

論文内容の要旨

Fast Calculation of Optical Effects from Water

(水による光学的効果の高速計算法)

岩崎 慶

(複雑理工学専攻 複雑計算科学研究室)

1 概要

コンピュータグラフィックスの分野において、自然現象の可視化は重要な課題の一つである。様々な自然現象の中でも、水面および水中景観の可視化は景観シミュレーション、バーチャルリアリティ、映画等の様々な分野へ応用されており有用な研究である。水面および水中を可視化するためには、光の散乱や屈折といった水による光学的効果を考慮して水面および水中の輝度分布を計算する必要があるが、この計算は複雑で計算コストが高いことが知られている。近年、ディスプレイへの描画を専門に行うグラフィックスハードウェア(以下 GPU とする)の高性能化が急激に進んでおり、GPU を利用した可視化の高速化の研究が盛んに行われている。そこで、本論文では GPU を利用して、水による光学的効果を高速に計算する手法を提案する。

2 はじめに

本論文では、海面の色、光跡およびコースティクス(水面波で集光された光の模様)の効率的な計算手法を提案する。3節において海面の色の計算法について述べる[1]。海面の色を計算する上で重要な要素の一つである散乱光について従来法では1次散乱までしか考慮していなかったが[2]、本論文では2次散乱光まで考慮する。さらに、水深の違いによる海面の色の変化も重要であると考え、水深の違いを考慮した海面の色の計算法を提案する。4節では、視点が水中にある際の水中の光跡およびコースティクスの計算法について述べる[3, 4]。従来光跡やコースティクスの計算には分単位の時間がかかっていたが[5, 6]、提案法により数秒で計算することが可能となった。5節では視点が水面上にある際の、水中物体にできる屈折光によるコースティクス、水面上の物体にできる反射光によるコースティクスおよび水面への映りこみの計算法について述べる[7]。提案法により、従来では成し得なかったコースティクスのリアルタイム表示が可能となった。

3 海面の色

本論文では、海面から視点に到達する光として、太陽光および天空光の水面での反射光、水中での散乱光および水底で反射した光を考慮する。散乱光については1次および2次散乱を考慮する。本稿では特に2次散乱の高速計算法について述べる。

3.1 2次散乱光の計算

水中の点 P_k (深さ z_k) での視点方向への2次散乱光の輝度 $L^{(2)}(z_k, \lambda)$ は次のような式で計算される(図1)。

$$L^{(2)}(z_k, \lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \beta(\alpha', \lambda) G(z_k) L^{(1)}(z_k, \theta, \phi, \lambda) \sin \alpha' d\theta d\phi \approx G(z_k) \sum_{m=1}^{n_d} \beta(\alpha'(\theta_m, \phi_m), \lambda) L^{(1)}(z_k, \theta_m, \phi_m, \lambda) \sin \alpha'(\theta_m, \phi_m) \Delta\theta \Delta\phi, \quad (1)$$

ここで、 $G(z_k)$ は点 P_k から水面までの減衰率であり、 $\exp(-c(\lambda)z_k \sec \theta_{ji})$ で表現される。 λ は波長、 $c(\lambda)$ は水中の光の減衰係数、 $L^{(1)}(z_k, \theta, \phi, \lambda)$ は P_k に (θ, ϕ) 方向から入射してくる1次散乱光の累積輝度、 $\beta(\alpha, \lambda)$ は体積散乱関数とする。方向についての積分を n_d 方向に離散化して計算するものとする。

