

電子ホログラフィ方式の3次元映像技術における高速計算技術

西辻 崇 TAKASHI Nishitsuji

東京都立大学 システムデザイン学部 電子情報システム工学科

〒191-0065 東京都日野市旭が丘6-6

1. はじめに

電子ホログラフィ方式の3次元映像技術は、人間が立体を知覚する要件を完全に満たせる唯一の技術であることから、究極の3次元映像技術や映像技術の最終形とも称されている。しかし、実用化には多くの技術障壁があり、最も重要なものの1つが高速計算技術の開発である。

本研究では、高速計算アルゴリズムの開発と Graphic Processing Unit (GPU) と呼ばれる並列計算機への実装により、かかる課題の解決を図った。主たる成果は3次元像を線のみによる構成(ワイヤフレーム)に限定することで大幅な計算高速化に成功した手法の開発である。2019年より6編のQ1ジャーナルへの論文発表をはじめ、各種報道や招待講演依頼など、国内外で注目される成果を得た。

2. 電子ホログラフィ

人間は物体の反射光を両眼がとらえることにより立体として認識する。逆に言えば、反射光を再現できれば3次元映像が実現する。電子ホログラフィは光波を電子的に変調し、所望の反射光を再現することで3次元映像を作り出す技術である。競合する他方式が疑似的な3次元像の再現であり、それに起因した眼精疲労や違和感が生じるのに対し、電子ホログラフィは完全な反射光を再現できるため、人間にとって最も自然

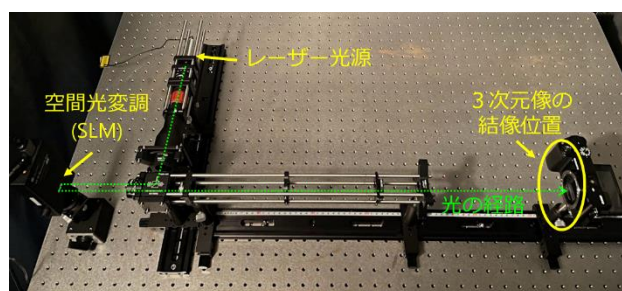


図1 3次元像の再生光学系

な3次元映像を再生可能な唯一の技術と呼ばれる。

図1に本研究で試作した3次元映像の再生系を示す。レーザー光源から発せられた光を加工し、空間光変調器 (Spatial Light Modulator: SLM) に照射することで映像の反射光を再現する。SLMの変調パターン (Computer-Generated Hologram: CGH) は光の伝搬計算で得られる。この計算は、SLMに照射された光が実空間を伝搬する逆過程、すなわち3次元像から反射した光がSLM上に作る波面を計算したものであり、一般に高負荷計算となる。波面は複素振幅だが、市販されているSLMは振幅、または位相の一方のみを再現可能であり、変調効率の高さから、現在では位相変調型のSLMが主流である。そのため、本稿では位相型を前提に説明する。

