

インコヒーレントカラーデジタルホログラフィ専用計算機の開発 A special-purpose computer for incoherent color digital holography

原 貴之[†]
Takayuki Hara

伊藤 智義[†]
Tomoyoshi Ito

1. 研究背景および目的

インコヒーレントカラーデジタルホログラフィ[1]は、LEDなどの一般的な照明を用いて複数波長の情報をホログラムとして記録し、計算機内で像再生計算を行うことで三次元カラー再生像を取得する技術である。再生像の取得方法の一つとして、従来の時分割手法[1, 2]と比較し、波長フィルタや光源の切り替えなどの機械駆動部が不要となり、より少ない記録枚数で三次元カラー再生像を取得できる、波長多重位相シフトインコヒーレントカラーデジタルホログラフィ[3]を著者らの研究グループは提案した。手法[3]により、ホログラムの記録時間は短縮されたものの、計算機内での像再生計算には、依然として多くの時間がかかっている。特に、回折計算は、伝搬距離を更新して繰り返し計算を行う必要があるため、計算コストが大きい。

本研究では、回折計算の高速化及び屋外への持ち出しを想定し、FPGA (Field Programmable Gate Array)を用いた専用ハードウェアの開発を検討したため報告する。

2. 波長多重位相シフトインコヒーレントカラーデジタルホログラフィ

図1に手法[3]の概略を示す。偏光を利用した自己干渉計を構築し、RGB3波長のLED光源によって同時に照明された物体光波の水平偏光成分に対して、空間光位相変調器でフレネルレンズの位相分布を与え、偏光方向が互いに直交し、曲率半径の異なる二光波を生成する。この二光波を干渉させることで、複数波長が多重化されたホログラムを記録する。また、空間光位相変調器によって水平偏光成分に対して波長ごとに異なる位相シフトを与えながら、波長多重ホログラムを計7枚記録する。

三次元カラー再生像の取得においては、記録したホログラムに波長選択位相シフト法[4]を適用し、各波長の物体光の複素振幅分布を算出する。その後、取得した各波長の物体光の複素振幅分布に対して高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform: FFT) を用いたフレネル回折計算を適用する。ホログラム面から距離 z 伝搬した物体光 $u(x, y; z)$ は、 $U(f_x, f_y) = \text{FFT}[u(x, y; 0)]$ とすると、

$$u(x, y; z) = \text{FFT}^{-1}[U(f_x, f_y)H(f_x, f_y; z)] \quad (1)$$

と計算される。ただし、 f_x, f_y は空間周波数、 H はフレネル回折の伝達関数で、

$$H(f_x, f_y; z) = \exp(-i\pi\lambda z(f_x^2 + f_y^2)) \quad (2)$$

と表される。伝達関数 H の z を変更して繰り返し計算を行うことで、複数の奥行にピントのあった再生像を取得できる。

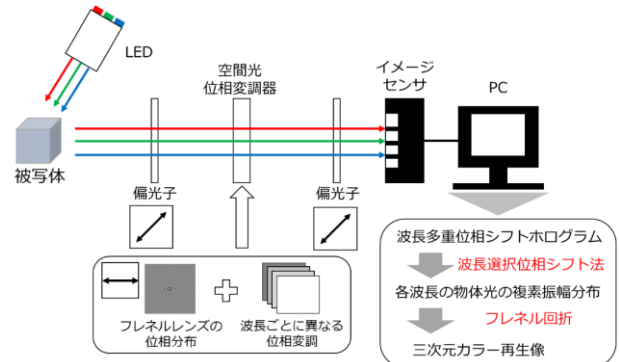


図1 手法[3]の概略図。

3. 回折計算のハードウェア実装の検討

手法[3]における像再生計算の処理の流れは以下のようになる。

1. 記録したホログラムから波長選択位相シフト法により各波長の物体光 $u(x, y; 0)$ を求める。
2. ゼロパディングを行ってから、FFTを実行し、各波長の物体光のスペクトル $U(f_x, f_y)$ を求める。
3. 各波長の伝達関数 $H(f_x, f_y; z)$ を求める。
4. $U(f_x, f_y)$ と $H(f_x, f_y; z)$ の積を求める。
5. IFFTを実行し、 $u(x, y; z)$ を求める。
6. 振幅分布の計算や階調化を行い画像として保存する。