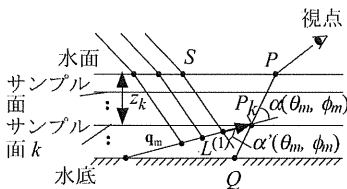


図1: サンプル面

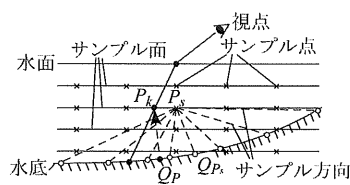


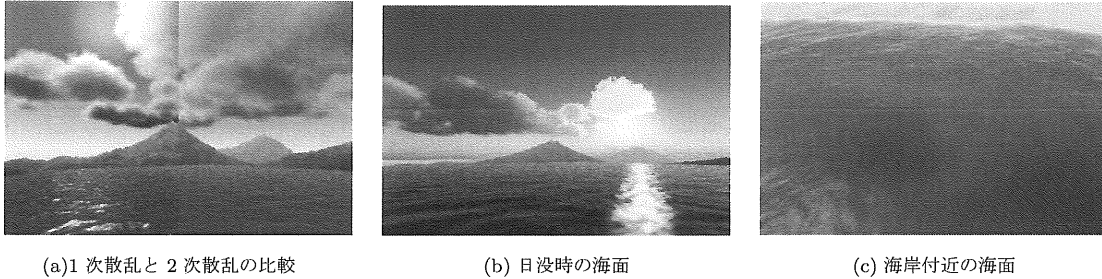
図2: 水深が一定でない場合

提案法では、式(1)を計算するために、水中に仮想平面(サンプル面)を設定し、視線とサンプル面との交点にサンプル点を設定する。サンプル面上の輝度分布を散乱マップと呼ばれるテクスチャとして保存する。散乱マップは、各サンプル点から視点へ向かう2次散乱光の輝度を保持している。散乱マップを計算するために、3つのマップ(輝度マップ、体積散乱関数マップ、減衰マップ)を用意する。輝度マップは式(1)の $L^{(1)}(z_k, \theta, \phi, \lambda)$ を保持したマップ、体積散乱関数マッ

プは式(1)の $\beta(\alpha, \lambda)$ を保持したマップ、減衰マップは $G(z_k)$ を保持したマップとする。散乱マップは、 n_d 方向ごとの輝度マップと体積散乱関数マップを掛け合わせたものをアキュムレーションバッファ(画像を累積するバッファ)に累積し、累積した結果に減衰マップを掛け合わせるによって計算される。マップ同士の掛け合わせはハードウェアのブレンディング機能を利用する。

水底の深さが一定でない場合は次のように計算する。点 P_k に (θ, ϕ) 方向から到達する 1 次散乱光の輝度の合計は、 Q_P から P_k まで 1 次散乱光を積分した輝度となる (図 2)。そのため、水底と各サンプル方向との交点 Q_P を計算する必要がある。提案法では、距離 $P_k Q_P$ をあらかじめ計算してテーブル化することによって輝度マップの計算を効率的に行った。

3.2 適用例



提案法によって生成された適用例を図 3 に示す。計算時間は、CPU が PentiumIII 1GHz で Wildcat 4110 を搭載したデスクトップマシンで図 3(a)(b) は約 0.5 秒、図 3(c) は 2 秒要した。2 次散乱光を考慮することにより、より青みがあった海面の色を計算する

図 3: 適用例:海面の描画結果

ことができた。図 3(c) は、水深の違いによる海面の色の差を見ることができる。提案法では、前処理としてテーブルを作成し、サンプル面における輝度を画像 (散乱マップ) として処理することによってハードウェアによって効率的に海面の色を計算した。

4 水中の光学的効果

4.1 光跡

水中の視点 P_v に到達する光跡の輝度 $L_v(\lambda)$ は次のような散乱光の積分 $L_v(\lambda) = \int_0^L L_P(\lambda) \exp(-c(\lambda)l) dl$ で計算される (図 4)。ここで、 L は視点から水面までの距離、 L_P は視線上の点 P における散乱光の輝度とする。提案法では、次のようにして光跡の輝度を計算する。まず、水面を図 5 のように格子分割し、三角形メッシュで表現する。各格子点における入射光 (平行光線と仮定する) の屈折ベクトルを掃引して illumination volume を作成する (図 5)。視点に到達する散乱光の輝度 $L_v(\lambda)$ は、各 illumination volume を通過する散乱光の輝度の和 $\sum_{i=0}^n L_{P_i}(\lambda) \exp(-c(\lambda)l_i) d_i$ で計算される。ここで、 n は視線と交差する illumination volume の数、 L_{P_i} は i 番目の illumination volume と視線との交差部分の平均輝度、 d_i は illumination volume と視線との交差する線分の長さ、 l_i は illumination volume から視点までの距離とする (図 6)。光跡は、illumination volume の表の面 (視点から可視な面) を、視点に到達する散乱光の輝度で描画し、累積することによって可視化される。しかしながらこの計算は各 illumination volume と視線との交差部分を計算する必要があり、計算コストが高い。そこで、提案法では次のようにして高速に輝度計算を行う。

illumination volume を輝度が線形に変化する程度の大きさの sub-volume に分割し、sub-volume をさらに四面体に分割する。各視線ごとに illumination volume を通過する散乱光の輝度を計算する代わりに、四面体の各頂点を通過する散乱光の輝度を計算し、それ以外の部分については補間する。輝度の補間および散乱光の累積はハードウェアの機能を利用する。