3次元像の表面が自発光する無限小の点光源で埋められているとみなせば、SLM上の波面は、

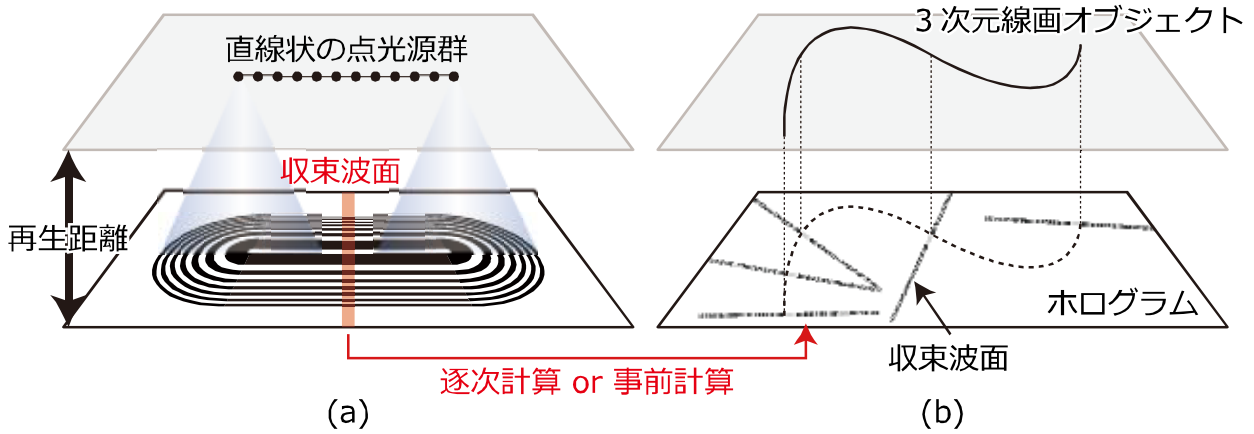


図 2 CG-Line 法の概要[1]

$$U(x, y) = \arg \left[\sum_j^{N-1} A_j \exp(ikr_j) \right] \quad (1)$$

と書ける．ここで， (x, y) は CGH の画素座標， N は点光源の総数， A_j は j 番目の点光源の強度， i は虚数単位， $\arg[\cdot]$ は位相を取得する関数， k は波数で光源波長を λ として， $k = 2\pi/\lambda$ と定義される．また， r_j は (x_j, y_j, z_j) にある j 番目の点光源と CGH の画素との距離であり，

$$r_j = \left\{ (x_j - x)^2 + (y_j - y)^2 + z_j^2 \right\}^{-0.5} \quad (2)$$

と定義する．CGH の画素数を M とすれば，式(1)の計算量は $O(NM)$ である．実用規模では， $N = 10^7, W = 10^6$ となり，単純な計算方式ではスーパーコンピュータ以上の計算性能が要求される．

3. 成果

筆者はかねてより波面の幾何的な対称性に着目した高速計算手法を開発し最大で数千倍近い高速化性能を達成している．本研究では，投影する3次元像を線(ワイヤフレーム)で構成されるものに限定した場合に生じる波面の顕著な幾何的対称性を利用した高速計算手法を開発した[1-8]．

図 1(a)のように x 軸上の十分な長さの範囲に密に連続する点光源群を考えた場合，

点光源群が同じ奥行きに並ぶならば，形成される波面は1次元パターンを x 軸方向に引き伸ばしたようになる．これは，点光源群が曲線の場合にも同様の傾向をなす．また，1次元パターンは奥行きに依存する．そのため，本研究では，図 1 (b)のように1次元パターンを事前計算，または，逐次計算し，線の形状に沿って合成することで，近似的にCGHを形成する波面を合成する[1]．

図 1(a)の条件で収束する波面は，解析的に，

$$U(y) = \sqrt{\frac{\lambda}{\zeta}} \exp\left(\frac{i\pi y^2}{\lambda\zeta}\right) \quad (3)$$

で求められる[6]．ここで， λ は光源波長， ζ は再生距離， i は虚数単位であり， y はCGHの画素と3次元線をCGHに投影した線(図 1(b)の点線)を結ぶ線の法線のノルムである．式(3)から明らかなように，波面は1次元関数であり，点光源ごとに式(1)を適用する場合に比べ，計算量は平方根のオーダーで削減できる．

式(3)に基づくCG-Line法は線が無限長である場合に生じる収束波面を，近似的にすべての線に適用しているため，線の端点で間延びするなどの劣化が生じる．そこで，有限長の線が作る波面を解析的に求める手法 (Analytical CG-Line 法)を開発した[2]．

この手法で描画可能な線は同じ奥行き直線と円弧に限定されるが、オリジナルのCG-Line法に比較して誤差が小さく、画質劣化が生じにくい上、GPU実装が可能であることに優位性がある。

