

分散並列処理による ポリゴン法超高解像度 CGH 生成の高速化と大規模化

小川 晃平[†] 東 健太郎[†] 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: ogawa@laser.ee.kansai-u.ac.jp, matsu@kansai-u.ac.jp

あらまし ポリゴン法を用いることでギガピクセル規模の超高解像度 CGH を比較的短い時間で計算できるようになってきている。しかし、自己オクルージョンを多数含む物体モデルに対して適切な隠面除去を施す場合には計算量が増大し、計算が長時間化し大規模化が困難になる問題が生じる。そこで、隠面除去を含む物体光波合成処理を分散並列処理することで超高解像度 CGH の計算時間の短縮と大規模化を試みた。

キーワード CGH, 自己オクルージョン, 隠面除去, ポリゴン法, シルエット法, 分散処理

Speedup and scale-up of creation of polygon-based high-definition CGH by using parallel distributed processing

Kohei OGAWA[†] Kentaro HIGASHI[†] Kyoji MATSUSHIMA[†] Sumio NAKAHARA[‡]

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

[‡] Department of Mechanical Engineering, Kansai University

E-mail: ogawa@laser.ee.kansai-u.ac.jp, matsu@kansai-u.ac.jp

Abstract Polygon-based methods accelerate computation of high-definition computer-generated holograms (CGH). However, the computation time is still very long in the cases where the object model has severe self-occlusion, because processing of hidden surface is necessary for computing the object field. In this report, a novel technique using distributed processing is proposed to speed up and scale-up the computation of high-definition CGHs of self-occluded objects employing the polygon-based method and the silhouette method.

Keyword CGH, self-occlusion, hidden surface removal, polygon method, silhouette method, distributed processing

1. はじめに

近年、3D ディスプレイが家庭向けにも販売され始め、3次元立体画像への注目が集まってきている。しかし、これらが再生する立体像は、人間が立体感を感じる要因である両眼視差や輻輳、焦点調節を完全に満たすものではない。そのため、長時間の使用では強い疲労感が生じてしまう。一方、ホログラフィは光の波面を記録・再生する技術であるため、それらの要因をすべて満たし、究極の立体画像と呼ばれる。

干渉縞パターンを数値合成する計算機合成ホログラム（以下、CGH）には実在しない仮想物体のホログラムが作成可能という大きな利点がある。CGHにおいて仮想物体の光波を求める主な手法としては点光源法とポリゴン法[1]があるが、我々は主にポリゴン法を用いて干渉縞パターンの数値合成を行っている。その理

由の一つは、強い立体感を得るためには隠面除去が重要であるが、ポリゴン法は波動光学的手法であるシルエット法[2]とマッチングがよく、比較的容易に全方向視差 CGH の隠面除去が行えるためである。シルエット法では、ポリゴン単位[2]または物体単位[3]に光波遮蔽を行うが、前者では物体空間断面全体の伝搬計算がポリゴン数と同じ回数だけ必要になるため、超高解像度 CGH への適用は困難であった。そこで我々は、パビネの原理に基づき部分光波の伝搬のみでシルエット法を高速に処理する方法を提案している[4]。しかし、この手法には部分光波伝搬回数がポリゴン数の二乗に比例する問題点があった。そこでこの手法をさらに発展させ、伝搬回数がポリゴン数に比例するスイッチバックによる高速シルエット法(以下スイッチバック法)を提案している[5]。

しかしながら、スイッチバック法では必ず 3D シーンの奥のポリゴンから順に計算を進める必要があり、並列処理が困難であるという問題点がある。一方、超高解像度 CGH 計算におけるメモリ問題への対処方法として、光波面をセグメント分割して並列処理する手法を我々はすでに提案している[3]。これを用いると、超高解像度 CGH のネットワーク分散処理も可能である[6]。このセグメント分割手法はスイッチバック法と併用が可能であり、本来並列処理ができないスイッチバック法の並列処理が可能になる。本研究では、これによりポリゴン単位での隠面消去を並列に処理することができ、計算の高速化につながると考えた。また、複数台の計算機を用いた分散並列処理によって、CGH のさらなる大規模化も可能になると考えた。

本研究では、搭載メモリ量と CGH の規模に関連して、超高解像度 CGH の計算においてセグメント分割が必須である場合と必須でない場合のそれぞれについて、セグメント分割を用いたスイッチバック法の分散並列処理を行い、その効果を検証した。

