

377.5

K-11

1-78-1

学位論文

誤差拡散法による計算機ホログラムからの
像再生に関する研究

田 中 賢 一



目次

1 緒論	1
2 誤差拡散法の原理	10
3 ラスタ走査による誤差拡散法	13
3.1 緒言	13
3.2 誤差拡散法の適用	15
3.3 計算機シミュレーション	19
3.3.1 拡散係数に対する効果	19
3.3.2 再生像の定量評価	21
3.3.3 種々の表示方式との比較	24
3.4 光学再生実験	28
3.5 結言	31
4 ペアノ走査による誤差拡散法	32
4.1 緒言	32
4.2 ペアノ走査	33

4.3	ペアノ走査の適用	37
4.4	計算機シミュレーション	39
4.4.1	拡散係数に対する効果	41
4.4.2	ラスタ走査との再生像の比較	44
4.5	結 言	46
5	エッジ強調誤差拡散法	49
5.1	緒 言	49
5.2	エッジ強調誤差拡散法の原理	50
5.3	ハーフトーン処理への適用	52
5.4	計算機プログラムへの適用	64
5.5	結 言	76
6	3次元像再生シミュレーション	78
6.1	緒 言	78
6.2	数値的像再生理論	79
6.2.1	3次元物体再生計算機プログラム	79
6.2.2	回折理論による再生像の解析	80
6.3	計算機シミュレーションと光学再生実験	83
6.4	結 言	91
7	3次元像再生への誤差拡散法	93

7.1	緒言	93
7.2	3次元物体再生計算機プログラムへの適用	94
7.3	計算機シミュレーション	97
7.3.1	拡散係数に対する効果	97
7.3.2	種々の表示方式との比較	104
7.4	光学再生実験	107
7.5	結言	108
8	結論	111
	参考文献	118
	謝辞	126
A	付録	127
A.1	ラスタ走査を用いた場合の再生像について	127
A.2	ペアノ走査を用いた場合の再生像について	132
A.3	エッジ強調誤差拡散法を用いた場合の再生像について	133
A.4	Hauck-Bryngdahl の第1の係数の再生像	137
A.5	Brown-Lohmann の方法と尾上-金子の方法について	141

第 1 章

緒 論

本論文では、3次元画像表示のための基礎技術の一つである計算機ホログラムの像再生について述べる。

画像表示技術は、再生する像の次元で大別すると、2次元と3次元とがある。2次元画像表示についてみると、写真、印刷ならびにテレビジョンなどのように多くの技術が既に实用レベルにあり社会生活に大きく貢献している。3次元画像表示技術についてみると、2眼式立体画像と3次元画像とに分類される [1]。2眼式立体画像は、左右の眼に異なる画像をそれぞれ与えることによって立体感を与えるものであるが、視覚としてとらえるためには立体鏡 [2] や眼鏡など物理的な道具を必要とし、視点を左右に動かしても回り込んだ側面の有様は観測できない。3次元画像と呼ばれるものは、空間のある場所に物体の再生像が浮かび上がって見えるものであり、視点を左右に動かせば回り込んだ側面の有様も観測される。そのなかで、「ある平面上に存在した波面をその平面において記録媒体に収める技術」であるホログラフィは、両眼視差と輻輳だけではなく、眼の調節にも矛盾がない立体感を与える技術として知られている。ホログラムは、参照波と物体波とを干渉させ、その干渉縞を記録媒体に収めることによって作製される [3]～[6]。しかし、再生しようとする物

体が実在しない場合や、レーザ光を照射することの困難な物体である場合は、ホログラムが作製できない。

計算機ホログラムは、2 光束干渉の方法でホログラムを作製することの困難な物体（例えば、強力なレーザ光を照射することのできない物体ならびに3 次元的な架空の物体など）を再生しようとする目的で開発された [7]~[10]。この計算機ホログラムは、レーザ光のパワーやコヒーレンス、光学系の振動などの諸問題を考慮する必要がないため、ホログラムの量産化や動画化 [11] などに便利な方法となると考えることができる。また、画像改善やマッチドフィルタリングなどのための空間フィルタ [12]、表面計測 [13] などにも応用が可能である。

