

## ウェーブレット変換を用いたフルカラーホログラム生成計算の高速化

## Fast Generation of Full-Color Holograms using Wavelet Transform

山田 翔大<sup>†</sup> 下馬場 朋禄<sup>†</sup> 角江 崇<sup>†</sup> 伊藤 智義<sup>†</sup>  
 Shota Yamada Tomoyoshi Shimobaba Takashi Kakue Tomoyoshi Ito

## 1. はじめに

3次元映像技術の一つに電子ホログラフィがある。電子ホログラフィは、3次元物体からの光の伝搬と干渉を計算しホログラムを生成する。ホログラムより再生される3次元映像は記録した物体からの光を再現し、自然な映像を再生できることが電子ホログラフィの大きな特徴である。

点群で構成された3次元物体でのホログラム生成を考えるとホログラムの計算時間は、物体の点数とホログラムの大きさに依存する。そのため、物体点数の多い3次元物体や大規模なホログラムを生成するには計算時間が膨大となり高速化が必要であり、将来のリアルタイム再生に向けたホログラム計算の高速化手法が研究されている[1,2]。

ホログラム計算の計算量を削減し高速化する手法の一つとして、ウェーブレット空間上で光波の重ね合わせ計算を行う WASABI(WAvelet ShrinkAge-Based superpositIon)が提案され、既に数万点規模の単色の3次元物体でのホログラム生成の高速化が確認されている[3]。本研究では、3次元物体を単色からフルカラーに拡張し、物体点数が約400万点の3次元物体に対する、WASABIを用いたフルカラーホログラムの計算を高速化することを目的とする。

## 2. 手法

## 2.1 WASABI

図1に WASABIにおける計算の流れについて示す。

WASABIでは、最初に(1)式に示す点光源からの光の拡がり示す点像分布関数(PSF: Point Spread Function)を、高速ウェーブレット変換(FWT: Fast Wavelet Transform)によってウェーブレット空間上に移す。

$$u_d(x, y) = \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda_c} \sqrt{x^2 + y^2 + d^2}\right) \quad (1)$$

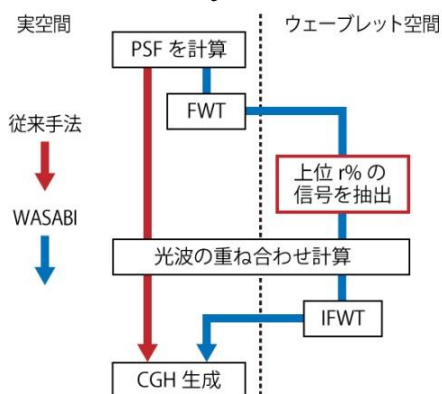


図1 WASABIの処理の流れ

<sup>†</sup> 千葉大学大学院工学研究院

ここで、 $i = \sqrt{-1}$ 、 $\lambda_c$ は光の波長を、 $d$ はPSFの奥行き距離を示す。そして、ウェーブレット空間上でのPSFの強度が上位 $r\%$ の信号をLUT(Look-Up Table)  $v_d$ に格納する。

$$v_d = [c_{d,0}, c_{d,1}, \dots, c_{d,K_d-1}] \quad (2)$$

$c_{d,k}$ はウェーブレット空間上で $k$ 番目の強度をもつPSFを意味する。 $K_d$ は $K_d = r(\pi W_d^2)$ と設定し、奥行き距離 $d$ での $v_d$ の要素数を表す( $W_d$ はPSFの半径)。以上の処理を事前に計算し、次に $v_d$ を用いウェーブレット空間上での光波の重ね合わせ計算を行う。この際、FWTのレベル数 $\alpha$ に応じて、PSFが $2^{-\alpha}$ だけ縮小するため、重ね合わせ計算において物体座標も同様に $2^{-\alpha}$ だけ縮小する必要がある。

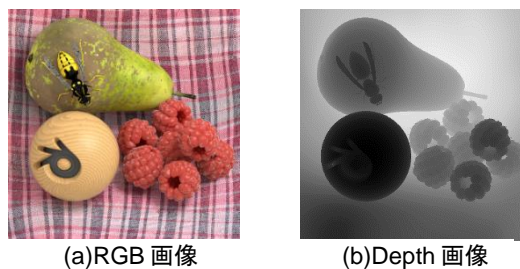
$$\psi(m, n) = \sum_{j=0}^L A_j \sum_{k=0}^{K_d-1} c_{d,k} \delta(m - 2^{-\alpha} x_j, n - 2^{-\alpha} y_j) \quad (3)$$

