

直交多項式でつくる二重電子透かし A Multiple Digital Watermarking Method based on Orthogonal Polynomials

佐々木隆幸

長瀬智行

弘前大学大学院理工学研究科

弘前大学大学院理工学研究科

概要: この論文は、直交多項式を用いて1枚の画像の中に2枚の個人情報画像を埋め込む二重電子透かし画像の制作・再生方法を提案するものである。この提案には2つの考案がある。その1つは、直交多項式による画像の展開係数は広範囲に及ぶので、それを限定された画素値に書き換えるために量子化したことである。もう1つは、二重電子透かし画像をつくるため、1枚目の画像の直交多項式による展開係数と2枚目の画像の展開係数の並べ方を交互にしたことである。これらの考案をイラストや画像で例示しながら、直交多項式でつくる二重電子透かし画像の制作・再生方法を述べる。

キーワード: 二重電子透かし, 直交多項式, カギ画像, ホログラム, 量子化, 交互

1. はじめに

デジタル技術の進歩により、医療診断画像のような大きな画像を容易に伝達[1]できるようになってきた。その反面、画像をいとも簡単に盗聴や改ざんをすることができるようになり、社会的トラブルを生んでいる。そこで、個人情報画像を2枚埋め込む方法として、二重電子透かし画像の制作方法と再生方法をここに提案する。

二重電子透かし画像をつくるために採用した直交関数系は直交多項式である。電子透かし技術で用いられる直交関数系は、一般に三角関数やハル関数など超越関数に属する関数[2][3][4]が大半である。代数関数に属する直交多項式で構成される直交関数系が採用されるのは、ほぼ皆無である。そこで、直交多項式を積極的に活用した二重電子透かし画像を制作し再生することにする[5][6]。

用いる用語を以降に整理しておく。電子透かし情報として埋め込む秘匿情報を個人情報画像、その画像を直交多項式で変換した画像をホログラム、ホログラムを埋め込むために用いた日常的な画像をカギ画像、ホログラムを埋め込んだカギ画像を電子透かし画像または単に電子透かし、電子透かし画像から再生した個人情報画像を再生画像と呼ぶことにする。

併せて、電子透かし画像の制作・再生における条件を次に設定する。ホログラムをカギ画像の中に埋め込むときの割合を(ホログラム):(カギ画像)=3:13とする。画像形式はすべてBMP形式とする。画素数を N と表し、 $N=128$ とする。画像サイズはすべて 128×128 とする。画像の伸長や縮小などのスケール変換はないものとする。なお、記号 Z_{ij} は画像画面の左下から右上に数えて i 行 j 列目の画素値が Z であることを表すものとする。

2. 直交多項式の特性

N 個の点 $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$ でのみ定義される直交多項式 $P_j^{N-1}(i)$ ($j = 0, 1, 2, \dots, N-1$) は次のように表される。

$$P_j^{N-1}(i) = \sum_{k=0}^j (-1)^k \frac{1}{k!(j-k)!} \cdot \frac{(j+k)!}{k!} \cdot \frac{i!(N-1-k)!}{(N-1)!(i-k)!} \quad (1)$$

個人情報画像 A_{ij} を直交多項式 $P_j^{N-1}(i)$ で展開すると

$$A_{ij} = \sum_{m=0}^{N-1} (\sum_{n=0}^{N-1} a_{mn} P_n^{N-1}(i)) P_m^{N-1}(j) \quad (2)$$

$(m, n = 0, 1, 2, \dots, N-1)$

と書き表すことができる。ただし、式(2)の展開係数 a_{mn} は式(3)である。

$$a_{mn} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (\sum_{j=0}^{N-1} A_{ij} P_m^{N-1}(j)) P_n^{N-1}(i)}{(\sum_{j=0}^{N-1} \{P_m^{N-1}(j)\}^2) (\sum_{i=0}^{N-1} \{P_n^{N-1}(i)\}^2)} \quad (3)$$

この展開係数 a_{mn} を画素値とする画像がホログラムである。カラー画像のときは、赤色、緑色、青色の3つの展開係数で表される。

ここで、 $i = 0, 1, 2, \dots, 127$ で、 $j = 0, 1, 2, 3$ のときの直交多項式の形と、そのグラフを、それぞれ式(4)~式(7)、図1~4に示す。

$$P_0^{127}(i) = 1 \quad (4)$$

$$P_1^{127}(i) = 1 - \frac{2}{127} i \quad (5)$$

$$P_2^{127}(i) = 1 - \frac{6}{127} i + \frac{6i(i-1)}{127 \times 126} \quad (6)$$

$$P_3^{127}(i) = 1 - \frac{12}{127} i + \frac{30(i-1)}{127 \times 126} - \frac{20(i-1)(i-2)}{127 \times 126 \times 125} \quad (7)$$