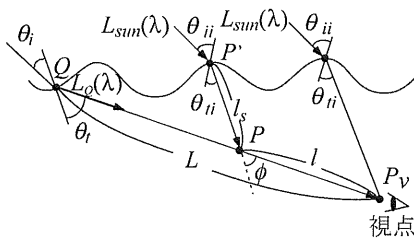


図 4: 視点に到達する光跡の輝度

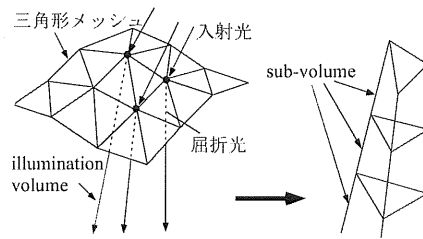


図 5: illumination volume と sub-volume

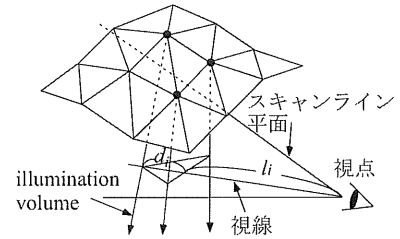


図 6: illumination volume における散乱光

4.2 コースティクス

水中の物体表面上にできるコースティクスは、illumination volume と物体表面との交差部分を計算し、交差部分に到達する光の輝度で描画、累積することで可視化される。提案法では illumination volume をある間隔ごとのスキャンライン平面 (サンプル面と呼ぶ) で切断した sub-volume を利用して次のように交差部分および輝度を計算する (図 7(a))。提案法を理解しやすくするため、スキャンライン平面上での交差部分の検出操作を説明する。

1. フレームバッファ (ディスプレイに表示されるイメージを格納するメモリ) およびステンシルバッファ (ピクセルごとに値を保持し、その値によってピクセルごとにフレームバッファへの書き込みを禁止・許可することができるバッファ) を初期化し、Z バッファ (視

- 点からの奥行き値を保持するバッファ)に物体の奥行き値を書き込む(図7(b)).
- sub-volume の裏の面(視点から不可視の面)を描画し(ただし、フレームバッファには描画しない)、物体の奥行き値よりも大きい部分に対応するステンシルバッファのピクセルに1をセットする(図7(c)). このとき、Zバッファの更新は行わない。
 - sub-volume の表の面を描画する。このとき、ステンシルバッファが1で物体の奥行き値よりも小さい部分のみフレームバッファに描画し、輝度を累積する(図7(d)). さらに、描画の際ステンシルバッファの値を0に戻す。

