

INDANE法を用いたホログラムからの数値再生像のダイナミックレンジ圧縮 Dynamic Range Compression for Numerical Reconstruction of Holographic Images using the INDANE Method

下馬場 朋禄* 伊藤 智義†

Tomoyoshi Shimobaba Tomoyoshi Ito

1. はじめに

ホログラフィは物体の3次元情報をホログラムと呼ばれる画像上に記録し、そのホログラム画像から記録された3次元情報を再生できる技術である。

この技術の応用分野は多岐に渡るが、その一例として、CCD (Charge Coupled Device Image Sensor) などで物体のホログラムを電子的に撮影し、コンピュータを用いて光波伝播を計算することで、ホログラムに記録されている物体の3次元情報をコンピュータ内に再現できる技術 (デジタルホログラフィと呼ばれる) [1] や、理想的な3次元ディスプレイ (電子ホログラフィックディスプレイと呼ばれる) の構築を目指す研究が行われている。

電子ホログラフィックディスプレイに関して、その光学系の最適な配置や再生像などを事前にコンピュータで検討を行うCAD (Computer-Aided Design) システム [2] の開発が試みられている。このようなCADシステムやデジタルホログラフィではホログラムから光波伝播を計算し、ホログラムに記録された3次元情報の再生像をディスプレイ上に表示する必要がある。

一般に、ホログラムからの再生像は非常に大きなダイナミックレンジ (本研究では 10^{10} 程度) を持つが、その再生像をCRTやLCDなどの低ダイナミックレンジ (10^3 程度) なディスプレイ上に適切に表示するためには、再生像のダイナミックレンジ圧縮を行う必要がある。

ダイナミックレンジの圧縮法で最も簡単なものとして、線形変換や対数変換などが考えられるが、これらの手法では再生像中の輝度の強い部分のみが表示され、輝度の弱い部分の詳細な情報が失われたり、輝度の弱い部分と強い部分の再現はできるが再生像全体が白く低コントラストな画像になる等の問題がある。

そこで、本研究では画像に対して非線形変換を行い、画像中の輝度の強い部分と弱い部分の詳細な情報を失わずにダイナミックレンジ圧縮が可能なINDANE法 (Integrated Neighborhood Dependent Approach for Non-linear Enhancement of Color Images) [3] に着目し、この手法をホログラムからの再生像に適用することで、低ダイナミックレンジなディスプレイ上に再生像を適切に表示できる手法を報告する。

2. ホログラムからの数値再生

ホログラムから数値的に再生像を得る方法について簡単に述べる。ホログラムには、実際にCCDなどを用いて電子的に撮影したホログラムや、コンピュータ内で仮想的に作成したホログラムなどを用いる。一般に、ホログラムから再生像を得るには、参照光と呼ばれる光をホ

ログラムに照射すればよい。この物理現象は回折積分で記述でき、コンピュータで回折積分の数値計算を行うことで数値的に再生像を得ることができる。本研究では、回折積分の一つであるフレネル回折積分を使用した [1]。フレネル回折積分は、

$$u(x, y) = \frac{i}{\lambda d} \exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} d) \iint h(\xi, \eta) \exp(-i \frac{\pi}{\lambda d} ((x - \xi)^2 + (y - \eta)^2)) d\xi d\eta \quad (1)$$

と表現でき、 (ξ, η) と (x, y) はそれぞれホログラムと再生像の座標を示し、 i は虚数単位、 λ は参照光波長、 d はホログラム面と再生像間の距離、 $h(\xi, \eta)$ はホログラム画像を表す。

この式は、次式のように畳み込み積分の形式で表現することができる。

$$u(x, y) = h(x, y) * \exp(-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)) \quad (2)$$

* は畳み込み積分を表す。畳み込み定理によれば、空間領域の畳み込み積分は周波数領域では積として表現できるため、式 (2) は、

$$u(x, y) = \mathcal{F}^{-1}[\mathcal{F}[h(x, y)] \cdot \mathcal{F}[\exp(-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2))]] \quad (3)$$

と書ける。ここで、 \mathcal{F} と \mathcal{F}^{-1} はそれぞれフーリエ変換と逆フーリエ変換の演算子を表す。数値再生を行う場合は計算を高速化するためにFFT (Fast Fourier Transform) を使用する。

式 (3) は複素振幅となっているので、次式のように絶対二乗を計算することで我々が観察可能な再生像 $I(x, y)$ を得ることができる。

$$I(x, y) = |u(x, y)|^2 \quad (4)$$

式 (4) を正規化した再生像を $I_n(x, y)$ とする。正規化した再生像 $I_n(x, y)$ の数値を画像化すれば、再生像をディスプレイに表示することが可能となるが、一般に $I_n(x, y)$ は非常に高いダイナミックレンジを持つため、このダイナミックレンジを圧縮することが必要となる。

3. INDANE法による数値再生像

ここでINDANE法について簡単に説明を行う [3]。始めに正規化された再生像 $I_n(x, y)$ をもとに、次式により新たに $I'_n(x, y)$ を算出する。

* 山形大学, Yamagata Univ.