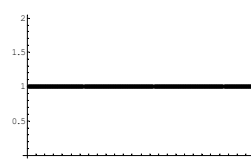


図1 $P_0^{127}(i)$ のグラフ

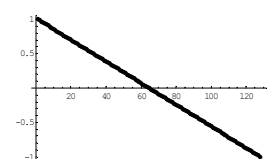


図2 $P_1^{127}(i)$ のグラフ

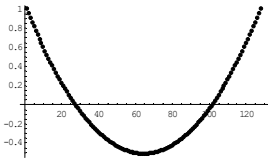


図3 $P_2^{127}(i)$ のグラフ

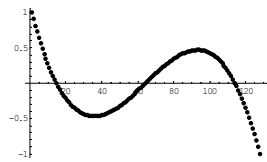


図4 $P_3^{127}(i)$ のグラフ

さらに、 $j = 64, 127$ の直交多項式 $P_{64}^{127}(i)$, $P_{127}^{127}(i)$ のグラフを図5, 図6に示す。直交多項式 $P_{127}^{127}(i)$ の最大値と最小値はそれぞれ

$P_{127}^{127}(64) \approx 1.197 \times 10^{37}$, $P_{127}^{127}(63) \approx -1.197 \times 10^{37}$ である。

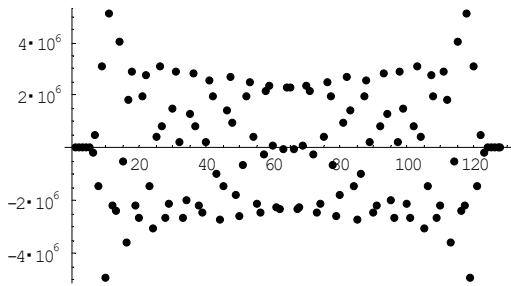


図5 $P_{64}^{127}(i)$ のグラフ

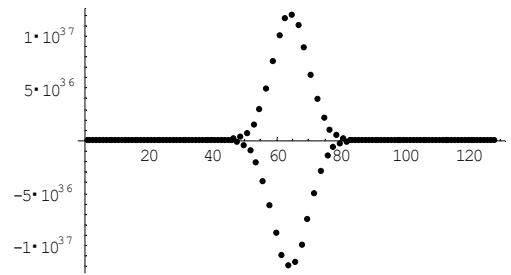


図6 $P_{127}^{127}(i)$ のグラフ

3. 二重電子透かし画像の制作と再生

3.1 制作方法

二重電子透かし画像を制作するときの過程を図7に示す。

- ① 人情報画像を2枚用意する。それらを A_{ij} , B_{ij} とする。さらに、カギ画像を1枚用意し、それを F_{ij} とする。
- ② A_{ij} の直交多項式による展開係数 a_{mn} を算出する。同じく、 B_{ij} の直交多項式による展開係数 b_{mn} を算出する。

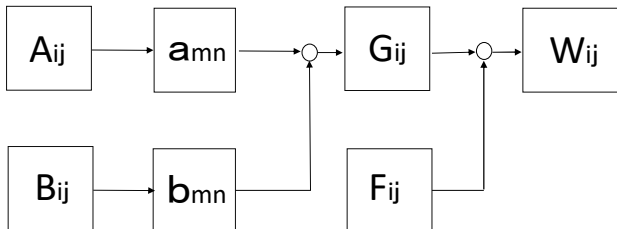


図7 二重電子透かしの制作過程

- ② 展開係数 a_{mn} , b_{mn} をそれぞれ量子化する。直交多項式の値域は、最大値が約 1.197×10^{37} , 最小値が約 -1.197×10^{37} と広範囲であり、これらを用いて算出された展開係数 a_{mn} , b_{mn} の数値も広範囲になる。一方、BMP