2. スイッチバック法

元来のシルエット法は、物体空間の後方から順に伝搬計算を行い、遮蔽物のシルエットをマスクとして光波を遮蔽する手法である。しかし、超高解像度 CGH においてポリゴン単位に隠面消去を施すためにはポリゴンの数だけ物体空間断面全体の伝搬計算を行う必要があり、計算が長時間化してしまう。そこで、物体全体のシルエットをマスクとして遮蔽を行う物体単位のシルエット法で隠面処理を施していた。しかしこの方法では、物体が自己オクルージョンを含む場合には、適切な隠面消去を施すことができない。そこでポリゴン単位にシルエット法を用いた場合にも、実用的な時間内に計算が可能となる計算手法としてスイッチバック法を提案している。この手法は、ポリゴンのシエ

ットを反転した開口を用い、奥にあるポリゴンから順にポリゴン平面-物体平面間の伝搬計算を繰り返すことで隠面消去を施している。ポリゴンの数を N とすると、スイッチバック法では、伝搬計算の回数は $2N-1$ 回となるが、開口周辺の部分光波の伝搬のみで計算ができるため、高速に処理ができる。反面、必ず奥のポリゴンから処理をする必要があり、スイッチバック法のアルゴリズムの範囲内では並列化は困難である。

3. セグメント分割を用いたスイッチバック法の分散並列処理

3.1. 並列化の原理

スイッチバック法では計算の並列性が極めて低いため並列計算が難しい。そこで、本来はメモリ問題への対処方法として使われているセグメント分割したフレームバッファを用いて隠面消去を行う。Fig. 1 にその原理を示す。ここでは、光波がセグメント S_1 と S_2 に分割され、それぞれの分割フレームバッファで処理されるものとする。ポリゴン P_a, P_b, P_c からの光波はセグメント S_1 のみに、またポリゴン P_d, P_e, P_f からの光波はセグメント S_2 のみに到達し、ポリゴン P_g からの光波は S_1 と S_2 の両方に到達する。各セグメントでは光波が到達するポリゴンのみを考えればよいので S_1 では P_a, P_b, P_c, P_g を、 S_2 では P_d, P_e, P_f, P_g を計算する。 S_1 と S_2 の計算は互いに独立なため並列に処理できる。しかし、 P_g のように複数のセグメントに光波が到達するポリゴンが多いと並列化の効果が小さくなってしまふ。

3.2. マルチスレッド並列処理

搭載メモリ量が多く 1 台の計算機で処理が可能な場合も、マルチ CPU・マルチコアでスレッド並列化が可能である。しかし、物体モデルの違いや、セグメント分割の方法によって一つのセグメントが担うポリゴン数にばらつきが生じ、各セグメントの計算時間が一定にならない。このばらつきを小さくするために、各セグメントを処理するスレッド数 T を

$$T = \left\lfloor C \times \frac{N}{N_{sum}} \right\rfloor$$

とした。ここで、 C は計算機のプロセッサコア数、 N は各セグメントが受け持つポリゴン数、 N_{sum} は重複を含んだ計算ポリゴン数の総和である。また記号 $\lfloor \cdot \rfloor$ は小数点以下の切り捨てを表す。

3.3. ネットワーク分散並列処理

メモリ搭載量が少ない場合、あるいは大型の CGH を計算する場合は、各セグメントを異なった計算機に割り当て、ネットワーク分散して並列処理することもできる。本研究では、メッセージパッシングインター

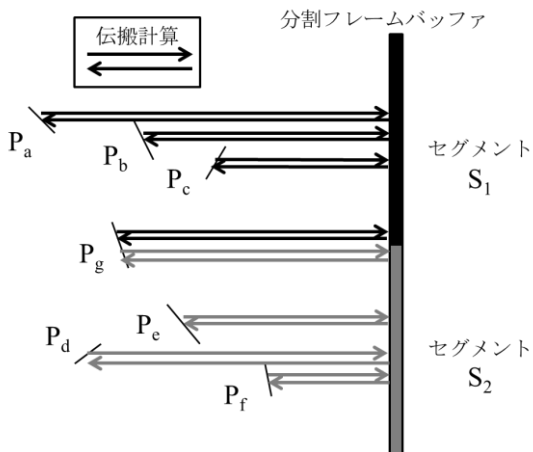


Fig. 1. セグメント分割による並列処理の原理

フェース (Message Passing Interface, 以下 MPI) ライブラリである MPICH2 を用いて計算の分散並列処理を行った。MPI による分散並列処理では各計算機はノードと呼ばれ、各ノードにはランクと呼ばれる固有の番号が割り当てられる。各ノードに割り当てられるランクに基づいて各ノードが処理するセグメントを決定するが、本研究では各ノードにサイクリックにセグメントを割り当てた。

3.4. 分散並列処理の手順

スイッチバック法で単体の物体は処理できるが、複数の物体がある場合、あるいは物体が大きい場合、物体の分割が望ましい場合は複数の物体平面を用いるため、物体空間断面全体の光波伝搬が必要となる。光波全体の分散伝搬計算を行うためには、まず伝搬元の全セグメントから伝搬先の 1 つのセグメントへの伝搬計算を行い、それらすべてを足し合わせることによってそのセグメントにおける光波が得られる。これを伝搬先の全セグメントで行うことによって伝搬先における全光波を得ることができる。