計算機ホログラムは、ホログラムパターンを計算する際に適当な参照光を仮定し、2 次元振幅ホログラムを計算機上で作製するものである。描写方式の観点から計算機ホログラムを分類すると概ね3 種類となる。すなわち、参照波法による計算機ホログラム、デトア位相法による計算機ホログラムならびに位相量子化した計算機ホログラムである。

参照波法 [8], [9] は、2 次元振幅ホログラムのパターンを忠実に描写するものである。振幅変化は透過率変化によって与えられ、位相変化は格子間隔によって与えられる。しかしながら、この方法による計算機ホログラムを合成し、かつ合成されたホログラムパターンを描写することは、実際には容易ではない。その理由は、振幅透過率の変化を与える際の微妙な中間調をつくるのが困難であることによる。

デトア位相法によるフーリエ変換型の計算機ホログラムは、まずホログラム全面を多数の微小正方形要素（セル）に分解し、各セル中に1 個の開口を設け、その開口の形状、面

積，位置を変調することにより，ホログラム面上における再生波面の複素振幅を記録したものである．デトア位相法に関しては，1960年代後半に Brown-Lohmann[7] によって提案されて以来，非常に多くの報告がなされてきている [10], [14]～[17]．デトア位相法による計算機ホログラムは，白黒2値のパターンとして表示されるため中間調を必要とせず*，参照波法と比較してホログラムの作製が容易となる．しかしながら，ホログラムパターンを表示するためには非常に多くの画素を必要とするため，グラフィックディスプレイなどの解像度に対する制約が大きいという問題がある．

位相量子化した計算機ホログラム [18], [20], [22] は，振幅の値を一定とし，位相成分だけを表すものである．この方法を用いると，再生効率が非常に高くなる．位相成分の量子化数が3以上のものは，キノフォーム [20] と呼ばれているが，パターン描写の際に中間調を必要とするため，作製が困難となる．もし，量子化数が2となれば，1つのサンプル点に対して1つの画素が対応しかつ中間調を必要としないため，ホログラムパターンの表示は非常に容易となる．

本論文では，以上に示したようにホログラムパターン表示の容易さから，2値に位相量子化した計算機ホログラムを対象としている．この2値に位相量子化した計算機ホログラムは，仮想物体の像再生のみならずインターコネクション [19] やパターン認識のフィルタ [22], [23] などにも応用されている．像再生の観点から見ると，計算機ホログラムは，少ない画素数で容易にホログラムパターンが表示でき，かつ良質な再生像を得られるものであ

*Ichioka-Izumi-Suzuki[15] によって提案されたグレイホログラムは，白黒2値だけではなく中間調もホログラムパターンの表示に必要なため，ハーフトーンプロッタを必要とする．しかしながら，このようにハーフトーンプロッタを必要とする計算機ホログラムの表示方式は現在のところ非常に少ない．

像に悪影響を及ぼしてしまう。従って、量子化誤差による再生像への悪影響を緩和することが重要な課題となる。

計算機ホログラムの再生像の改善法はいくつか存在するが、繰返し法と誤差拡散法とに分けられる。繰返し法 [24]~[29] は、フーリエ変換とフーリエ逆変換を交互に用いながら補正を加えていくフーリエ反復アルゴリズム [30] を用いる方法である。この方法は入力物体に加える位相の最適化という観点においては有効であるが、非常に多くの回数の2次元離散フーリエ変換を行うために膨大な計算量を要するという問題がある。誤差拡散法は、量子化誤差を隣接する画素に繰り込んでゆくものであり、1回の処理で良好な再生像を期待できる方法である。また、誤差拡散法は、デジタルハーフトーン処理 [31] においてはディザ法 [32]~[37] などと比較して画質の主観的評価が高くなることが知られている方法である [38]。