ここで、 $(m, n)$ はウェーブレット空間上の座標、 $L$ は3次元物体の物体点数、 $(x_j, y_j, d)$ は3次元物体の座標、 $A_j$ は3次元物体からの光波の振幅を示す。最後に(3)式で求められた $\psi(m, n)$ に逆FWTを行い実空間上に戻し、ホログラムを生成する。フルカラーホログラムを生成するには、(1)式でのPSFの波長を変化させ、赤、緑、青色の各波長に対してWASABIを行い、各色でのホログラムを生成する。

ホログラム生成の計算量について実空間上で光波の重ね合わせ計算を行う従来手法と比較する。物体点数 $L$ 、各奥行き距離でのPSFの平均半径 $\bar{W}$ 、生成するホログラムの画素数 $N \times N$ とおくと、従来手法の計算量 $O(L\bar{W}^2)$ に対し、WASABIは上位 $r\%$ の信号のみ光波の重ね合わせ計算に用いるため、逆FWTの計算量 $O(N^2)$ と合わせ $O(rL\bar{W}^2 + N^2)$ となる。これより、 $L$ が多い場合、従来手法と比較して選択率 $r\%$ 分高速化が見込める。

## 2.2 RGB-D データ

図2に本研究で使用した3次元物体であるRGB-Dデータを示す[4]。RGB-Dデータは、図2(a)に示す物体の各画素の輝度値を持つRGB画像と、図2(b)に示す奥行き距離を表すDepth画像とを組み合わせることで3次元物体を表現する。RGB-Dデータの物体点数は、RGB画像、Depth画像の画素数となる。本研究では、 $2,048 \times 2,048$ [pixel]の画像を利用したので、物体点数は約400万点となる。



(a)RGB画像

(b)Depth画像

図2 RGB-D データ

## 2.3 RGB-D データからのホログラム生成

RGB-D データからホログラムを生成する際は、RGB 画像の輝度値を、(3)式における光波の振幅として用いる。しかし、RGB 画像では物体から各画素への入射する光の強度しか記録されない。そこで、3 次元物体が物体表面で光が等方的に拡散するように、RGB 画像の輝度値にランダムな位相成分を重畳した。

## 3. 実験

### 3.1 実験内容

図 2 に示した RGB-D データに対し、実空間上で光波の重ね合わせ計算を行う従来手法と、WASABI の選択率( $r = 1\%$ ,  $10\%$ )の計 3 パターンにて  $2,048 \times 2,048$ [pixel] のホログラムを生成し、生成にかかる計算時間の計測と再生シミュレーションを行う。

RGB-D データは図 2 に示す奥行き  $5 \sim 10$ [cm] の間を 256 層に分割された物体点数が  $2,048^2 = 4,194,304$  点のものを使用した。光の各波長は、赤色 633nm、緑色 532nm、青色 450nm と、画素ピッチ  $8\mu\text{m}$  と設定し計算を行った。

実装環境は、OS に Windows 10 Enterprise 64bit、CPU に Intel Core-i7 6800K(コア数: 6, クロック数: 3.40GHz)、メモリ 32GB、コンパイラに Microsoft Visual Studio C++ 2015 を用い、計算の際には OpenMP を用いて並列化を行った。

### 3.2 実験結果

表 1 に従来手法と WASABI での RGB-D データからフルカラーホログラム生成の計算時間を示す。WASABI を適用することで、選択率  $r = 1\%$  のときは 427 倍の高速化に、選択率  $r = 10\%$  のときは 23.2 倍高速化に成功した。また、WASABI における逆 FWT にかかる計算時間は 45ms と、計算時間全体に比べ無視できるほど小さいことがわかる。WASABI の選択率  $r = 1\%$  と比べ、従来手法と  $r = 10\%$  のときの高速化比が選択率分より大きくなった。これは、LUT のメモリ量が大きくなり、メモリアクセス回数が増えたことによる遅延と考えられる。