他方、オリジナルのCG-Line法のGPU実装手法も開発した[4]。CGH計算は画素ごとに独立した計算構造を取れるため、元来、GPU実装に適している。CG-Line法のGPU実装を考えると、図1(b)のように1次元の波面を掃引する動きの並列化は、ランダムメモリアクセスを引き起こすためGPU実装には適さない。そこで、CGHの画素ごとに、そこを通る線画オブジェクトの法線を求めることで、高効率なGPU実装を実現した。線画オブジェクト \vec{g}_k について、CGHの画素 \vec{r} と \vec{g}_k 上の点を結ぶベクトルを \vec{h}_k とすれば、 \vec{h}_k が \vec{g}_k の法線となる条件は、

$$\vec{h}_k \cdot \vec{g}'_k = 0 \quad (4)$$

である。なお、 \vec{g}'_k は多項式であり、'は一階微分を表す。この方程式を満たす $|\vec{h}_k|$ を式(3)の y とすれば、CGHの画素単位で並列化したCG-Line法を実行できる。式(3)は \vec{g}_k の次数が2の場合、3次方程式となり解の公式であるカルダノの公式で解ける。

GPU実装版のCG-Line法(GPU-CG-Line法)は従来版に比較して高速処理が可能な一方で、方式特有の画質劣化として線上の強度不均衡の発生がわかっている[4]。これは、GPU-CG-Line法で曲線の波面を合成する場合、線画の単位長あたりの波面面積が曲率に応じて差異が生じることに起因すると考えている。すなわち、曲率が大きい場合には、同じ長さの直線に比較して、合成する波面の面積が大きくなり、集光される光のエネルギーが増えることで強度不均衡が生じる。この改善のため、位相ノイズの重畳による補正手法を開発した[6, 7]。 γ をノイズの大

きさとすると、ノイズを重畳した収束波面は式(3)より、

$$U(y) = \sqrt{\frac{\lambda}{\zeta}} \exp \left\{ i\pi \left(\frac{y^2}{\lambda\zeta} \pm \gamma \right) \right\} \quad (5)$$

となる。ここで γ の符号は一様乱数で決定する。乱数に基づく位相ノイズによる光強度の減衰効果は以下のように説明できる。CGHの位相がランダムに同じ割合で $e^{-i\pi\gamma}$, $e^{i\pi\gamma}$ の位相変化を持つとき、集光点の強度は、

$$I = \left| \frac{e^{-i\pi\gamma} + e^{i\pi\gamma}}{2} \right|^2 \quad (6)$$

$$= \cos(\pi\gamma)^2 = \frac{\cos(2\pi\gamma) + 1}{2}$$

に比例した強度を持つ[6]。すなわち、式(6)より、

$$\gamma = \frac{\cos^{-1}(2I - 1)}{2\pi} \quad (7)$$

となる位相ノイズを式(5)に印加すれば、所望の強度分布を再生像に与えられる。この事実を利用し、GPU-CG-Line法における強度不均衡の補正に成功した[7]。また、表現性の向上を目的に線にグラデーションを付ける手法としても提案している[6]。

ここまでに説明したCG-Line法は、線が同じ再生距離 ζ に分布している前提があった。しかし、ワイヤフレームアートのように、より実用的な3次元像の再生には、奥行方向に連続的に変化する3次元像への対応が不可欠である。そこで、Analytical CG-Line法の発展として、直線に限定されるが奥行方向の変化を含むワイヤフレーム3次元像を再生可能なCGH計算手法を開発した[5]。Analytical CG-Line法と同様に、GPU実装可能であり高速に計算できる。

最後に、ペンタブレットをインターフェイスとした、インタラクティブシステムを

紹介する[3]. CG-Line 法は GPU 実装に適した形に改良されたが, 消費電力や排熱, 大きさ, 費用等の問題から, 組込系で用いられるような非力なプロセッサでも動作可能であるほうが都合良い. その実践として, 開発したインタラクティブシステムでは, 入力を手描きにすることで, 単位フレームあたりに更新する CGH の範囲を小さく抑えている. すなわち, 単位フレームあたりの CGH 計算量は人間の手描き速度で決定する条件設定とした. これにより, 家庭用 PC によるリアルタイム処理を可能にした.