ところで、従来の計算機ホログラムに対する誤差拡散法は、振幅量子化すなわち複素数の振幅ならびに位相の双方を量子化した場合 [39]~[41] や、3値以上の位相量子化 [18] についてだけ、その性質が知られているにすぎない。すなわち、ラスタ走査を用いた場合に拡散係数を有する方向と直交するように拡散された雑音が発生し物体と雑音とが分離されること [18], [39], [40]、確率論的に最適な拡散係数が導出されること [41] がそれぞれ知られているにすぎない。従って、2値に位相量子化した計算機ホログラムに対しては、誤差拡散法の性質をより詳細に解明してゆく必要がある。

誤差拡散法を、2値に位相量子化した計算機ホログラムに対して適用すると、少ない画素数で、また1回のフーリエ変換と1回の量子化の処理によってホログラムを作製するこ

とが可能となり、しかも良質な再生像となることが期待できる。しかしながら、誤差拡散法を適用する際に問題となってくる点は以下の通りである：

1. 2 値に位相量子化した計算機ホログラムへの誤差拡散法の有効性.
2. 誤差拡散法の走査に対する影響.
3. 誤差拡散法のアルゴリズムにおけるしきい値の影響.
4. 計算機ホログラムの最終的な作製目的のひとつである 3 次元像再生への拡張.

以上の問題点を解明することにより、2 値に位相量子化した計算機ホログラムに対する誤差拡散法の有効性を明らかにする。

第 1 の問題について、本論文では、2 値に位相量子化した計算機ホログラムにラスタ走査による誤差拡散法を適用した場合における再生像改善についての有効性を計算機シミュレーションにより検討し、他の表示方式と比較して優れた再生像であることを示す。

第 2 の問題について、誤差拡散法の走査としてペアノ走査を用いた場合のほうが、ラスタ走査に比較して優れた再生像を得ることができることを示す。なお、それ以外の走査、例えば往復走査、らせん走査、モルトン走査については第 3 の問題を検討する際に併せて検討する。

第 3 の問題について、エッジ強調誤差拡散法を適用した場合について、エッジ強調誤差拡散法の有効性を走査や強調係数の観点から検討する。

第 4 の問題について、3 次元物体を再生する計算機ホログラムを数値シミュレーションによって再生する方法について述べ、3 次元物体を再生する断層タイプの計算機ホログラ

ムに誤差拡散法を拡張できることを示す。

本論文の意義は、上記の四つの問題点について、(1)2値に位相量子化した計算機ホログラムに対する誤差拡散法の導入は初めてなされたものであり、誤差拡散法が表示方式と比較して優れた再生像を与える方式であることを示したこと、(2)誤差拡散法における走査に関する一指針を与えたこと、(3)誤差拡散法におけるしきい値を入力データの値によって変化させるエッジ強調誤差拡散法を導入することで、更なる再生像改善を可能としたこと、(4)3次元像再生のシミュレーションを実現し、誤差拡散法を3次元像再生に対して拡張した点である。

本論文の構成を以下に示す。

第2章では、誤差拡散法の原理について述べる。誤差拡散法とは、量子化を行う際に発生する誤差（量子化誤差）を、隣接する未量子化画素に重みをつけて拡散する方式である。ここでは、1次元モデルを用いて誤差拡散法の原理を述べる。

第3章では、ラスト走査による誤差拡散法を適用した場合について検討する。まず、第2章で述べた誤差拡散法を計算機ホログラムの合成に対してどのように適用するかを述べる。次に、計算機シミュレーションによって再生像の検討を行う。すなわち、2次元誤差拡散の重み付けである拡散係数に対する再生像の改善効果について検討し、誤差拡散法と種々の表示方式とをホログラムパターンの表示画素数を同一とする条件の下で再生像の比較し、誤差拡散法の有効性について述べる。更に、光学再生実験を行い、計算機シミュレーションの結果の確認を行う。

第4章では、ピアノ走査による誤差拡散法を適用した場合について検討する。まず、ペ

ピアノ走査について述べ、ピアノ走査による誤差拡散法の計算機プログラムへの適用の方法について述べる。また、計算機シミュレーションによって再生像の検討を行う。すなわち、ピアノ走査による誤差拡散法における拡散係数に対する計算機プログラム再生像の改善効果について検討し、ピアノ走査による誤差拡散法の再生像とラスタ走査による誤差拡散法の再生像との比較を行い、ピアノ走査による誤差拡散法の有効性について述べる。