画像の画素値は限定された正の整数値 $0 \sim 255$ しかとれない。したがって、展開係数をホログラムとして記録するためには量子化する必要がある。

ここでは、次式に示すように展開係数 p の範囲を3つの区間に分け、画素値 q を $0 \sim 47$ の範囲に量子化する。画素値をこの範囲に制限した理由は、カギ画像に埋め込むとき、その値のまま埋め込むことができるようにしたからである。(i) $-10^3 < p \leq -10^{-13}$ のとき

$$q = \frac{23}{16}(\log_{10}(-p) + 13) + 1 \quad (8)$$

(ii) $-10^{-1} \leq p \leq 10^{-13}$ のとき

$$q = 0 \quad (9)$$

(iii) $10^{-13} \leq p \leq 10^3$ のとき

$$q = \frac{23}{16}(\log_{10}(+p) + 13) + 24 \quad (10)$$

そのグラフを図8に示す。

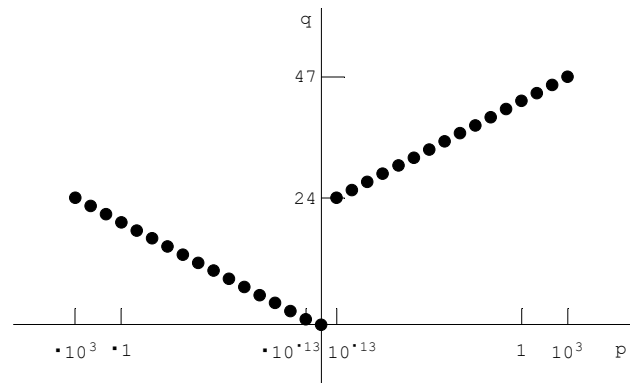


図8 式(8), (9), (10)のグラフ

④次に、量子化した展開係数 a_{mn} , b_{mn} を合成し、1枚のホログラム G_{ij} をつくる。合成方法は、図9(a)に示すように対角線より左下側にある a_{mn} (黒色点) を 128×128 の半分の個数だけ抽出する。その方法は、列番号 n を $0 \leq n \leq 63$ の範囲で順に増加させながら、行番号 m が $0 \leq m \leq 127 - n$ を満たす個数の a_{mn} を順に抽出する。さらに n を $64 \leq n \leq 126$ の範囲で順に増加させながら、 m が $0 \leq m \leq 126 - n$ を満たす個数の a_{mn} を順に抽出する。それらをホログラム G_{ij} の j が偶数の列に、最下行の1行目の左から右に順に並べる。1行目を並べ終わったら、その上の2行目の左から右に順に並べる。これを繰り返すと、図9(c)のように偶数列に a_{mn} (黒色点) が積み上がる。なお、図9(a), (b), (c)は展開係数を列 $16 \times$ 行 16 の個数で例示したものである。

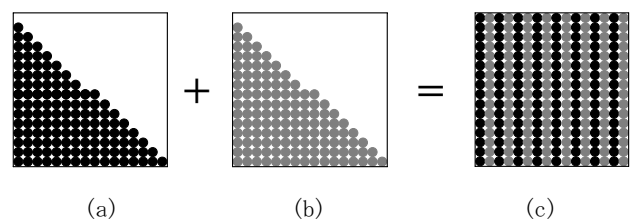


図9 展開係数 a_{mn} , b_{mn} の合成

同様に、展開係数 b_{mn} から図9(b)に示すように b_{mn} (灰色

点)を抽出し、それらを G_{ij} の j が奇数の列に、最下行の1行目の左から右に順に並べ、1行目を並べ終わったら、その上の2行目の左から右へ順に並べる。これを繰り返すと、図9(c)のように b_{mn} (灰色点)が積み上がる。以上で、画像 A_{ij} の展開係数 a_{mn} と、画像 B_{ij} の展開係数 b_{mn} を合成した二重のホログラム G_{ij} をつくることができる。

⑤最後に、ホログラム G_{ij} をカギ画像 F_{ij} の中に式(11)のように埋め込み、画素値を整数化し記録すると、二重電子透かし画像 W_{ij} を制作することができる。

$$W_{ij} = 13/16 \times F_{ij} + G_{ij} \quad (11)$$

3.2 再生方法

二重電子透かし画像を再生するときの過程を図10に示す。

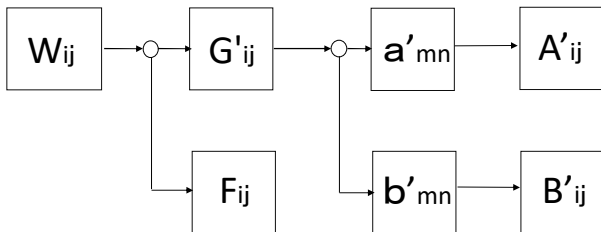


図10 二重電子透かし画像の再生過程

①二重電子透かし画像 W_{ij} からカギ画像 F_{ij} を差し引くと、ホログラム G'_{ij} が残る。このホログラムは前節3.1④のホログラムと等しくはない。それは展開係数 a_{mn} , b_{mn} が整数化されたことに因る。

