

複数の 2 次元情報を保持する 3 次元物体の 光暗号化技術への応用

Application of the 3D volume including plural 2D patterns to optical encryption

平山 竜士†

中山 弘敬†

白木 厚司††

角江 崇†

Ryuji HIRAYAMA, Hirotaka NAKAYAMA, Atsushi SHIRAKI, Takashi KAKUE,

下馬場 朋禄†

増田 信之†

伊藤 智義†

Tomoyoshi SHIMOBABA, Nobuyuki MASUDA, Tomoyoshi ITO

1. まえがき

図 1 は 3 つの 2 次元情報を 1 つのオブジェクトに記録したもので、投影する方向によって“X”、“Y”、“Z”の 3 つのパターンが視認できるように設計されたものである。このような物体は固有値問題の解を求めることで設計可能であるが、記録できるパターンの組み合わせが限られていて、記録枚数にも制限がある。しかし記録する情報に階調を持たせることによって、それらの制限をはずすことに成功した[1-3]。

この手法を用いて試作を行った例を図 2 に示す。3D クリスタルと呼ばれる透明なガラスに、3 枚の女性の写真を元画像として記録した。この手法を用いて作製されたオブジェクトには、記録された 2 次元情報は決められた投影方向からのみ視認することができ、それ以外の方向からは何も意味を持たない情報しか投影されないという特徴を持つ。この特徴は、2 次元情報の暗号化に利用できると考えられる。そこで本研究では、この手法と光暗号化技術を組み合わせることで、新たな暗号化技術を開発することを目的として研究を行った。

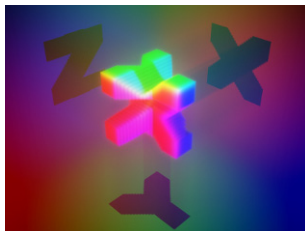
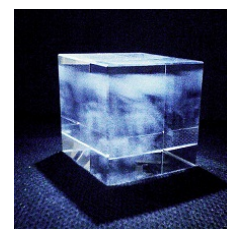
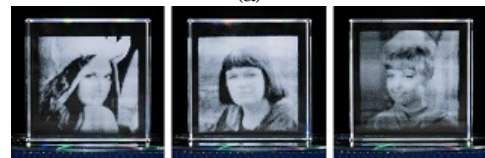


図 1 “X”、“Y”、“Z”の 3 パターンを記録した物体



(a)



(b)

図 2 試作したクリスタル

(a)全体像 (b)各面への投影パターン

2. 複数の 2 次元情報を記録する手法

ここでは、複数の 2 次元情報を持つオブジェクトを設計するアルゴリズムについて述べる。この手法を用いれば任意の n 個の 2 次元情報を記録することが可能であるが、まずは 3 つの 2 次元情報を記録する場合について考える。記録元となる 2 次元情報を、図 3 に示すように A, B, C とする。これは例えばビットマップのような画像ファイルでよい。 A, B, C 各画像上にある画素値を a_{ij}, b_{kj}, c_{ik} とする。これら 3 つの画像を記録する空間を図 4 に示すように格子状の立方体とする。この立方体からの Z 軸, X 軸, Y 軸方向への投影パターンがそれぞれ A, B, C となる。図中の赤枠は記録元のパターンを仮想的に配置したものである。この立方体のボクセルごとの濃度 D (図中の青い部分の濃度) を次のようにして求める。

$$D_{ijk} = \lambda a_{ij} b_{kj} c_{ik} \quad (1)$$

ここで、 λ は定数であり a_{ij}, b_{kj}, c_{ik} は D のボクセルの

†千葉大学大学院工学研究科

††木更津工業高等専門学校情報工学科

中心から図中の赤枠の A , B , C に降ろした垂線との交点の画素値を表す. この計算をすべてのボクセルに対して行うと, 3つのパターンをオブジェクトに記録することができる. n 個の 2 次元情報を記録する場合も同様に行う. まず, 計算したい場所から投影軸方向に仮想的に配置した n 個の 2 次元情報に, それぞれ垂線を降ろす. その線との交点の画素値を掛け合わせることによって濃度を求める. すると任意の n 個の 2 次元情報を 1 つの物体に記録することが可能となる.