第5章では、エッジ強調誤差拡散法を適用した場合について検討する。まず、エッジ強調誤差拡散法の原理を述べる。次に、ハーフトーン処理に対してエッジ強調誤差拡散法を適用した場合における効果について述べる。エッジ強調誤差拡散法の走査に対する効果としてラスタ走査ならびにピアノ走査を用いた場合の効果について検討し、エッジ強調誤差拡散法における強調係数に対する効果について検討する。更に、計算機プログラムに対してエッジ強調誤差拡散法を適用した場合に対する効果について述べる。5種類の走査すなわちラスタ走査、往復走査、らせん走査、モルトン走査ならびにピアノ走査に対する効果ならびにエッジ強調誤差拡散法における強調係数に対する効果を計算機シミュレーションによって検討する。

第6章では、3次元像再生シミュレーションの方法について述べる。これは、前述の2次元物体再生計算機プログラムの考察を3次元物体再生プログラムに拡張するためのものである。まず、3次元物体再生計算機プログラムの合成法について述べる。次に、回折理論を用いて、再生像の結像に関する解析を行い、計算機シミュレーションの実現法について述べる。また、計算機シミュレーションと光学再生実験とを行い、計算機シミュレーションの妥当性について示す。更に、計算機シミュレーションを用いた再生像の検討の一例と

して、デトア位相法による3次元物体再生計算機ホログラムの表示方式に対する再生像の比較を行う。

第7章では、3次元物体再生ホログラムに対して誤差拡散法を適用する。まず、誤差拡散法による3次元物体再生計算機ホログラムの合成法について述べる。次に、第6章で述べた計算機シミュレーションを用いて再生像の検討をする。拡散係数ならびに表示方式に対する効果について検討し、誤差拡散法の3次元像再生に対する有効性を示す。更に、光学再生実験を行い、再生像の確認を行う。