②次に、図11(a)のホログラムの偶数列と奇数列の展開係数を読み取り、偶数列を図11(b)に示したように、対角線から左下側に順に配置する。同様に、奇数列の展開係数を図(c)のように配置する。これにより1枚のホログラムからそれぞれ a'_{mn} , b'_{mn} だけのホログラムに分離することができる。

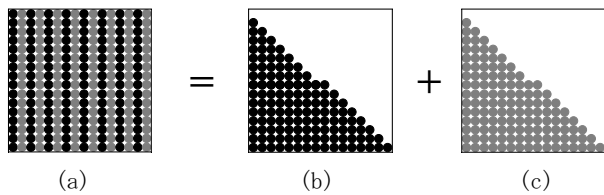


図11 展開係数 a'_{mn} , b'_{mn} の分離

③それぞれのホログラムに対して、節3.1③における量子化の逆演算を行う。

④式(2)をそれぞれの逆演算結果に適用すると、再生値 A'_{mn} , B'_{mn} を算出することができる。

⑤最後に、それぞれの再生値を再生画像として記録する。そのとき、再生値 f_{ij} に対して式(12)の処理を行い記録する。

$$\frac{f_{ij} - \min\{ij\}}{\max\{f_{ij}\} - \min\{f_{ij}\}} \times 255 \quad (12)$$

ただし、 $\max\{f_{ij}\}$, $\min\{f_{ij}\}$ はそれぞれ $\{f_{ij}\}$ の最大値、最小値とする。

4. 制作・再生の実験例

4.1 二重電子透かし画像の制作

図7に示した制作過程に制作した画像を挿入したのが図12である。大きめの画像を図12の記号とともに図13~19に示す。

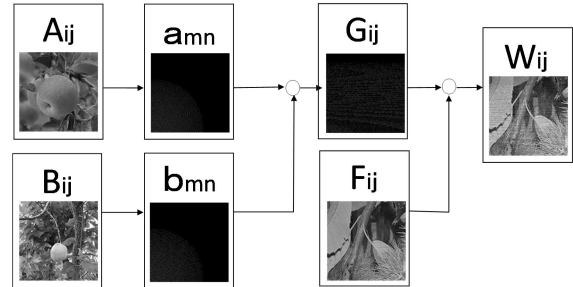


図12 二重電子透かしの制作過程(画像付加)



図13 A_{ij}

図14 B_{ij}

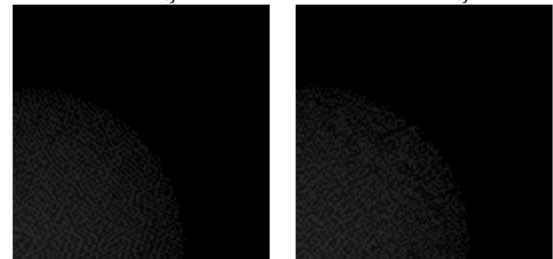


図15 a_{mn}

図16 b_{mn}

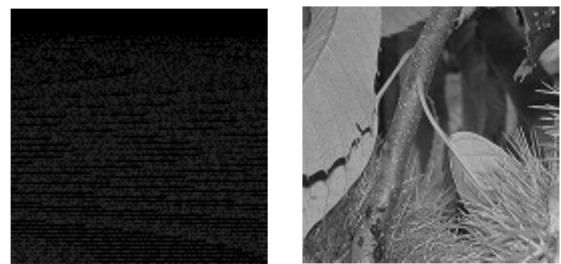


図17 G_{ij}

図18 F_{ij}



図19 W_{ij}

制作した二重電子透かし画像(図19)の中に2枚の個人

情報画像 (図 13, 14) を視覚的に認識するのは困難である。定量的な量として、制作した二重電子透かし画像とカギ画像 (図 18) の相関係数を色別に表 1 に示す。

