

CGH 近似計算法の提案と専用計算機システムへの適用
Suggestion of approximate methods for CGH and applied special purpose computer

谷口 甲斐[†]増田 信之[†]山本 洋太[†]下馬場 朋禄[‡]角江 崇[‡]伊藤 智義[‡]

Kai Taniguchi

Nobuyuki Masuda

Yota Yamamoto

Tomoyoshi Shimobaba

Takashi Kakue

Tomoyoshi Ito

1. 要旨

CGH (Computer-Generated Hologram) において、その計算時間の削減は大きな課題である。本研究はこの課題に対して、新たな近似計算法の考案とそれを適用した専用計算機の構築によって改善を試みるものである。近似計算法は点光源モデル CGH に適用可能であり、以下単に CGH と呼ぶ場合でも、点光源モデル CGH を指すものとする。

2. 位相変調型 CGH 計算

位相変調型 CGH は、振幅変調型に対して、再生時の回折効率の点で利点を持つ。しかし、専用計算機構築の効率は、振幅変調型に及ばない[1][2]。本研究は、実装課題を残すこの位相変調型での高速化を試みる。

2.1 漸化式による計算法

CGH において、フレネル近似を適用すると、漸化式形への変形が可能な事が知られている。以下、式 (1) から (7) に漸化式による位相変調型 CGH の計算式を示す。ただし、ある画素 α において、画素間隔 p で正規化された座標を (X_α, Y_α) と表し、物理的な画素座標を (x_α, y_α) とすると、 $(pX_\alpha, pY_\alpha) = (x_\alpha, y_\alpha)$ の関係が成立ものとする。また、 $(X_{\alpha+1}, Y_{\alpha+1})$ は、 (X_α, Y_α) に対して x 軸正の方向に隣接する画素、 (X_j, Y_j, Z_j) は物体点 j の正規化座標、 N_{obj} は物体点数、 λ は光波長を表す。式 (1) によって参照光を変調することで、物体光再生が行われる。

$$\phi(X_\alpha, Y_\alpha) = \arg[U(X_\alpha, Y_\alpha)] \quad (1)$$

$$U(X_\alpha, Y_\alpha) = \sum_{j=1}^{N_{obj}} \exp[i2\pi\theta_{\alpha j}] \quad (2)$$

$$\theta_{\alpha+n+1j} = \theta_{\alpha+nj} + \Gamma_{\alpha+nj} \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (3)$$

$$\Gamma_{\alpha+n+1j} = \Gamma_{\alpha+nj} + 2\Delta \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (4)$$

$$\theta_{\alpha+0j} = \theta_{\alpha j} = \Delta \cdot \left\{ (X_\alpha - X_j)^2 + (Y_\alpha - Y_j)^2 \right\} \quad (5)$$

$$\Gamma_{\alpha+0j} = \Gamma_{\alpha j} = \Delta \cdot \{2(X_\alpha - X_j) + 1\} \quad (6)$$

$$\Delta = \frac{p}{2\lambda Z_j} \quad (7)$$

2.2 近似による漸化式の単純化

前節 2.1 に示したように、漸化式による計算では、式 (3)、(4) の 2 本の漸化式によって、 \exp 指数部の計算を実行する。ここで提案する近似は、この 2 本の漸化式を次の式 (8) による 1 本の漸化式によって近似する。

$$\theta_{\alpha+n+1j} \approx \theta_{\alpha+nj} + \Gamma_{\alpha j} \quad (8)$$