交差部分の輝度は、sub-volume の各頂点での輝度を計算し、補間することでコースティクスを計算する。

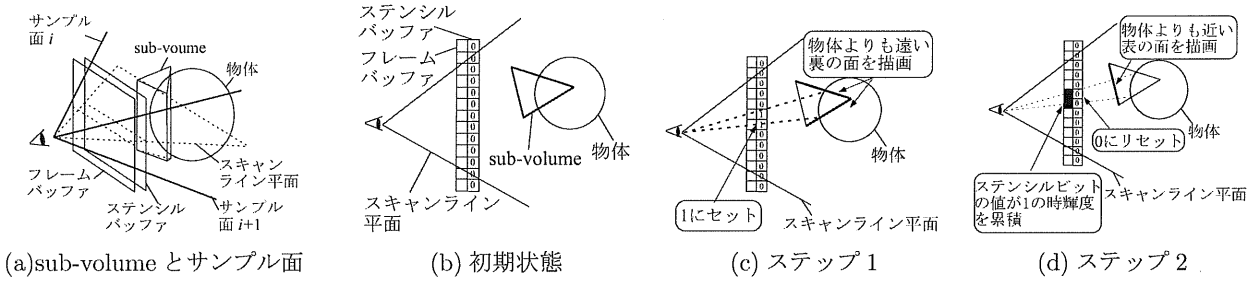


図 7: コースティクスの計算

4.3 適用例

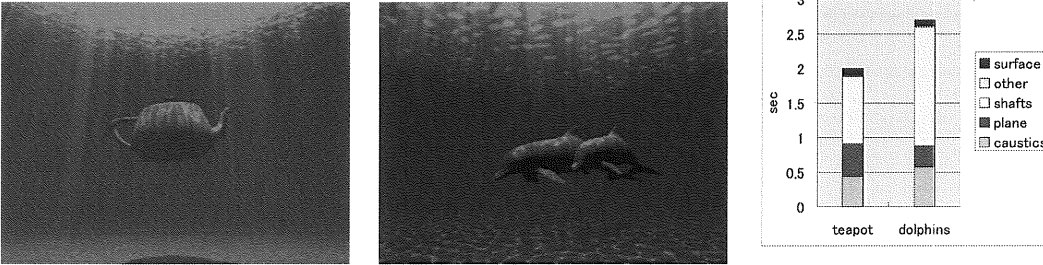


図 8: 適用例:光跡およびコースティクスの描画結果と計算時間

に表示することができる。従来法ではスキャンライン単位で散乱光の輝度を計算していた代わりに、輝度が線形に変化する程度の大きさの sub-volume に分割することにより、散乱光の輝度計算を補間することによって高速に光跡の輝度を計算した。

5 水面波によるコースティクス

5.1 屈折光によるコースティクス

視点が水面上にある場合の水中のコースティクスの可視化は、(1) 物体表面上の輝度分布の計算と (2) 水面での屈折を考慮した可視化、の 2つのプロセスからなる。提案法では次のようにしてこれらのプロセスを効率的に処理する。物体表面を、サンプル面(図9(a))で切断してできる画像で表現する。この画像を sliced object image と呼ぶ(図10)。Sliced object image は、物体表面のうち隣り合うサンプル面にはさまれる部分を、サンプル面に投影することによって生成する。物体と illumination volume との交差部分(図9(b)の S_p)をサンプル面と illumination volume との交差三角形(図9(c)の S')で近似する。物体表面のコースティクスの輝度値をサンプル面での輝度値で近似し、sliced object image として保存する。

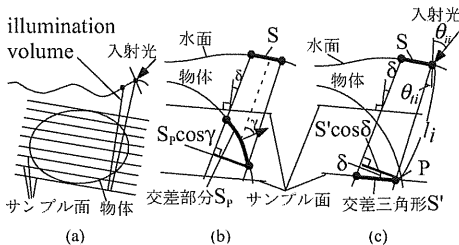


図 9: サンプル面と illumination volume

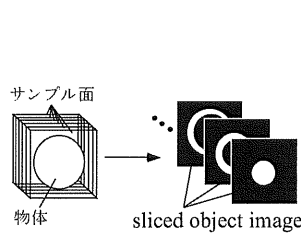


図 10: sliced object images

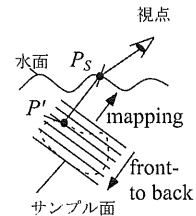


図 11: sliced object image のリフレクションマッピング

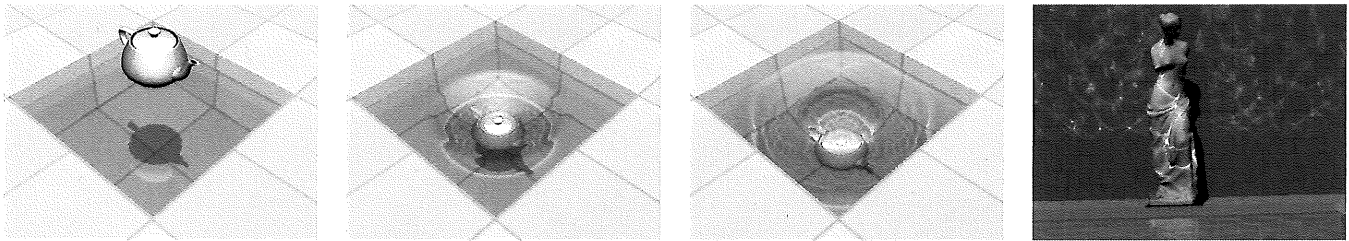
水面での視線の屈折を考慮して物体を可視化するために sliced object image のリフレクションマッピング(屈折して見えるシーンを

