表記する。一方(c)は部分光波分布 $S_m(x,y)$ から V_n 上の部分光波分布 $S_n(x,y)$ を求める伝搬計算を表し

$$S_n(x,y) = P_d \{S_m(x,y)\} \quad (3)$$

と表記することにする。本研究ではホログラムを $M \times M$ に分割した小領域単位で伝搬計算を行う。この小領域をセグメントと呼び、そのピクセル数は N^2/M^2 と表すことができる。またセグメント間の伝搬計算には近年提案されたシフトフレネル回折計算法[5]を用いている。

今 $N \times N$ ピクセルに標本化された光波分布が $M \times M$ セグメントに分割されているものとする。このとき伝搬計算(a)に必要な計算量 $C(N^2)$ は

$$C(N^2) = 3M^4 \text{FFT} \left(4 \frac{N^2}{M^2} \right) \quad (4)$$

と表せる。ここで $\text{FFT}(N^2)$ は $N \times N$ ピクセルに標本化された光波分布をフーリエ変換するために必要な計算量を表している。同様に伝搬計算(b)に必要な計算量 $C_w(N^2)$ は

$$C_w(N^2) = 3M^2 \text{FFT} \left(4 \frac{N^2}{M^2} \right) \quad (5)$$

と表すことができ、伝搬計算(c)に必要な計算量は

$$C_p(N^2) = 3 \text{FFT} \left(4 \frac{N^2}{M^2} \right) \quad (6)$$

と表すことができる。従って、分割数 M^2 が多い場合、従来法のように(a)を用いずに(b)や(c)だけで計算をすることができれば、飛躍的に計算時間が短縮できることになる。

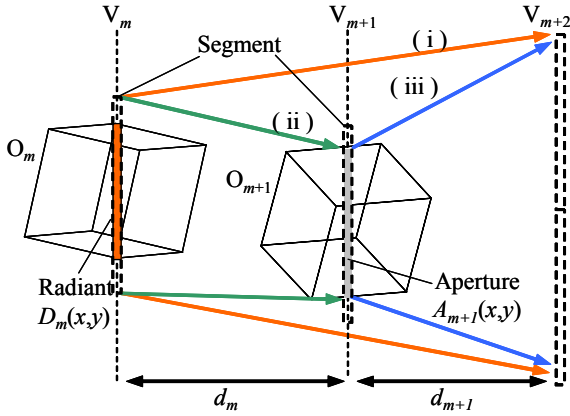


Fig.4 Light shielding in a single object by Babinet's principle.

4. Babinet の原理による単一物体の光波遮蔽

問題を簡単化するため、Fig.4 に示すようにまず物体が二つだけの場合を考え、仮想平面 V_m 、 V_{m+1} と交差するように物体モデル O_m 、 O_{m+1} が配置されており、 O_{m+1} が O_m の一部を遮蔽しているとする。このとき O_{m+1} に遮蔽され V_{m+2} に到達する O_m からの全光波分布を考える。

まず V_m 上に O_m の発光部 D_m を考え、(i) のように O_{m+1} による遮蔽を一切考えずに D_m を V_{m+2} に伝搬計算する。この全光波分布は $W_{d_m+d_{m+1}}\{D_m(x,y)\}$ と表せる。次に V_{m+1} 上の一つのセグメントに開口関数 $A_{m+1}(x,y)$ を考える。これはシルエット法におけるマスクを反転したものである。この開口を通過する光波は D_m から伝搬する部分光波分布 $s_{m,m+1}(x,y)$ を用いて $A_{m+1}(x,y)s_{m,m+1}(x,y)$ と求まる。これが(ii)に示される過程となる。最後に(ii)で求めた部分光波分布を V_{m+2} 全体に伝搬計算し減算することで、 O_{m+1} に遮蔽され V_{m+2} に到達する O_m からの全光波分布 $u_{m,m+2}(x,y)$ が求まる。これが(iii)に示される過程であり、 $u_{m,m+2}(x,y)$ は

$$u_{m,m+2}(x,y) = W_{d_m+d_{m+1}}\{D_m(x,y)\} - W_{d_{m+1}}\{A_{m+1}(x,y)s_{m,m+1}(x,y)\} \quad (7)$$

と表すことができる。

5. Babinet の原理による複数物体からの光波数値合成と漸化式

仮想平面 $V_m \cdots V_{n-1}$ に物体モデル $O_m \cdots O_{n-1}$ が Fig.2 のように配置されているとき、 V_n に入射する全物体モデルからの光波について考える。各物体モデルについて発光部 $D_m \cdots D_{n-1}$ 、開口 $A_{m+1} \cdots A_{n-1}$ がそれぞれあると仮定する。このとき、全ての物体モデルから V_n に入射する全光波分布を $U_n(x,y) = \sum_{i=0}^{n-1} u_{i,n}(x,y)$ 、部分光波分布を