表 1 図 19 と図 18 の色別相関係数

	赤色	緑色	青色
相関係数	0.951	0.950	0.957

4.2 二重電子透かし画像の再生

図 10 に示した再生過程に再生した画像を挿入したのが図 20 である。大きめの画像を図 20 の記号とともに図 21～25 に示す。

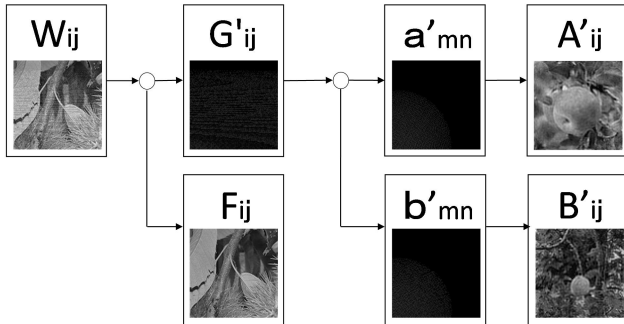


図 20 二重電子透かし画像の再生過程 (画像付加)

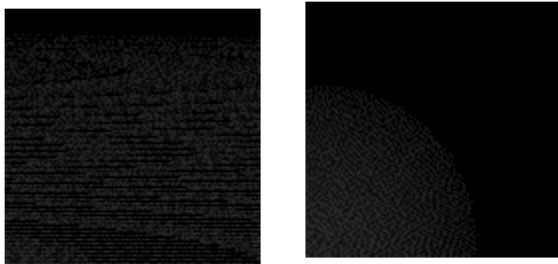


図 21 G'_{ij}

図 22 a'_{mn}

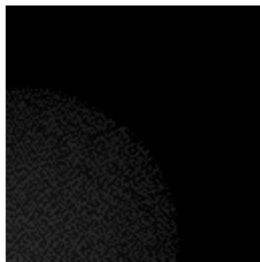


図 23 b'_{mn}



図 24 A'_{ij}

図 25 B'_{ij}

二重電子透かし画像 (図 19) 1 枚から、2 枚の個人情報画像 (図 24, 25) を個々に再生できている。図 24 と図 13 の色別相関係数、および図 25 と図 14 の色別相関係数を、それぞれ表 2, 表 3 に示す。以上のことから、直交多項式

も、超越関数に属する直交関数系と同様に、電子透かし画像に活用できることがわかる。

表 2 図 24 と図 13 の色別相関係数

	赤色	緑色	青色
相関係数	0.889	0.871	0.883

表 3 図 25 と図 14 の色別相関係数

	赤色	緑色	青色
相関係数	0.845	0.836	0.833

5. おわりに

直交多項式を用いて 1 枚の画像の中に 2 枚の個人情報画像を埋め込む二重電子透かし画像の制作・再生方法を述べてきた。その要点の 1 つは、直交多項式による広範囲の展開係数を限定された BMP 形式画素値に書き換えるための量子化したことである。もう 1 つは、二重電子透かし画像をつくるため、1 枚目の量子化画素値と 2 枚目の量子化画素値の並べ方を交互にしたことである。これはホログラムの様なランダム化に寄与している。

伝達途中の安全性について 2 つの予想を述べる。1 つは、制作した二重電子透かし画像の安全性は高いと予想できる。それは、盗聴されたとしても、送り手と受け手が共有するカギ画像をもってない盗聴者は再生することが困難となるからである。

もう 1 つは、一方の個人情報画像には直交多項式を採用し、他方の個人情報画像には直交多項式とは異なる特性の直交関数系を採用することによって、より一層に安全な二重電子透かし画像を制作できると予想する。

参考文献

- [1] U. Mustafa, U. Guzin, V. V. Nabiyev, Medical image security and EPR hiding using Shamir's secret sharing scheme, Journal of Systems and Software, 2011, Vol.84, No.3, pp.341-353
- [2] 大西淳二, 小野東, 電子透かしを用いた印刷の改ざん検知方法の検討, 電子情報通信学会論文誌 D, 2007, Vol. j90-D, No. 6, pp. 1484-1494
- [3] 木野将人, 和田成夫, ビットデータを埋込み可能なウェーブレット画像透かし法, 電子情報通信学会論文誌 A, 2003, Vol. J86-A, No. 2, pp. 160-167
- [4] 栗林稔, 田中初一, DCT 係数間の加法特性に基づく電子透かし, 電子情報通信学会論文誌 A, 2002, Vol. J85-A No. 3 pp. 322-333
- [5] 佐々木隆幸, 2 枚の電子透かし情報画像を埋め込んだ電子透かしの制作と復元, 特許庁, 2016, 特願 2016-217619
- [6] S. Alyammahi, F. Taher, H. Al-Ahmad, T. McGloughlin, A New Multiple Watermarking Scheme for Copyright Protection and Image Authentication, IEEE 59th International Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2016