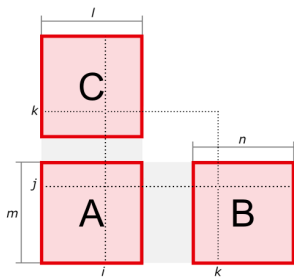


図 3 記録元となる 2 次元情報

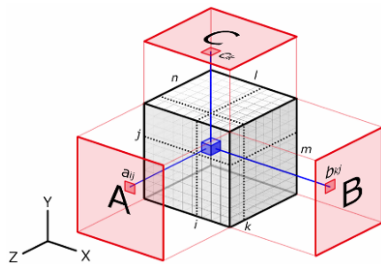


図 4 記録する格子状の立方体

3. 光の特性を利用した暗号化技術

光の特性を利用した暗号化技術として, 二重ランダム位相暗号化法や JTC (Joint Transform Correlator) を応用したシステム, フラクショナルフーリエ変換を利用したものなどさまざまな手法が提案されている. この章では, その中の 1 つで今回使用した二重ランダム位相暗号化法[4]について述べる. 二重ランダム位相暗号化法とは独立した 2 つのランダムな位相情報を用いて光学的に 2 次元情報の暗号化と復号化を行うものである. 二重ランダム位相暗号化法の光学系を図 5 に示す. ここで原画像の画素値を $f(x, y)$, 暗号化された画像の複素振幅を $\phi(x, y)$ とする. また, 1 つ目のランダム位相マスクの位相分布を $n(x, y)$, フーリエ面にある 2 つ目のランダム位相マスクの位相分布を $b(u, v)$ とする. ここで $n(x, y)$ と $b(u, v)$ は 0 から 2π ま

での範囲で, 画素ごとにランダムな値をとる. 図 5 のような光学系を作り, これに左側から光を照射すると, 暗号化された画像 $\phi(x, y)$ は次のような式で求められる.

$$\phi(x, y) = [f(x, y) \exp\{in(x, y)\}] * F^{-1}[\exp\{ib(x, y)\}] \quad (2)$$

ここで, $*$ は畳み込み演算を表す. また, 復号化する場合は右側から光を照射し, 暗号化と逆の操作をすると, 原画像を得ることができる. このとき, 2 つのランダム位相マスクが複合化の鍵となる.

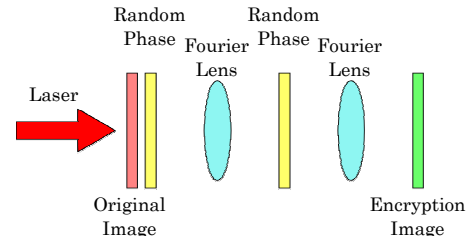


図 5 二重ランダム位相暗号化法

4. 新たな光暗号化システム

ここでは, 2 節で述べた複数の 2 次元情報を記録する手法を用いて作製したオブジェクトを, 二重ランダム位相暗号化法に応用する方法について述べる.

図 2 のような複数の 2 次元情報を保持する結晶を作製する場合, (1)式で求められる各ボクセルの濃度はそのボクセルに打つ点の濃度で表される. つまりこの結晶は小さな点の集まりとみなすことができる. そこで図 6 のような光学系を考える. 図 5 に配置した原画像の代わりに結晶を構成する点の集合を, 図 6 のように 1 つ目のランダム位相マスクから任意の距離を離れた場所に配置する. そして従来の二重ランダム位相暗号化法と同様に左側から光をあてると, 点の集まりにあたった光は回折を起こすので 1 つ目のランダム位相マスクの直前で複素振幅は回折計算によって求められる. そして, 従来のダブルランダム位相暗号化方式と同様に, 2 つのランダム位相を用いて暗号化を行う.

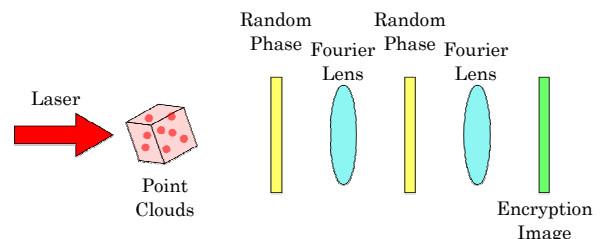


図 6 新しい光暗号化法

このようにして得られた暗号化画像から、図 7 のように暗号化と逆の手順を踏むことによって復号化を行う。元データとして用いた点群は奥行き方向にも情報を持っている。したがって図 7 のように奥行き方向の深さを変えて光強度を計算し、2 次元情報として記録していく。そうして得られた深さの違う複数枚の 2 次元な情報を、3 次元空間上に仮想的に一定間隔で配置する。この仮想的に配置するシミュレーションには 3DCG を用いる。するとさまざまな角度から、復号した点群を観察することが可能になり、最初に点群に記録した複数の 2 次元情報を得ることができる。