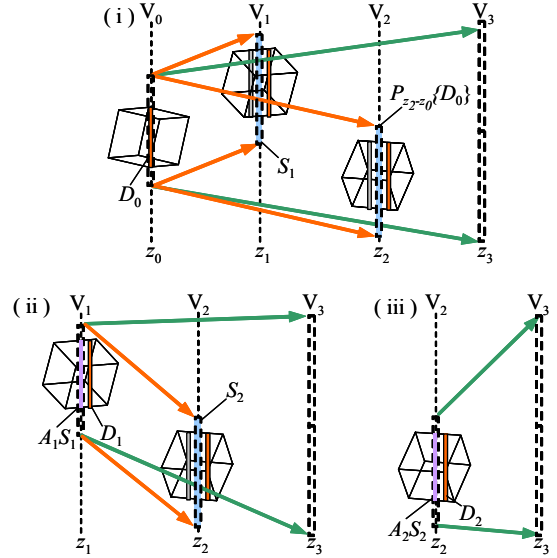


Fig.5 An example of the procedure for the proposed method.

$S_n(x,y) = \sum_{i=0}^{n-1} s_{i,n}(x,y)$ とすると、これらの光波分布は Babinet の原理より以下の連立漸化式で表される [6].

$$U_n(x,y) = \sum_{i=0}^{n-1} W_{z_n-z_i}\{D_i(x,y) - A_i(x,y)S_i(x,y)\} \quad (8)$$

$$S_n(x,y) = \sum_{i=0}^{n-1} P_{z_n-z_i}\{D_i(x,y) - A_i(x,y)S_i(x,y)\} \quad (9)$$

6. Babinet の原理を用いた隠面消去の手順

計算例として Fig.5 に示すように、仮想平面 $V_{0,1,2}$ に物体モデル $O_{0,1,2}$ が配置されているとき、 V_3 に入射する全物体モデルからの全光波分布を求める手順を Fig.5 に示す。この手順は(8)、(9)式に基づいて Table.1 のようにまとめることができる。

具体的な処理では、まず(i)に示すように D_0 に関する伝搬計算を行う。すなわち A_1 を含むセグメントに入射する部分光波分布 $S_1(x,y)$ と、 O_1 に遮蔽されずに A_2 を含むセグメントに入射する $P_{z_2-z_0}\{D_0(x,y)\}$ 、さらに D_0 が全く遮蔽されずに V_3 に伝搬したときの全光波分布 $W_{z_3-z_0}\{D_0(x,y)\}$ を求める。

Table. 1 Sequence of calculation.

		Source plane			
		V_0	V_1	V_2	Total
Destination plane	V_0				S_0
	V_1	$P_{z_1-z_0}\{D_0\}$			S_1
	V_2	$P_{z_2-z_0}\{D_0\}$	$P_{z_2-z_1}\{D_1 - A_1S_1\}$		S_2
	V_3	$W_{z_3-z_0}\{D_0\}$	$W_{z_3-z_1}\{D_1 - A_1S_1\}$	$W_{z_3-z_2}\{D_2 - A_2S_2\}$	U_3

— : Dependency

次に(ii)に示すように D_1 に関する伝搬計算を行う。すなわち遮蔽光波 $D_1(x,y)-A_1(x,y)S_1(x,y)$ の A_2 を含むセグメントへの部分光波伝搬から S_2 を、また V_3 への全光波伝搬から $W_{z_3-z_1}\{D_1(x,y)-A_1(x,y)S_1(x,y)\}$ を求める。

最後に $D_2(x,y)-A_2(x,y)S_2(x,y)$ を V_3 へ伝搬したときの全光波分布を求めることにより、全ての物体モデルから遮蔽を受けて V_3 に入射する全光波分布 $U_3(x,y)$ を得ることができる。

以上より、本手法を用いた場合は Fig.3 の伝搬計算 (a)を用いることなく、伝搬計算(b), (c)のみを用いて遮蔽処理を施せることがわかる。従って分割フレームバッファを用いて光波数値合成を行う場合、本手法は従来のシルエット法を用いた場合に比べ、計算量を減少することができる。