三次元カラー再生像を得るためには、処理1-2は1度計算すればよいが、処理3-6は繰り返し計算するため、計算コストはこちらの方が大きい。また、処理6は平方根計算や除算を含むため、固定小数点演算を用いたハードウェア実装には不向きである。以上の理由から、処理4-5をハードウェアに実装し、計算時間の高速化を図る。本来は、RGBの3波長について回折計算を行う必要があるが、本研究では、1波長の回折計算のハードウェア実装について検討する。カラー化する場合は同じ回路を3つ用意し、波長を変えて並列計算すればよい。

フレネル回折の伝達関数 H は式(2)で表せるが、画素ピッチを p 、画素数を n とすると、 $f_x = x/np, f_y = y/np$ より、

$$H(f_x, f_y; z) = \exp(-i2\pi Z(x^2 + y^2)) \quad (3)$$

$$Z = \frac{\lambda z}{2n^2 p^2} \quad (4)$$

と書くことができる。 Z は除算を含む複雑な計算であるが、伝搬距離と波長に関する定数であるため、ホストPCで計算を行い、FPGAへと送信する。また、式(3)は三角関数で

[†] 千葉大学大学院工学研究院
Graduate School of Engineering, Chiba University

展開できるため、 \cos , \sin の1周期分のテーブルを用意し、 $Z(x^2 + y^2)$ の演算結果の小数部を入力アドレスとして、テーブルを参照することで伝達関数を計算する。

4. 固定小数点演算による精度検証および回路の構成

物体光のスペクトル $U(f_x, f_y)$ と伝達関数 $H(f_x, f_y; z)$ を固定小数点化し、再生像の画質について検証した。図2のような 512×512 画素の振幅画像と位相画像を入力画像として使用し、64 bitの浮動小数点数で順伝搬計算を行って回折像を取得した後、固定小数点数で逆伝搬計算を行い取得した再生像の画質を評価する。再生像の画質は浮動小数点数で逆伝搬計算して取得した再生像を基準画像としてPSNR (Peak Signal to Noise Ratio) を算出し評価した。

検証結果を図3に示す。ただし、画素ピッチ $p = 6.5 \mu\text{m}$ 、波長 $\lambda = 530 \text{ nm}$ 、伝搬距離 $z = 0.08 \text{ m}$ とした。また、三角関数のテーブルは \cos , \sin 共に1周期を256分割している。一般に、PSNRが30 dB以上であれば比較元の画像と区別が付きにくいとされる。図3の結果より、少し余裕を持って、 $U(f_x, f_y)$ は符号部1 bitと小数部14 bitの計15 bit、 $H(f_x, f_y; z)$ は符号部1 bitと小数部5 bitの計6 bitと決定した。

以上の検討により構成した回路図を図4に示す。回路の入力となる物体光のスペクトル $U(f_x, f_y)$ は 1024×1024 の要素を持つ。回路の動作としては、まずホストPCから入力された $U(f_x, f_y)$ をRAM_INUに格納する。全ての値が格納されたら、1つずつ値を読み出す。また、20 bitのカウンタを回し、上位10 bitを y 、下位10 bitを x として x^2, y^2 を求め、それらを足しあわせた結果をホストPCから送信された Z と乗算する。この結果の小数部8 bitを入力アドレスとして、 \cos , \sin を計算し、 $H(f_x, f_y; z)$ を求める。求めた $H(f_x, f_y; z)$ と $U(f_x, f_y)$ を複素乗算することで、距離 z 伝搬後の物体光のスペクトルが12 bitで出力される。

その後、出力結果に対して、2次元IFFTを行う。IFFTには、Xilinx社が提供しているIP (Intellectual Property) コアを使用する予定である。このコアは1次元のFFT及びIFFTを行うことができる。そのため、まず横方向のIFFTを行い、結果をRAM_FFTに格納した後、今度は縦方向に値を読み出し、IFFTを行った結果をホストPCへ出力する。 Z を更新しこの計算を繰り返すことで、被写体の三次元再生像を取得できる。