4. おわりに

本研究は, 千葉大学, ベルギー・ブリュッセル自由大学, 及び所属する東京都立大学の研究者, 学生諸氏との共同研究により, 筆者の当初の着想から広く発展し, 高速性, 表現性の向上を実現してきた. 最後に, 今後の研究計画をもって本稿を結ぶ.

表現性の向上が当面の課題である. 一例が線幅の自由度向上である. 現状では, 線幅無限小の線の描画に限られるため, 3次元像が実用的な解像度, サイズになった場合, 視認性が著しく劣化する可能性がある. また, 線幅の表現性が高まれば, 塗りつぶす表現が可能になることから, ワイヤフレームアートに限らない 3次元像の生成に展開可能であると考えている. この場合, 他手法に比較した計算速度の優位性を維持する課題がある. これまでに実現可能性を検証には成功しており[8], 安定的な出力を得られる計算方式を開発している.

また, 「何に使えるか」という普遍的な疑問に対する回答もプロトタイプ制作と言う形で用意する必要がある. 理論的には実物に見紛うばかりの 3次元像を再生可能な電子ホログラフィにおいて, 本研究で再生可

能な 3次元像は写実性の対極にあるようなワイヤフレームアートである. その点においては, 世間の電子ホログラフィに対する期待には直接的に応えられない. しかし, 線のみで表現する 3次元像であっても, 例えば各種ナビゲーションシステムや遠隔作業指示システムなど, 実用に足る用途は多く考えられる. これらの用途において, 電子ホログラフィの 3次元像再生システムとしての優位性を含んだワイヤフレーム投影による実用的なプロトタイプシステムを構築し, より広く, 本研究のコンセプトを発展させていきたいと考えている.

5. 参考文献

- [1] T. Nishitsuji, T. Shimobaba, T. Kakue, and T. Ito, "Fast calculation of computer-generated hologram of line-drawn objects without FFT," *Opt. Express*, 28(11), 15907–15924 (2020).
- [2] D. Blinder, T. Nishitsuji, T. Kakue, T. Shimobaba, T. Ito, and P. Schelkens, "Analytic computation of line-drawn objects in computer generated holography," *Opt. Express* 28(21), 31226–31240 (2020).
- [3] T. Nishitsuji, T. Kakue, D. Blinder, T. Shimobaba, and T. Ito, "An interactive holographic projection system that uses a hand-drawn interface with a consumer CPU," *Sci. Rep.* 11(1), 147 (2021).
- [4] T. Nishitsuji, D. Blinder, T. Kakue, T. Shimobaba, P. Schelkens, and T. Ito, "GPU-accelerated calculation of computer-generated holograms for line-drawn objects," *Opt. Express*, 29(9), 12849–12866 (2021).

- [5] D. Blinder, T. Nishitsuji, and P. Schelkens, "Real-time computation of 3D wireframes in computer-generated holography," *IEEE Trans. Image Process.* 30, 9418–9428 (2021).
- [6] T. Nishitsuji, N. Shiina, D. Blinder, T. Shimobaba, T. Kakue, P. Schelkens, T. Ito, and T. Asaka, "Variable-intensity line 3D images drawn using kinoform-type electroholography superimposed with phase error," *Opt. Express* 30(15), 27884 (2022).
- [7] N. Shiina, T. Nishitsuji, T. Asaka, "Quality Improvement of Computer-Generated Holograms for Line-Drawn Objects by Imposing a Phase Error", *International Photonics 2022 (IP2022)*, IP05-02, Yokohama, Japan (2022.4.22).
- [8] A. Hayashi, T. Nishitsuji, T. Asaka, "Thickening the width of holographic three-dimensional line images using an error diffusion technique", *International Photonics 2022 (IP2022)*, IP06-04, Yokohama, Japan (2022.4.22).

6. 謝辞

本研究は、高柳健次郎財団の助成によりなされました。多大なご支援を賜り、関係各位に感謝いたします。

以上