第8章では、本研究によって得られた成果をまとめ、今後の課題ならびに展望について述べる。

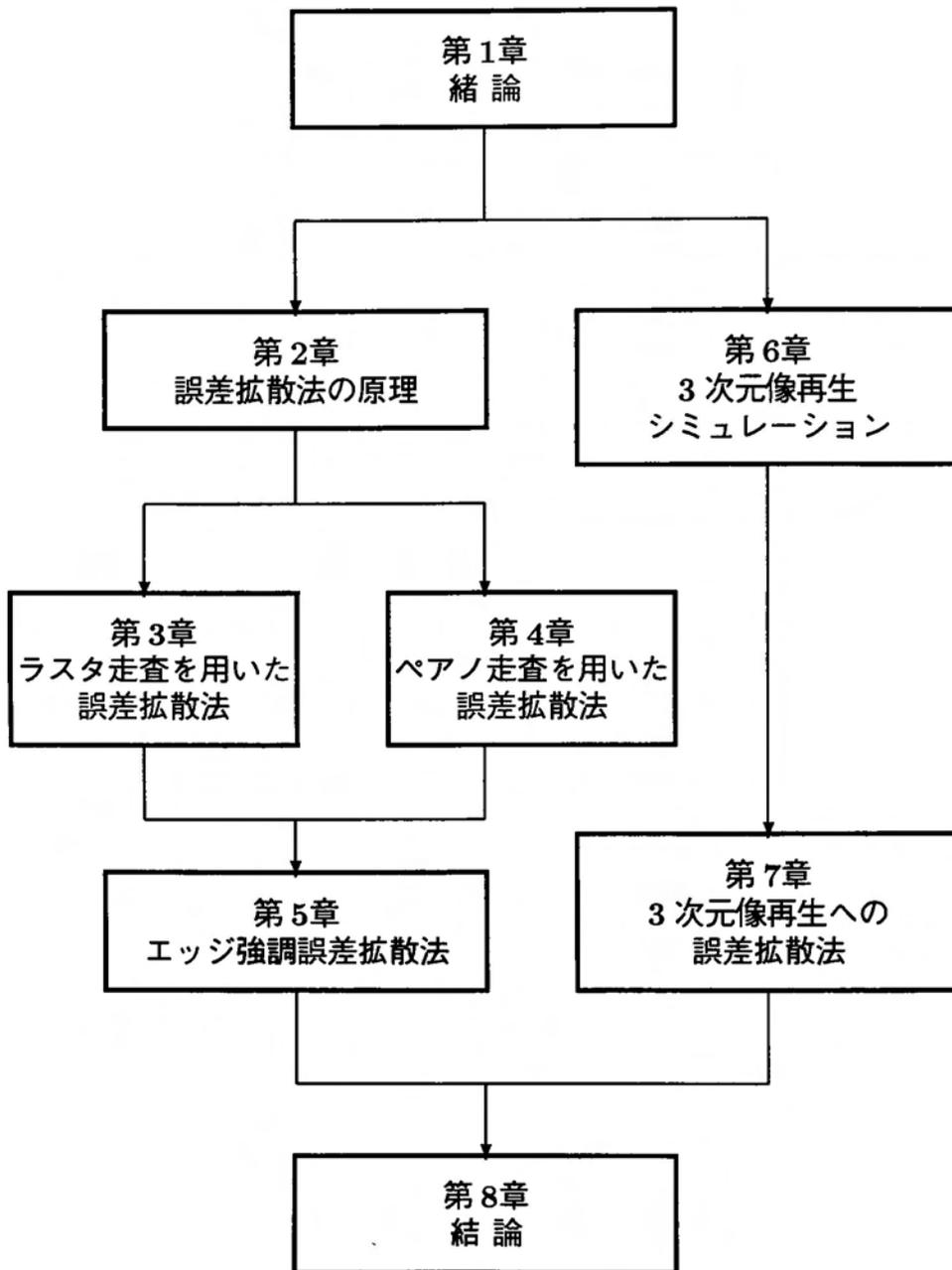


図 1.1: 本論文の構成

第 2 章

誤差拡散法の原理

本章では、誤差拡散法 [31] の概念を簡単に示すため、1次元での一般的な誤差拡散法のアルゴリズムについて説明する。

誤差拡散法の基本概念を図 2.1 に示す。データ $x(n)$ は、 n が 0 から $N - 1$ までの N 個存在するものとする。また、 $x(n)$ は -1 から $+1$ の範囲の値をとるものとする。

まず、 $n = 0$ におけるデータ $x(0)$ を読み込む。量子化誤差を付加した値 $g(0)$ は $n = -1$ にデータが存在せず、量子化誤差 $s(-1)$ も存在しないことから次式で与えられる。

$$g(0) = x(0) \tag{2.1}$$

この $g(0)$ の値をしきい値 (ここでは 0) と比較して次式のように量子化する。

$$H(0) = 2\theta[g(0)] - 1 \tag{2.2}$$

但し、 H は量子化された値であり、 θ は次式で示されるヘビサイドの θ 関数である。

$$\theta[g(0)] = \begin{cases} 1 & (g(0) \geq 0) \\ 0 & (g(0) < 0) \end{cases} \tag{2.3}$$

このとき $g(0)$ と $H(0)$ との間に発生する量子化誤差 $s(0)$ は次式で与えられる。

$$s(0) = g(0) - H(0) \quad (2.4)$$

次に、 $n = 0$ において発生した量子化誤差 $s(0)$ を $n = 1$ のデータに拡散する。このとき誤差拡散を受けた $n = 1$ のデータは次式で与えられる。