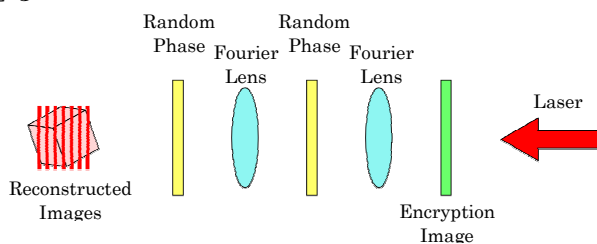


図 7 復号方法

従来の二重ランダム位相暗号化法と比べると、この複数の 2 次元情報を保持する立体を応用した二重ランダム位相暗号化システムのメリットとして以下のことがあげられる。

- ・複数の 2 次元情報を同時に記録することが可能である
 - ・ランダム位相の情報のほかに、オブジェクトの位置や投影角度の情報が鍵となるので頑健性が増す
- またデメリットとしては次のことがあげられる。
- ・復号画像の画質の低下
 - ・計算量の増大

しかし計算量の増大は、復号化の場合にもあてはまるもので、暗号としてはより強固になっているとも考えられる。

5. シミュレーション結果

今回シミュレーションを行うにあたって点群のデータとしては図 1 のように、“X”、“Y”、“Z”の 3 つの文字の画像を記録したものをを用いた。記録した元画像の解像度はどれも 16×16 ピクセルで、点の総数は 1099 点である。この点群からそれぞれの投影軸への投影パターンをそれぞれ図 8 に示す。

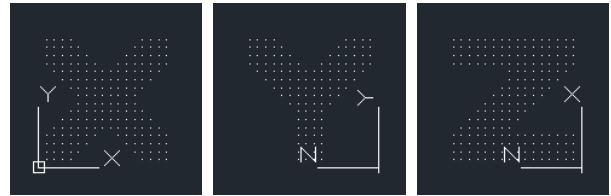


図 8 元データの点群からの投影パターン

この点群を図 6 に示す方法を用いて暗号化した画像を図 9(a),(b)に示す。暗号化を行うときに点群を奥行き方向に引き伸ばしている。これは、光の情報は縦や横方向には細かい精度を持つことができるが、奥行き方向の情報は細かく記録できないためである。図 6 の手法で得られるのは複素振幅情報なので、その実部と虚部をそれぞれ規格化し、 1024×1024 ピクセルの画像にしたものを(a), (b)とする。このように、暗号化された画像は一見するとランダムな情報で、この画像からもとの情報“X”、“Y”、“Z”を推測することは困難である。

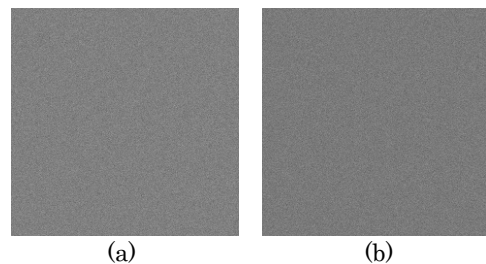


図 9 暗号化画像 (a)実部 (b)虚部

次に、暗号化した複素振幅情報を用いて復号化を行った。奥行き方向の深さを変えて光強度の計算を行い、さらに規格化を行うことによって、 1024×1024 ピクセルの画像として出力する。このとき余分な干渉光を消すために、光強度が最大値の三分の一以下の場合はすべて 0 として計算する。すると図 10 のように、深さによって異なる画像を得ることができる。