式 (8) のような近似式が成立するのは、フレネル近似下において、 $\Delta \ll 1$ であることが期待されるためである。

ここで、式 (8) による近似計算が $n < 15$ において成立する場合を考える。この時、式 (5) により計算される漸化式初期値のコストが相対的に大きくなってしまふ。また、式 (8) による近似の誤差は $\theta_{\alpha+15j}$ で最大化してしまうため、やや不便である。そこで、16 の倍数ごとの漸化式を導き、それらを利用して $\Gamma_{\alpha j}$ の代わりとなる $\zeta_{\alpha j}$ を以下のように定義する。

$$\theta_{\alpha+16(m+1)j} = \theta_{\alpha+16mj} + 2^4 \zeta_{\alpha+16mj} \quad (m = 0, 1, \dots) \quad (9)$$

$$\zeta_{\alpha+16(m+1)j} = \zeta_{\alpha+16mj} + 2^5 \Delta \quad (m = 0, 1, \dots) \quad (10)$$

$$\theta_{\alpha+16m+n+1j} \approx \theta_{\alpha+16m+nj} + \zeta_{\alpha+16mj} \quad (n = 0, 1, \dots, 14) \quad (11)$$

$$\zeta_{\alpha j} = \Delta \cdot \{2(X_\alpha - X_j) + 2^4\} \quad (12)$$

2.3 ピクセル補間による近似計算

式 (3) より $\theta_{\alpha+1j} = \theta_{\alpha j} + \Gamma_{\alpha j}$ 、また前節と同様の理由より $\theta_{\alpha-1j} \approx \theta_{\alpha j} - \Gamma_{\alpha j}$ と近似可能である。ここで、これら両辺の \cos をとると次の式を導ける。

$$\cos(2\pi\theta_{\alpha j}) \cos(2\pi\Gamma_{\alpha j}) \approx \frac{1}{2} [\cos(2\pi\theta_{\alpha+1j}) + \cos(2\pi\theta_{\alpha-1j})]$$

ここで $\cos(2\pi\Gamma_{\alpha j}) \approx 1$ であれば、次の式 (13) のようになる。

$$\cos(2\pi\theta_{\alpha j}) \approx \frac{1}{2} [\cos(2\pi\theta_{\alpha+1j}) + \cos(2\pi\theta_{\alpha-1j})] \quad (13)$$

式 (13) はある画素の複素振幅実部が、その隣接する画素の複素振幅実部の平均により与えられることを意味する。これはグラフ的には、ある \cos 波において、近傍 \cos の計算結果を線で結び中点を取り近似することに相当する。 \cos 波を三角波として近似可能な事が示唆されている CGH においては、ある程度十分な精度が期待される[3]。

[†] 東京理科大学 Tokyo University of Science

[‡] 千葉大学 Chiba University

また、その計算結果の絶対値は、真値に対して常に減少することになる。CGH の計算では、複数の物体点での計算を重ね合わせるため、誤差の低減が期待される。

またさらに、ホログラムの画素間隔は、記録する光の複素振幅変化率に対して、十分に細かいことが前提となる。このことから、ある画素値を、隣接するピクセルの平均値で補完することは妥当であるといえる。以上では、実部について示したが、虚部についても同様の事が言え、最終的にピクセル補間による近似は次の式 (15) のようになる。

$$U(X_\alpha, Y_\alpha) \approx \frac{1}{2} \{U(X_{\alpha+1}, Y_{\alpha+1}) + U(X_{\alpha-1}, Y_{\alpha-1})\} \quad (15)$$

3. 専用計算機の概要

本研究では、以上 2 つの近似計算を適用した専用計算機を Zynq UltraScale+ MPSoC ZCU102 評価キット上に作成した。この ZCU102 には、ARM 社 CPU と FPGA が 1 つのチップ上に実装された ZU9EG チップが搭載されており、CPU と FPGA は AXI というバス規格を通じて通信を行う。専用計算機の実装状況を次の表 1, 2 に示す。提案近似を使用しない場合の専用計算機の実装状況については、文献 [2][4]などを参照していただきたい。

表 1 専用計算機概要

動作周波数	279[MHz]
並列数	17,280
オンチップ消費電力解析	29.078[W]