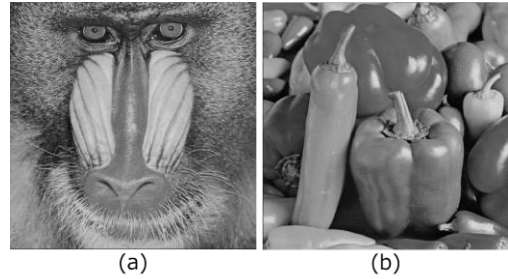


図2 入力画像. (a) 振幅画像, (b) 位相画像.

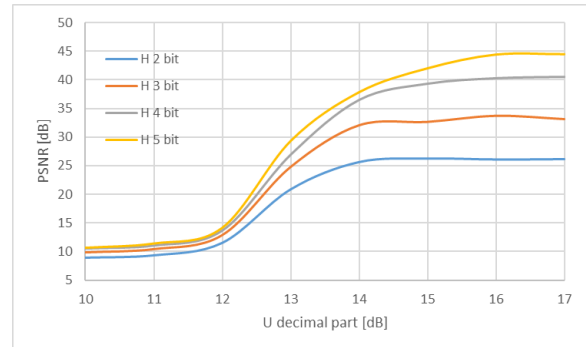


図3 パラメータのビット数による再生像の画質の変化.

5. まとめ

提案手法における像再生計算のハードウェア実装の検討を行った。計算コストの大きいフレネル回折に対して、固定小数点演算を用いた精度検証を行い、画質の維持に必要な各パラメータのビット数と回路の構成を検討した。今後は、実際に回路設計を行い、FPGA への実装を目指したい。

参考文献

- [1] J. Rosen and G. Brooker, "Fluorescence incoherent color holography," *Opt. Express* **15**, 2244-2250 (2007).
- [2] Y. Wan, T. Man, and D. Wang, "Incoherent off-axis Fourier triangular color holography," *Opt. Express* **22**, 8565-8573, (2014).
- [3] T. Hara, T. Tahara, Y. Ichihashi, R. Oi, and T. Ito, "Multiwavelength - multiplexed phase - shifting incoherent color digital holography," *Opt. Express* **28**, 10078-10089, (2020).
- [4] T. Tahara, R. Otani, K. Omae, T. Gotohda, Y. Arai, and Y. Takaki, "Multiwavelength digital holography with wavelength-multiplexed holograms and arbitrary symmetric phase shifts", *Opt. Express* **25**, 11157-11172 (2017).

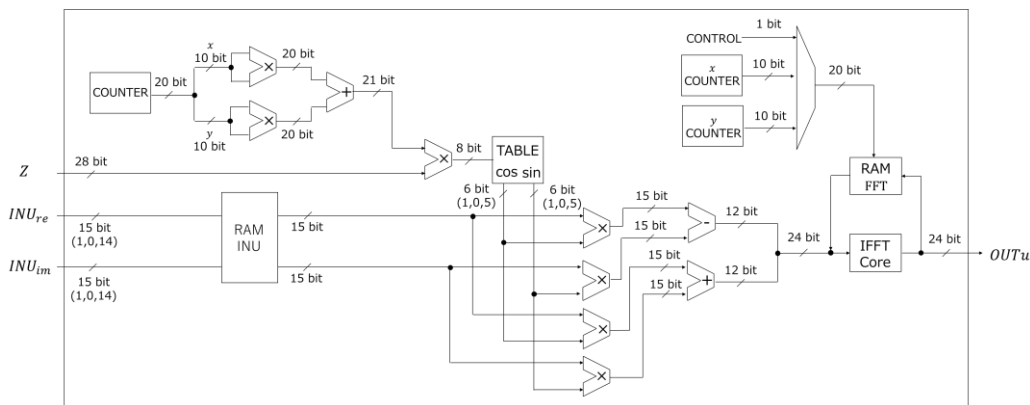


図4 回路の構成図.