† 科学技術振興機構 / 千葉大学, JST / Chiba Univ.

$$I'_n(x, y) = \frac{I_n^{0.24}(x, y) + (1 - I_n(x, y))0.5 + I_n^2(x, y)}{2} \quad (5)$$

この非線形変換で, $I_n(x, y)$ 中の輝度の弱い領域が強調され, 逆に輝度の強い領域は抑制される.

次に, 再生像 $I(x, y)$ とガウス関数 $G(x, y)$ との畳み込み積分を行う.

$$I'(x, y) = I(x, y) * G(x, y) \quad (6)$$

この畳み込み積分は, 式 (2) と同様に FFT を使用することで高速化できる. ガウス関数は,

$$G(x, y) = K \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{c^2}\right) \quad (7)$$

で定義され, ガウス関数の半径 c は実験的に決める. また, 係数 K は,

$$K = \frac{1}{\iint \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{c^2}\right) dx dy} \quad (8)$$

で決定する. 式 (6) の畳み込み積分を行うことで, 注目している座標 (x, y) のピクセル近傍の輝度情報が $I'(x, y)$ に含まれることになる.

最後に, 次式により 256 階調のグレースケール画像に変換する.

$$R(x, y) = 255 \cdot I'_n(x, y)^{r(x, y)} \quad (9)$$

$r(x, y)$ は $r(x, y) = I'(x, y)/I(x, y)$ と定義される. $r(x, y)$ が 1 より大きい場合は輝度を増大させ, 1 より小さい場合は輝度が抑制されるため, 自動的にダイナミックレンジ圧縮を行うことが可能となる.

4. 実験結果

実験を以下の方法で行った. まず, 標準画像 Lenna を物体として定義し, その情報を 1024×1024 画素のホログラムに記録する. 前述のフレネル回折に基づいて, そのホログラムから正規化された再生像 $I_n(x, y)$ を算出した.

ここでは, $I_n(x, y)$ を, 線形変換, 対数変換, INDANE 法をそれぞれ使用してダイナミックレンジ圧縮を行い, その再生像の結果を 256 階調のグレースケール画像として比較検討を行う.

図 1(a) に線形変換による再生像を示す. 線形変換は, 単純に $255 \cdot I_n(x, y)$ で実行できるが, 線形変換による再生像は図 1(a) の中央右下に四角の再生像が現れるだけで, 記録した標準画像 Lenna を再現することができない. ホログラムに記録された物体を再生するためには, ホログラムに参照光と呼ばれる光を照射する必要があるが [1], この四角はホログラムを透過した参照光を表している. 参照光は, 再生物体に比べると非常に大きな輝度を持つため, 線形変換では, 参照光のみが強調される結果となる.

図 1(b) に対数変換による再生像を示す. この変換は, $\log(I_n(x, y))$ の結果を 256 階調として表示したもので,

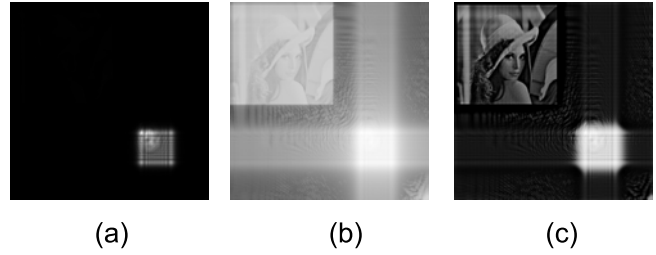


図 1: (a) 線形変換による数値再生像 (b) 対数変換による数値再生像 (c) INDANE 法を用いた数値再生像 (ガウス関数半径 $c = 1000$ の場合)

参照光 (図 1(b) の中央右下) と再生物体 (図 1(b) の中央左上) のどちらも再現できているが, 対数を使用しているため, 全体的に白みがかかりコントラストの低い画像となる.

図 1(c) に INDANE 法による再生像を示す. この再生像では, 参照光と再生物体のどちらも細部に渡り再現ができており, ダイナミックレンジ圧縮が適切に実行されていることがわかる.

5. まとめ

本研究では, ダイナミックレンジの大きなホログラムからの数値再生像を, 低ダイナミックレンジのデバイス上に適切に表示するため INDANE 法による手法を提案した. その結果, 線形変換や対数変換を用いた従来手法に比べ, 細部にわたり再現可能でコントラストのある再生像を表示することが可能となり, 本手法の有効性を確認することができた. 今後の課題として, 現在実験的に決定しているガウス関数半径を適応的に決定する手法や, INDANE 法の処理にかかる計算時間の短縮化などが挙げられる. 本研究の一部は, 文部科学省科学研究費補助金若手研究 (B) (課題番号 19700082) による補助のもとで行われた.

参考文献

- [1] U.Schnars and W.Jueptner : Digital Holography - Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques, Springer (2005).
- [2] 三浦潤也, 下馬場朋禄 : 電子ホログラフィックディスプレイの構築を支援する CAD ツールの開発, 平成 18 年度第 6 回情報処理学会東北支部研究会, 06-6-C4-1 (2007).
- [3] Li Tao and Vijayan Asari : An Integrated Neighborhood Dependent Approach for Nonlinear Enhancement of Color Images, International Conference for Information Technology Coding and Computing (ITCC'04), Vol.2, pp.138-139 (2004).