$$g(1) = s(0) + x(1) \quad (2.5)$$

この $g(1)$ の値をしきい値と比較して次式のように量子化する

$$H(1) = 2\theta[g(1)] - 1 \quad (2.6)$$

ここで、 $n = 1$ における量子化誤差 $s(1)$ は次式で与えられる。

$$s(1) = g(1) - H(1) \quad (2.7)$$

同様にして、全てのデータにわたって順次誤差を拡散させながら量子化し、出力量子化列 $\{H(n)\}$ を求める。

一般に、 k 番目における誤差拡散のアルゴリズムは式 (2.8)～(2.10) で表せる。

$$g(k) = s(k-1) + x(k) \quad (2.8)$$

$$H(k) = 2\theta[g(k)] - 1 \quad (2.9)$$

$$s(k) = g(k) - H(k) \quad (2.10)$$

以上、誤差拡散法の原理について述べた。この誤差拡散法の効果については、次章以降で論じる。

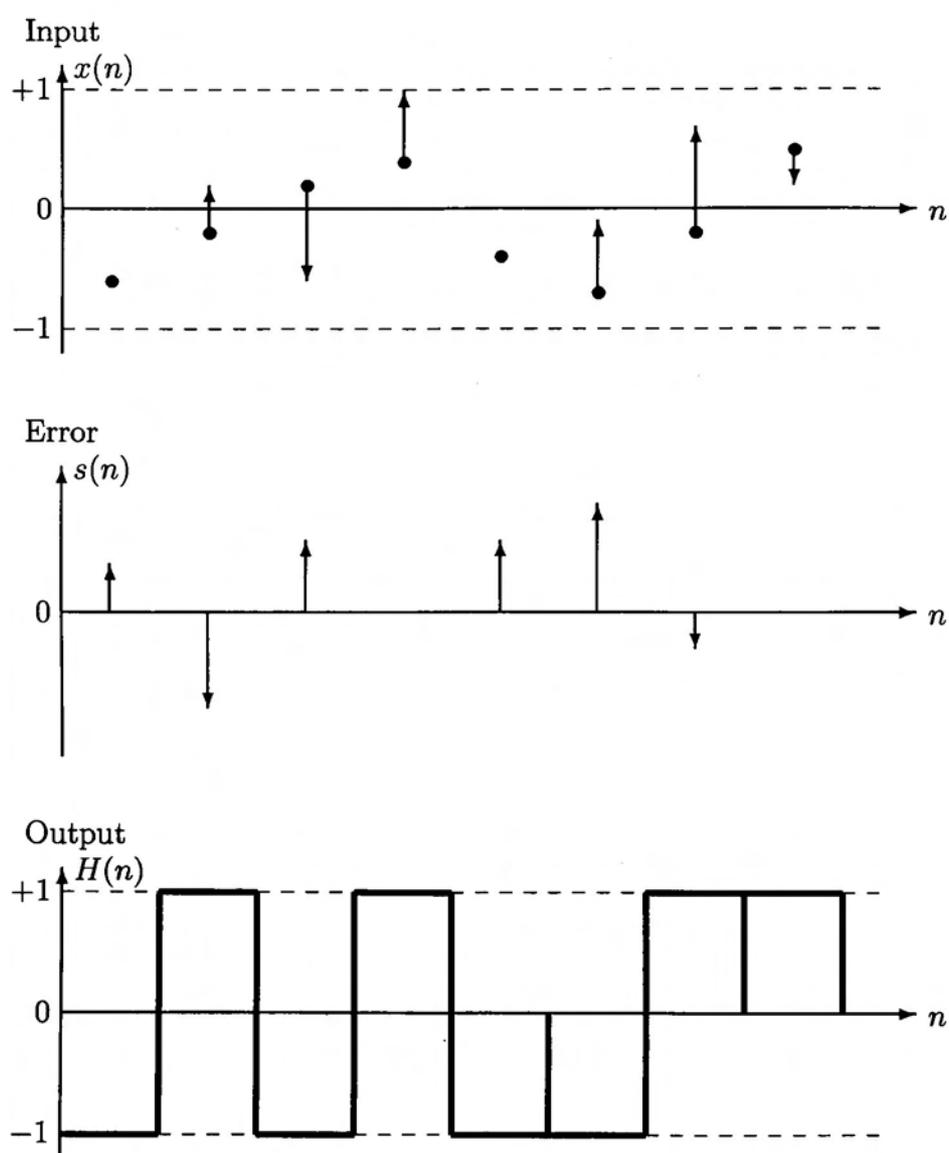


図 2.1: 誤差拡散法の基本概念

第 3 章

ラスト走査による誤差拡散法

3.1 緒 言

計算機ホログラムは、多くの場合プリンタへの表示が容易となるように白黒 2 値表示の方式がとられている。例えば、デトア位相法すなわち代表的な Brown-Lohmann[7] の方法および Lee の方法 [14] は、計算機ホログラムのパターン表示の際、1 つのサンプル点の複素数値を表示するために多数の画素を必要とする。このため、サンプル点の数が多くなると、グラフィックディスプレイの解像度の制限から一度にホログラムパターンを表示することは困難となる。