7. ホログラムの作製

本手法を検証するために、Fig.6 に示す物体配置のホログラムの計算を試みた。想定したホログラムはピクセル数 $32,768 \times 32,768$ 、ピクセルピッチ $1.0\mu\text{m} \times 1.0\mu\text{m}$ の物である。計算は AMD Opteron 850 (2.4GHz) プロセッサとメインメモリ 16[GB] を搭載した計算機によりコア数 4 で行った。この計算機でこの規模のホログラムを計算するには、分割フレームバッファにより分割伝搬計算を行う必要があり、ここでは 4×4 セグメントに分割して計算を行った。その結果、約 6 時間 30 分の計算時間が必要であることがわかった。また、同じホログラムを従来のシルエット法で 4×4 セグメントに分割して計算した場合、約 28 時間の計算時間が必要であることがわかった。

計算したホログラムをシミュレータにより再生したシミュレーション再生像を Fig.7 に示す。(a)は正面から、(b)は左方向から、(c)は右方向から観察したときの再生像である。この結果より、本手法により正しく遮蔽処理が施され、相互オクルージョンが生じていることを確認することができる。

8. まとめ

本研究では、分割フレームバッファを必要とする大規模な CGH においてシルエット法による光波遮蔽計算の計算時間を短縮する手法を提案した。従来のシルエット法では光波全体の分割伝搬計算するため伝搬計算に長時間を要するが、本手法では Babinet の原理と部分光波伝搬を用いることで光波全体の伝搬計算を避けることができ、シルエット法の計算時間を削減できる。1G ピクセル規模の CGH で測定した結果、概ね 4 倍程度の速度向上が確認できた。また、計算した CGH では従来法と同様の光波遮蔽効果があることを確認した。

本研究は日本学術振興会の科研費(21500114)の助成を受けたものである。

文 献

- [1] K. Matsushima: "Computer-generated holograms for three-dimensional surface objects with shade and texture," Appl. Opt. 44, pp.4607-4614(2005)
- [2] 近藤暁靖, 松島恭治: "全方向視差 CGH における波動光学的手法による隠面消去", 信学論 D-II, **J87-D-II**, pp.1487-1494(2004)
- [3] 坂本雄二: "影伝搬法を用いた計算機合成ホログラムの隠面消去法", 信学論 D-II, **J85-D-II**, pp.1832-1839(2002)
- [4] 松島恭治, 中原住雄: "ポリゴン法による大規模な全方向視差 CGH 作成のための分割計算手法", 3次元画像コンファレンス 2009 講演論文集, pp.61-64(2009)
- [5] R. P. Muffoletto, J. M. Tyler, and J. E. Tohline: "Shifted Fresnel diffraction for computational holography", Opt. Express **15**, pp.5631-5640(2007)
- [6] 中村将樹, 松島恭治: "全方向視差 CGH における Babinet の原理を用いた分割隠面消去法", 3次元画像コンファレンス 2009 講演論文集, pp.109-112(2009)

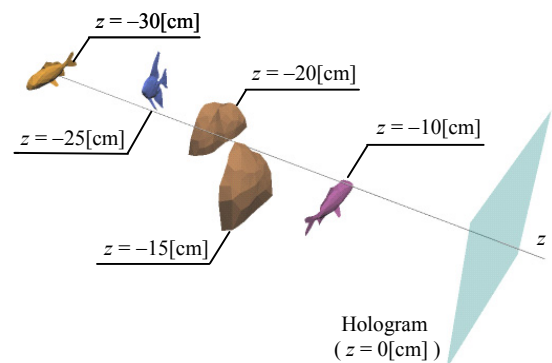


Fig.6 The 3D scene used for measurement of computation time.

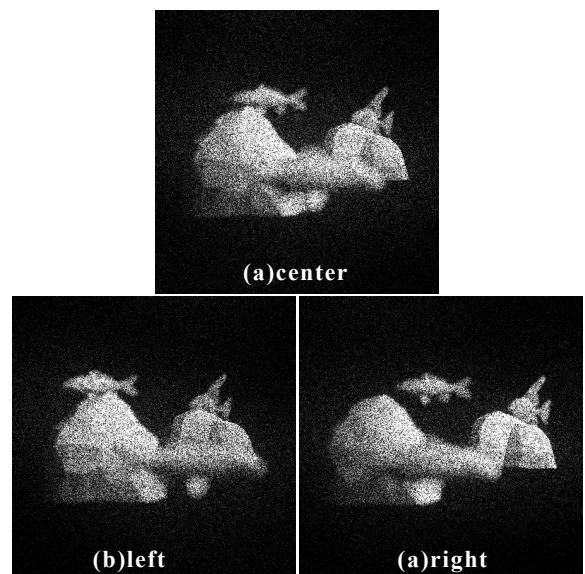


Fig.7 Simulated reconstruction of the CGH in some view-points.