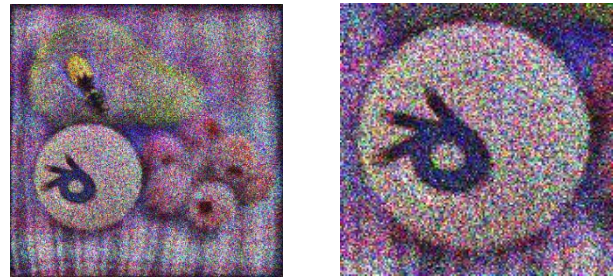
表 1: フルカラーホログラム生成の計算時間

	計算時間[s]	高速化比
従来手法	5,295	-
WASABI( $r = 10\%$ )	228	$\times 23.2$
WASABI( $r = 1\%$ )	12.4	$\times 427$

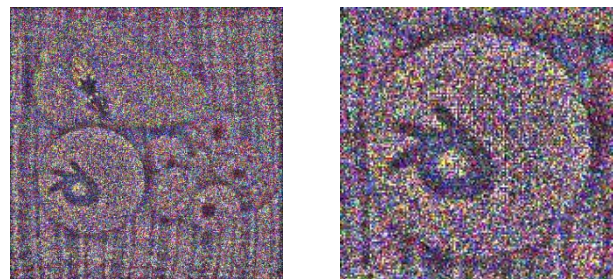
図 3 に従来手法、WASABI で生成したホログラムを奥行き距離 5cm で再生シミュレーションを示す。図 3(a) は従来手法の再生結果、図 3(b) は WASABI の選択率  $r = 1\%$  の再生結果、図 3(c) に選択率  $r = 10\%$  の再生結果となっている。従来手法と WASABI の再生結果を比較すると、全体の様子から再生像の概形は再現できているが、一部を拡大するとランダムな位相成分に起因するスペckルノイズが大きく現れていることがわかる。また、WASABI の選択率  $r = 1\%$  のときと比べ、 $r = 10\%$  のときがより従来手法と近い再生像が得られた。

このことから、選択率が小さいときは、ウェーブレット空間上での PSF 強度が小さい高周波領域が LUT に格納されず削減されたことにより、従来手法と比べ周波数成分が高

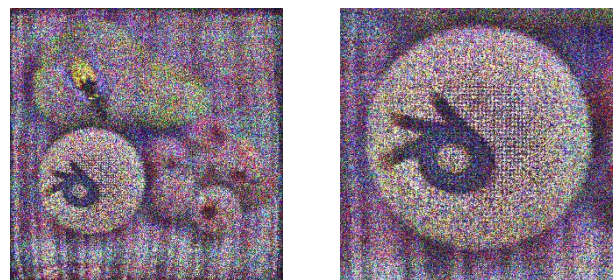
い細かな変化を表現しづらく、スペckルノイズが粗く現れ、全体の画質が低下するものと考えられる。



(a)従来手法



(b)WASABI 選択率  $r = 1\%$



(c)WASABI 選択率  $r = 10\%$

図 3 再生シミュレーション結果

左: 全体の様子 右: 一部を拡大した様子

## 4. おわりに

本研究では、物体点数が 400 万点を超えるフルカラーの 3 次元物体に対し、WASABI を用いることで従来手法と比較して  $r = 1\%$  のとき、427 倍の高速化に成功した。しかし、WASABI では選択率を小さくすると再生像にランダムな位相成分に起因するスペckルノイズが従来手法と比較して大きく現れるため、画質が低下することを確認した。

今後は、実際の光学系にて再生を行うこと、スペckルノイズが軽減できるように WASABI の計算を工夫することで画質の改善することが挙げられる。

本研究は JSPS 科研費 16K00151 により行われました。ここに深く感謝いたします。

### 参考文献

- [1] T. Shimobaba, et al, "Review of fast algorithms and hardware implementations on computer holography", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **12**, 4, 1611 - 1622 (2016)
- [2] T. Kakue, et al, "Review of real-time reconstruction techniques for aerial-projection holographic displays", *Optical Engineering* **57**(6), 061621 (2018).
- [3] T. Shimobaba and T. Ito, "Fast generation of computer-generated holograms using wavelet shrinkage," *Opt. Express* **25**, 77-86 (2017).
- [4] S. Wanner, et al, "Datasets and benchmarks for densely sampled 4d light fields", *Vision, Modeling & Visualization*, 225-226 (2013).