

パッチモデルを用いた計算機合成ホログラムの高速計算法 A Fast Calculation Method for Computer Generated Hologram Using Patch Model

坂田 裕辰[†] 坂本 雄児[†]
Hironobu Sakata Yuji Sakamoto

1. まえがき

計算機合成ホログラム (CGH: Computer Generated Hologram) は計算機上のシミュレーションでホログラムを作成する技術であり、視覚特性を満たす立体表示技術として注目されている [1]。しかし、CGH にはホログラムの作成に膨大な計算時間がかかるなどの問題点がある。

CGH の高速化手法として、物体をパッチモデルで表現し、基本となるパッチからの物体光を事前に計算しておき、これに近似による簡単な変換を施すことで、パッチの位置、傾斜の変化、拡大・縮小にも対応した CGH の高速計算手法が提案されている [2]。この手法は物体の位置がホログラム面から遠い領域 (フラウンホーファー領域) にある前提で提案されているが、本稿では物体の位置がホログラム面から近い領域 (フレネル領域) でも有効であることを実験で確認するとともに、[2] では確認できていなかった、拡大・縮小変換の光学再生実験を行い有効性を確認した結果を報告する。

2. 物体のモデリングと計算時間

CGH では、物体の表現方法と計算方法、時間に密接な関係がある。物体の表現方法として、一般的には点充填法と、平面画像を入力とする方法の二つが用いられているが、高速計算という点では後者の方法が優れている。そこで、高速計算には後者の方法を元にしたパッチモデルを用いた手法が用いられている。

2.1 パッチモデル

パッチモデルとは複数の小さい基本的な図形 (パッチ) で物体の表面を覆うことで物体を表現する方法であり、CGH では各パッチからの物体光を足合わせて物体を表現している。

2.2 平面画像を入力する方法

この方法は、入力物体をホログラム面と平行な平面画像に限定することで、高速フーリエ変換 (FFT: Fast Fourier Transform) を計算に用いることができ、高速計算を可能としている。この方法は基本的には入力物体がホログラム面と平行な平面物体しか表現できないが、傾斜平面間での計算方法も提案されている [3]。これを利用すれば、パッチモデルで表現された物体を FFT を用いて計算することが可能になる。しかし、ホログラムの 1 辺のピクセル数が大きくなると、FFT にかかる計算時間が増加してしまい、全体としての計算時間も大きく増加する。

3. 手法の概要

パッチモデルで物体を表す場合、位置や角度、大きさなどが異なる様々なパッチから構成されることになる。そこで、事前に計算しておいた基本となるパッチからの物体光 (以下、基本物体光データ) から各パッチに合わせた物体光を得る。このためには、(1) ホログラムに平行な面内での平行移動・回転変換、(2) 距離変換、(3) 傾斜変換、(4) 拡大・縮小変換の各変換が必要となる (図 1)。これらの各変換を近似を用いて導出する。

3.1 平行移動・回転変換

基本となるパッチがホログラム面と平行な面内で平行移動・回転する場合、移動・回転がずれた位置の基本物体光データをリサンプリングすることで求めることができる。つまり、平行移動量を $(\Delta x, \Delta y)$ 、回転角を θ とすると、ホログラム面上の物体光分布 $u_h(x_h, y_h)$ は、基本物体光データ $u_b(x_b, y_b)$ を用いて、以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned} u_h(x_h, y_h) &= u_b(x_h \cos \theta + y_h \sin \theta - \Delta x, \\ &\quad y_h \cos \theta - x_h \sin \theta - \Delta y) \end{aligned} \quad (1)$$