具体的には、各セグメントにおける処理はスイッチバック法による物体光波の計算となるので、各ノードは割り当てられたセグメントで物体光波の計算を行う。次に、ノード間でデータの送受信を行い、全ノードがそれぞれ分割フレームバッファ全体を保持する。そして、次の物体平面についてもノードにセグメントを割り当て、伝搬計算と物体光波の計算を行う。これを物体平面の数だけ繰り返し、最後にホログラム面についてもセグメントを割り当てて伝搬計算を行うことで、ホログラム面上の物体光波が求まり、干渉縞を計算することができる。

4. 分割が必須でない場合の並列処理の効果

ホログラムの規模に対して搭載メモリが十分であり、セグメント分割が必須でない場合にセグメント分割して並列化した場合の効果調べた。使用した計算

Table 1. 使用した計算機の性能

| CPU | メモリ | 総コア数 |
|-------------------------------|------|------|
| Intel Xeon E7330 (2.4GHz) × 4 | 88GB | 16 |

Table 2. 計算対象 CGH のパラメータ

| | |
|------------------|--------------------------------|
| ピクセル数 | 32,768 × 32,768 |
| ピクセルピッチ | 1.0 μm × 1.0 μm |
| 物体サイズ(w × h × d) | 30 × 26.6 × 22 mm ³ |
| 物体モデル名 | The Hands |
| ポリゴン数 | 861 |

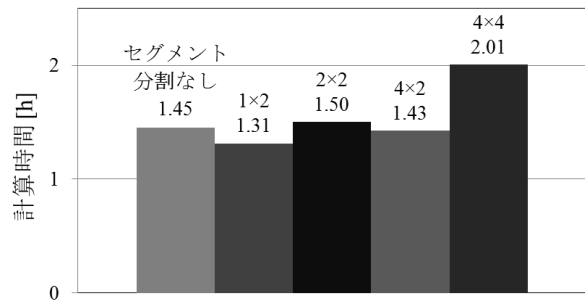


Fig. 2. 並列処理結果

機の性能を Table 1 に、計算対象の CGH のパラメータを Table 2 に示す。ここでは、物体の中心を横切るような物体平面上で物体光波が計算される時間を計算時間とした。セグメント分割せずにスレッド数 16 で FFT 等のみを並列化し、スイッチバック法を順次計算した場合の計算時間と、1x2, 2x2, 4x2, 4x4 にセグメント分割しスイッチバック法を並列処理した場合の計算時間を Fig. 2 に示す。セグメント分割により並列処理しなかった場合の計算時間は 1 時間 27 分であり、並列処理を行った場合は 1x2 にセグメント分割した時が最も短く 1 時間 19 分であった。また、4x4 にセグメント分割した場合の計算時間は 2 時間であり、セグメント分割による並列処理をしなかった場合よりも長い結果となった。この結果より、セグメント分割が必須でない場合にセグメント分割並列処理しても、ほとんど効果がなく、セグメント分割の方法によっては逆に計算時間が長くなることがわかった。これはセグメント間で重複するポリゴン数が多いためと考えられる。1x2 にセグメント分割した時、最も多くのポリゴンを計算したセグメントでは 628 個のポリゴンを計算しており、物体モデル自体のポリゴン数とそう大きく変わらないポリゴン数を処理している。

Table 3. 分散処理に用いたノードの性能

| ノード ランク | CPU | メモリ | コア 数 |
|------------|---------------------|------|---------|
| 0 | AMD Opteron 2.61GHz | 16GB | 4 |
| 1 | AMD Opteron 2.40GHz | 16GB | 4 |
| 2 | AMD Opteron 2.61GHz | 30GB | 4 |

Table 4. Mountain2 の 1/4 モデルのパラメータ

| | |
|------------------|------------------------------|
| ピクセル数 | 32,768 × 16,384 |
| ピクセルピッチ | 1.0 μm × 1.0 μm |
| 波長 | 632.8 nm |
| ポリゴン数 | 1894 |
| 物体サイズ(w × h × d) | 82 × 11 × 50 mm ³ |