表 2 専用計算機リソース使用量

項目	リソース総量	使用率[%]
LUT	274,080	83.57
DSP	2,520	64.60

4. 精度評価

4.1 ゾーンプレート比較

1,920 × 1,920 のゾーンプレートについて、フレネル近似を使用しない (ルート計算による) 場合と、各種計算方法による場合との平均絶対誤差 (MAE) を次の図 1 に示す。ただし CGH は 256 階調で位相を表現している。

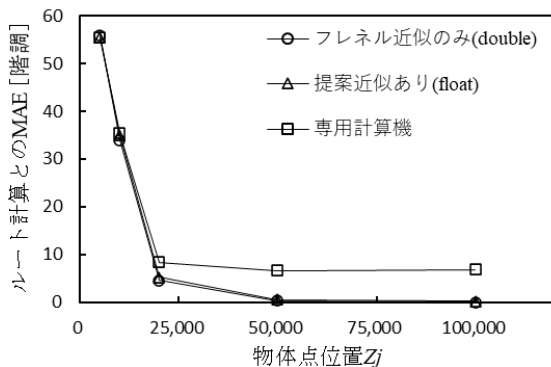
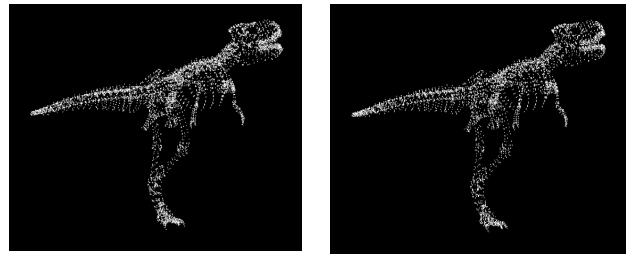


図 1 ゾーンプレート比較結果

図 1 を見ると、フレネル近似のみの場合と、提案近似計算法を使用した場合の誤差曲線が概ね一致することがわかる。このことより、再生像の鮮明さが CGH の MAE にのみ依存すると仮定すると、提案近似計算法を使用した場合でも、フレネル近似計算のみを使用する場合に対して、計算領域の制約の与えないことが予想される。

4.2 再生シミュレーション

以下にフレネル近似のみを使用した場合と、提案近似計算法を適用した専用計算機を使用した場合の CGH の再生像の一例を示す。



(a) 提案近似なし (b) 専用計算機

図 2 回折計算による再生シミュレーション

5. 性能評価

画素サイズ 1,920 × 1,080、物体点数 60,000 点の場合の CGH 計算時間比較を次の表 3 に示す。ただし CPU、GPU 開発には icc16.0.1、CUDA9.1 を使用した。また、CPU の三角関数計算にはテーブル計算、GPU では SFU による計算を採用し、float 型を基本としたコードを使用した。

表 3 近似計算および専用計算機による高速化比

プロセッサ	提案近似	計算時間[ms]	高速化比
CPU : Xeon E5-2697	なし	5,096	1.00
	あり	1,379	3.70
GPU : Tesla P100	なし	234.7	21.7
	あり	147.5	34.5
専用計算機 : ZU9EG	あり	25.94	196

6. まとめと今後の課題

作成された専用計算機は、従来法による CPU に対して 196 倍、GPU に対して 9 倍の高速化を達成した。本研究では漸化式の単純化は 16 段、ピクセル補間は 1 画素おきの補間としたが、これら近似計算はより広い範囲で利用できる可能性があり、この点についても検討する必要がある。

参考文献

- [1] T.Sugie et al., "High-performance parallel computing for next-generation holographic imaging", Nature Electronics, Vol. 1 (2018).
- [2] T.Nishitsuji et al., "Special-purpose computer HORN-8 for phase-type electro-holography", Opt. Express, Vol. 26, No. 20 (2018).
- [3] T.Nishitsuji et al., "Simple and fast cosine approximation method for computer-generated hologram calculation", Opt. Express, Vol. 23, No. 25 (2015).
- [4] 山本洋太 et al., "組み込みシステム向け位相変調型電子ホログラフィ専用計算機の開発", FIT2019, 第 1 分冊, C-005, pp.195-196 (2019)