[†] 北海道大学大学院情報科学研究科

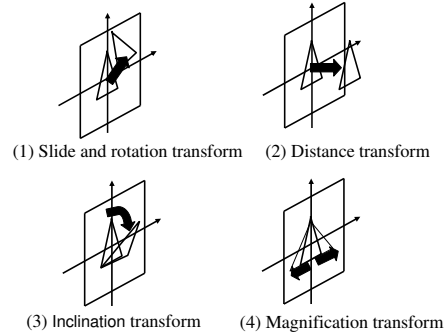


図 1 パッチの変換

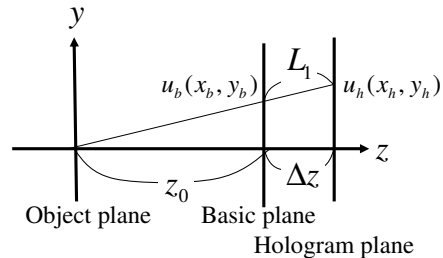


図 2 距離変換

3.2 距離変換

図 2 に示すように物体とホログラムとの距離が Δz だけ変化した位置での物体光を求めるものとする。ここで、距離が変化する際に光波の強度分布は変化せず、距離分の位相のみが変化すると近似すると、ホログラム面上での物体光分布 $u_h(x_h, y_h)$ は以下の式で表すことができる。

$$u_h(x_h, y_h) = C e^{jkL_1} u_b(x_b, y_b) \quad (2)$$

ここで、 x_b, y_b, L_1 は $x_h, y_h, z_0, \Delta z$ から幾何学的に求めることができる。

3.3 傾斜変換

図 3 に示すように、基本物体光データを計算した面が、ホログラム面に対して角度 ϕ だけ傾斜したとする。このとき距離変換と同様の近似を用いると、ホログラム面における物体光分布は以下の式で表すことができる。

$$u_h(x_h, y_h) = C e^{jkL_2} u_b(x_b, y_b) \quad (3)$$

ここで、 x_b, y_b, L_2 は x_h, y_h, z_0, ϕ から幾何学的に求めることができる。ただし、図 3 は y 軸を軸として回転した場合で、 x_b は x' 軸上となる。

3.4 拡大・縮小変換

物体が、 x 軸、 y 軸に対して、それぞれ倍率 R_x, R_y で拡大・縮小されたときは、基本物体光を間隔を変えてリサンプリングし、そこに位相差を与えることで近似する (図 4)。そうすると、ホログラム面上での物体光分布は以下の式で表すことができる。

$$u_h(x_h, y_h) = C e^{jk(r_h - r_b)} u_b(x_b, y_b) \quad (4)$$

ここで、 $(x_b, y_b) = (R_x x_h, R_y y_h)$ であり、 r_h, r_b は図 4 から求めることができる。

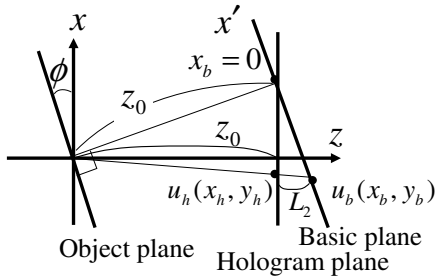


図3 傾斜変換

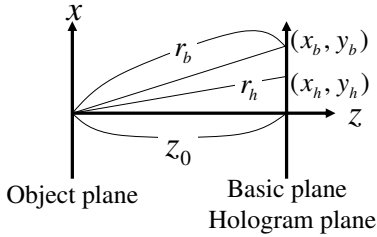


図4 拡大・縮小変換

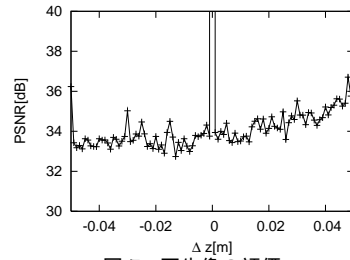


図7 再生像の評価

表1 各変換の計算時間

	Calculation time
Read basic data	0.6[s]
Slide and rotation transform	0.5[s/patch]
Distance transform	2.8[s/patch]
Inclination transform	3.1[s/patch]
Magnification transform	3.1[s/patch]
Total time	0.6 + 9.5P[s]

P: Number of Patch

表2 計算時間の比較

	Calc. amount	Calc. time
Ordinary method	$O(N^2 \log N)$	13.7P[s]
This method	$O(N^2)$	0.6 + 9.5P[s]

4. 実験結果

ここでは、距離変換、拡大・縮小変換の実験結果を示す。各条件は、基本物体光データを作る際の距離 z_0 を $z_0 = 0.15[\text{m}]$ とし、サンプリング間隔は $6.35[\mu\text{m}]$ 、画素数は $2048 \times 2048[\text{pixel}]$ 、基本となるパッチは1辺が $500[\text{pixel}]$ の正三角形である。