テクスチャとして保存しておき、視線の屈折方向によりテクスチャをマッピングさせることで屈折を表現する技術)を行う。水面上の各格子点 P_S における屈折した視線とサンプル面との交点 P を計算し、交点 P が格子点 P_S に対応するように sliced object image をマッピングする (図 11)。物体表面と屈折した視線との交点計算をサンプル面と視線との交点計算で置き換えるため計算時間を削減することができる。

5.2 反射光によるコースティクスと水面への映りこみ

水面での反射した光によるコースティクスの可視化は、4.2 節で説明した方法を使用する。水面付近の物体の映りこみには sliced object image を使用する。水面に映りこむ物体を sliced object image で表現し、水面にリフレクションマッピング (光の反射を表現する手法) することで水面への映りこみを描画する。

5.3 適用例



(a) ティーポットアニメーション

(b) ビーナス像

図 12: 適用例:水面波によるコースティクスと映りこみの描画結果

提案法による描画結果を図 12 に示す。図 12(a) は、水中に落としたティーポットによってできるコースティクスのアニメーション画像の一部である。図 12(b) はビーナス像にできるコースティクスおよびビーナス像の水面への映りこみを表示した適用例である。計算時間は、CPU が Pentium4 2.8GHz で Quadro4 900XGL を搭載したマシン上でそれぞれ 0.13 秒、0.23 秒である。提案法は、物体と illumination volume との交差部分の計算および水面で屈折した視線と物体との交点計算を、sliced object image を使用することによって高速に計算することができ、コースティクスのリアルタイム表示を可能とした。

6 まとめ

水による光学的効果として海面の色、水中の光跡およびコースティクスの高速計算法を提案した。

- ・ 散乱マップを利用することで効率的に散乱光の高速計算法を提案した。アキュムレーションバッファやテクスチャマッピングといったハードウェアの機能を効率的に利用することで高速に海面の色を計算した。さらに、水深の違いを考慮した海面の計算法を提案した。
- ・ sub-volume による水中の光跡の高速計算法を提案した。sub-volume と物体との交差部分を Z バッファとステンシルバッファによって高速に検出することによりコースティクスの効率的な表示法を提案した。さらに、光跡・コースティクスの影をシャドウマップ法を使用して計算した。
- ・ 水面での視線の屈折を考慮した水中物体のコースティクスの高速計算法を提案した。物体表面の輝度計算および屈折した視線と物体との交点計算を、sliced object image を使用して高速に計算することで、コースティクスのリアルタイム表示を可能にした。さらに、水面での反射光によるコースティクスおよび水面への物体の映りこみの高速計算法についても提案した。

参考文献

- [1] K. Iwasaki, Y. Dobashi, T. Nishita, "A Volume Rendering Approach for Sea Surfaces Taking into Account Second Order Scattering Using Scattering Maps," *Volume Graphics 2003*, pp.129-136.
- [2] K. Kaneda, G. Yuan, Y. Tomoda, M. Baba, E. Nakamae, T. Nishita, "Realistic Visual Simulation of Water Surfaces Taking into Account Radiative Transfer," *Proc. CAD/Graphics'91*, pp.25-30.
- [3] K. Iwasaki, Y. Dobashi, T. Nishita, "Efficient Rendering of Optical Effects within Water Using Graphics Hardware," *Proc. Pacific Graphics 2001*, pp.374-383.
- [4] K. Iwasaki, Y. Dobashi, T. Nishita, "An Efficient Method for Rendering Underwater Optical Effects Using Graphics Hardware," *Computer Graphics Forum*, Vol.21, No.4, pp.701-711.
- [5] T. Nishita, E. Nakamae, "Method of Displaying Optical Effects within Water using Accumulation-Buffer," *Proc. SIGGRAPH'94*, pp.373-380.
- [6] H. W. Jensen, P. H. Christensen, "Efficient Simulation of Light Transport in Scenes with Participating Media using Photon Maps," *Proc. SIGGRAPH'98*, pp.311-320.
- [7] K. Iwasaki, Y. Dobashi, T. Nishita, "A Fast Rendering Method for Refractive and Reflective Caustics Due to Water Surfaces," *Computer Graphics Forum*, Vol.22, No.3, pp.601-609.