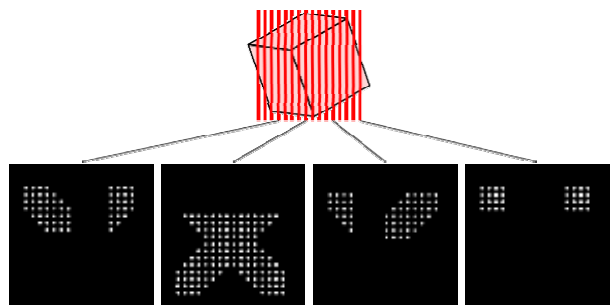


図 10 復号した複数枚の画像

こうして得られた複数枚の 2 次元画像を、3 次元空間上に仮想的に配置する 3DCG シミュレーションを行った。すると、元データと同じように、空間上に配置された点群を確認することができる。この点群からの投影パターンを図 11(a),(b)に示す。図 11(a)はそれぞれ、点群データ作成の際に決められた正しい投影角への投影パターンを示している。また、図 11(b)はそれ以外の誤った投影角への投影パターンである。図 11(a)を見ると、それぞれ“X”、“Y”、“Z”の 3 つの文字を投影していることが確認できる。しかし図 8 と比較すると、投影パターンに少しノイズが乗ってしまっていることがわかる。これは規格化したときにすべての干渉光を除去できないために発生したものである。また図 11(b)の投影パターンからは、最初に点群に記録した 2 次元情報に関する情報を得ることはできない。これにより、復号化には投影角の情報が鍵として必要であり、より頑健性が増していることが確認できる。

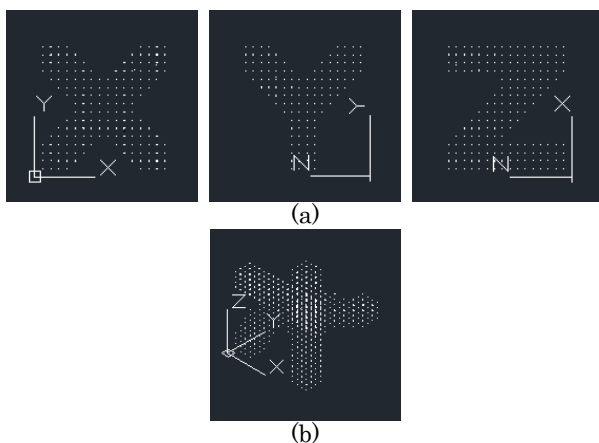


図 11 復号した点群からの投影パターン

(a)正しい投影角度から (b)それ以外の投影角度から

6. まとめと今後の展望

本研究では、3 枚の 2 次元情報を記録した点群のデータを、二重ランダム位相暗号化方式を用いた暗号化を行った。そして、その暗号化画像から再び点群のデータを復号し、そこから 3 枚の 2 次元情報を得ることに成功した。

今後の展望としては、今回は二重ランダム位相暗号化方式を用いたが、他の光暗号化方式でも試してみたい。また、4 枚、6 枚と記録する 2 次元情報の数を増やしていきたい。また、今回は計算量を減らすために少ない点数でシミュレーションを行ったが、さらに元データの点数を増やし複雑

な 2 次元情報の記録を行いたい。そのために、波面記録法 [6,7]など、計算時間を高速化するための手法を取り入れた。

謝辞

本研究は、総務省・戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE)(課題番号 09150542)、文部科学省科学研究費補助金若手研究(B) (課題番号 23700103)、及び、中島記念国際交流財団、SCAT 研究費助成金による補助のもとで行われました。深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 伊藤智義, 中山弘敬, 千葉大学 “立体画像を作成する方法” 特願 2010-232028 (2010)
- [2] 中山弘敬, 伊藤智義, “複数の投影パターンの記録を可能にする 3D クリスタルアート手法の提案” 映像学技報, 34(43), 53-56 (2010)
- [3] 白木厚司, 中山弘敬, 春名恭平, 平山竜士, 下馬場朋祿, 増田信之, 伊藤智義 “複数の 2 次元情報を内包するボリュームディスプレイ技術の開発” 生体情報処理と高度情報処理シンポジウム (2012)
- [4] P. Refregier, M. Javidi, “Optical image encryption based on input plane and Fourier plane random encoding”, Opt. Lett. 20, 767-769 (1995)
- [5] G. Situ, J. Zhang, “Double random-Phase encoding in the Fresnel domain”, Opt. Lett. 29, 1584-1586 (2004)
- [6] T. Shimobaba, N. Masuda and T. Ito, “Simple and fast calculation algorithm for computer-generated hologram with wavefront recording plane”, Opt. Lett. 34, 3133-3135 (2009)
- [7] T. Shimobaba, H. Nakayama, N. Masuda, T. Ito, “Rapid calculation of Fresnel computer generated hologram using look-up table and wavefront recording plane methods for three dimensional display”, Opt. Express, 18 19504-19509 (2010)