ここでは、距離変換、拡大・縮小変換の結果を示すが他の変換の有効性も確認した。

4.1 実験1 距離変換

実際に距離変換をほどこし、焦点距離 f を変化させていった場合のシミュレーションによる再生像を図5に示す。今回の実験では、 $\Delta z = 0.03[\text{m}]$ としている。つまり物体とホログラム面との距離が $z_0 + \Delta z = 0.18[\text{m}]$ となっている。結果を見ると、 $f = 0.18[\text{m}]$ の時にぼけのない像が再生されており距離変換の有効性が確認できる。

4.2 実験2 拡大・縮小変換

実験2では拡大・縮小変換を行った場合の光学再生像を確認する実験を行う。x軸、y軸に対する倍率 (R_x, R_y) を変化した場合の再生像を図6に示す。結果から、拡大・縮小変換の有効性が確認できた。

5. 評価

5.1 画質の評価

ここでは距離変換の再生像の画質について検討する。光学再生による3次元の再生像の評価が困難であるため、距離変換を用いて計算した場合と、従来手法で計算した場合でシミュ

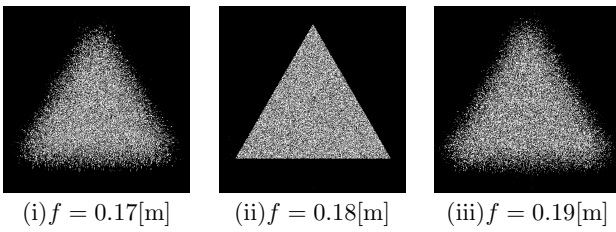


図5 距離変換 実験結果

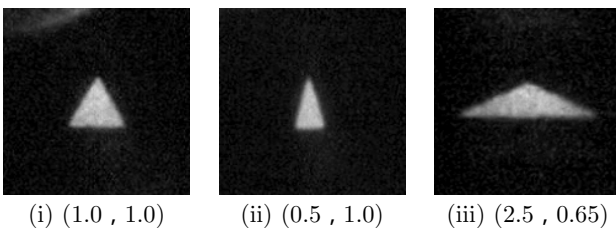


図6 拡大・縮小変換 実験結果

レーションによる再生を行い、そのPSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio)を用いて評価する。PSNRの値が高いほど本来の像に近く、一般的には30[dB]以上で実用レベルとされている。実験のパラメータは4と同様とし、図7に Δz とPSNRの関係を示す。値が不規則に変化しているのは、高周波の光波によるエイリアシング像が原因だと考えられ、十分小さなサンプリング間隔の出力媒体があれば、PSNRは全体的に高くなり、さらに不規則さも低減できると考えられる。図7から分かるように、全体として30[dB]以上のPSNRを示しており画質としては問題ないと考えられる。

5.2 計算時間の評価

ここでは各変換の計算時間を表1に、従来のパッチモデルとの計算量、計算時間の比較を表2に示す。この手法の計算時間はすべての変換を施した場合の計算時間で、変換が減れば計算時間も減少する。従来手法の計算時間は、FFT、伝播計算、傾斜変換、IFFT(Inverse FFT)を施したものとしている。この結果より、従来手法では不可能な拡大・縮小変換をしなければ約2倍、拡大・縮小変換をしても1.5倍程度の高速化が実現できた。

6. まとめ

フレネル領域での有効性を確認するとともに、画質についても考察した。また、拡大・縮小変換の光学再生像を確認した。この手法では、ピクセル数が増えても従来手法に比べて計算時間が増加しにくいという特徴があるので、将来的に出力媒体が進歩し、ホログラムのピクセル数が増加すれば従来手法に比べてより高速計算できるといった特徴がある。今後、さらに高速化するとともに、理論的な変換の限界、光学再生による3次元の再生像の画質の評価の検討が必要である。

参考文献

- [1] 久保田敏弘, “ホログラフィー入門 -原理と実際-”, 朝倉書店, 1995
- [2] 坂本, 長尾, “パッチモデルを用いた計算機合成フーリエ変換ホログラムの高速計算法”, 電子情報通信学会論文誌, C, Vol. J85-C, No.3, pp.150-157 (2002)
- [3] 松島, H.Schimmel, F.Wyrowski, “波面展開法を用いた物体光波の合成”, 3次元画像コンファレンス 2001, pp.379-381(2001)