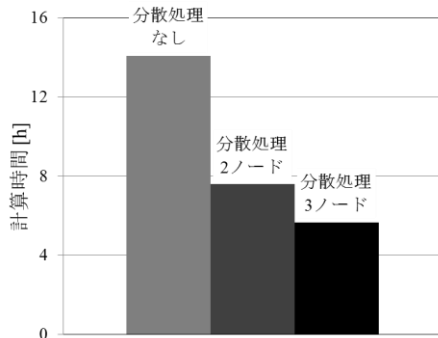


Fig. 3. 分散並列処理結果

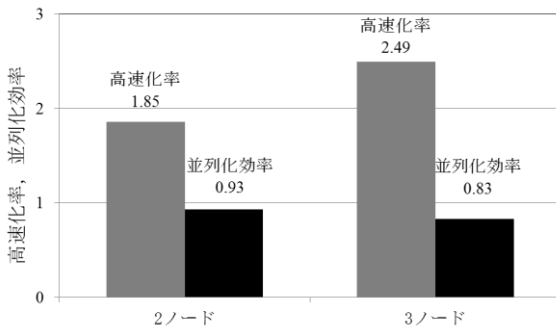


Fig. 4. 高速化率と並列化効率

5. 分割が必須である場合の並列処理の効果

大規模な CGH では元々セグメント分割が必須である。そのような CGH として Mountain2[6]の 1/4 モデルを使用して、並列処理の効果を確認した。使用したノードの性能を Table 3 に、CGH のパラメータを Table 4 に示す。ここでは、ホログラム面上に干渉縞が計算されるまでの時間を計算時間とし、計測した結果を Fig. 3 に示す。この結果より、分散処理を行わなかった場合には 14 時間かかった計算が 2 ノードで分散並列処理することにより 7.6 時間で、3 ノードでは 5.7 時間で計算することができることがわかった。

並列処理による効果を確認するために高速化率 $U_R = T_1 / T_R$ と並列化効率 $E_R = U_R / R$ による比較をおこなったのが Fig. 4 である。ここで T_R は R ノードで分散処理を行った場合の計算時間である。仮に、処理をすべて並列化でき、並列化の際のオーバーヘッドを無視出来る理想的な場合には $U_R = R$ となり、並列化効率 E_R は 1 となる。Fig. 4 の結果から、2 ノードでは $E_R = 0.93$ と比較的高い並列化効率を示すが、3 ノードでは $E_R = 0.83$ となり並列化効率が落ちることがわかった。

6. まとめ

4 節で並列処理した物体光波のシミュレーション再生像を Fig. 5 に示す。この様に、並列処理した場合にも同等の隠面消去効果が得られることを確認したが、セグメント分割が必須でないサイズの CGH の計算では、計算時間の短縮という点ではほとんど効果を得ることが出来なかった。しかし、搭載メモリ量の問題か

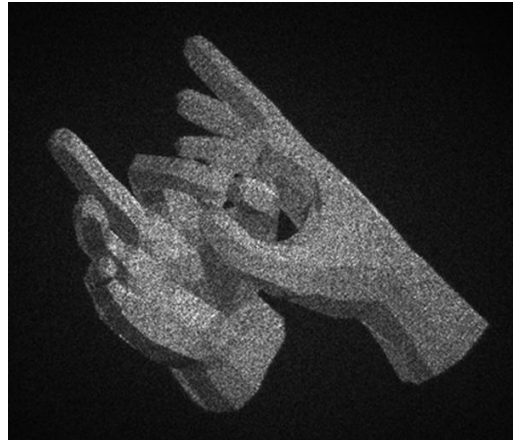


Fig. 5. 並列化処理した CGH のシミュレーション再生像

ら元々セグメント分割が必要な場合については、2 ノードを用いることで約 1.9 倍の速度で計算することができ、並列化効率も 0.9 を超え 1 に近い値となった。3 ノードで実行した場合にも 0.8 を超える並列化効率を得られるため、さらなるノード数の増加による計算時間の短縮が期待できる。

本研究は、日本学術支援振興会の科研費 (215001114)、および平成 23 年度関西大学学術研究助成基金(共同研究)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**, 4607-4614(2005).
- [2] 近藤, 松島: "シルエット近似を用いた全方向視差 CGH の隠面消去", *電子情報通信学会論文誌 D-II*, **J87-D-II**, 1487-1494 (2004).
- [3] K. Matsushima, S. Nakahara: "Extremely High-Definition Full-Parallax Computer-Generated Hologram Created by the Polygon-Based Method", *Appl. Opt.* **48**, H54-H63 (2009).
- [4] 中村, 松島, 中原: "スパースな 3D シーンを有する超高解像度 CGH における隠面消去の高速化", *3次元画像コンファレンス 2010 講演論文集*, 17-20 (2010).
- [5] 中村, 松島, 中原: "全方向視差 CGH におけるポリゴン単位の高速隠面消去法", *3次元画像コンファレンス 2011 講演論文集*, 66-69 (2011).
- [6] 東, 小川, 西, 松島, 中原: "山岳風景を再生する超高解像度 CGH の分散処理による合成", *3次元画像コンファレンス 2011 講演論文集*, 106-109 (2011).