このため、グラフィックディスプレイの解像度に制限を受けることなく、計算機ホログラムのパターンを容易に表示する方法としては、ホログラム面の振幅を 1 とし、位相成分を量子化し量子化数を 2 値、すなわち白黒表示とすることが考えられる。この方法を用いれば 1 つのサンプル点に対して 1 つの画素が対応する。しかしながら、この方法はホログラム面上の位相を量子化し表示することにより作製されるので、必ず量子化誤差が発生し、再生像に悪影響を及ぼす。

位相量子化による計算機ホログラムの再生像の改善策の1つとして、繰返し法 [25], [28] がある。繰返し法とは、ホログラムを離散逆フーリエ変換し、その像の誤差を補正した後ホログラムを合成するプロセスを繰り返す方法である。しかし、この方法は繰返しの回数に比例した処理を必要とするので、ホログラム合成時間が非常に長くなるという短所を有する。

一方、Weissbach-Wyrowski-Bryngdahl[18] はキノフォーム [20] および3値に位相量子化した計算機ホログラムに対して再生像の改善のために誤差拡散法 [31], [39]~[42] を適用し、計算機シミュレーションで再生像の検討をした。

この誤差拡散法は複素数値の振幅を1とし位相を量子化する際に発生する誤差を隣接する未量子化画素に拡散する方法である。この方法は、再生像において雑音と物体とを分離できることから、比較的良好な再生像を得ることができる。また、1回の処理でホログラムが合成されるため、繰返し法と比較してホログラム合成時間を大幅に短縮できる特徴を有している。しかしながら、キノフォームおよび3値に位相量子化した計算機ホログラムは、ホログラムパターンを表示する際に中間調表示を必要とし、光学再生実験において容易な方法とは言い難い。このため、白黒2値表示を可能とするには、2値に位相量子化した計算機ホログラムに対して誤差拡散法を適用する必要がある。また、従来の白黒2値表示の計算機ホログラムに対する誤差拡散法の報告は、振幅量子化すなわち複素振幅の振幅成分、位相成分双方を量子化した計算機ホログラムに適用したものである [39]~[41]。しかし、複素数値の振幅を1として位相成分を2値に量子化した計算機ホログラムに対する報告はない。その理由は、誤差拡散法は本来ハーフトーン処理のために提案された方法で、入力

データの値が0から1までの範囲をとるものと仮定されていたことによる。

本章では、ラスタ走査による誤差拡散法を適用し、複素数値の振幅を1として位相成分を2値に量子化した計算機ホログラムの再生像の改善について検討する [45]。まず、拡散係数に対する効果を検討する。次に、得られた優れた再生像を与える拡散係数による誤差拡散法の再生像と種々の表示方式の再生像とを、ホログラムパターンを同一画素数で表示する条件のもとで比較する。更に、光学実験によって誤差拡散法による再生像の確認を行う。

3.2 誤差拡散法の適用

ラスタ走査による誤差拡散法は、ホログラムパターンの表示を容易にする目的から、2値に位相量子化した計算機ホログラムに適用される。本節では、この方法により計算機ホログラムを合成する方法について述べる。

再生パターンとその位置とを図 3.1 に示す。パターン “F” の大きさは画素数 16×16 である。また、作製される計算機ホログラムは画素数 128×128 で構成される。入力像面の離散座標系を (m, n) 、フーリエ変換面の離散座標系を (k, l) と定義する。入力物体 $f(m, n)$ を次式により定義し計算機のメモリに格納する。

$$f(m, n) = \begin{cases} 1 \cdot \exp(j\phi_R) & (\text{黒い部分}) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases} \quad (3.1)$$

但し、 ϕ_R はランダム位相で0から 2π にわたって分布する一様乱数である。

この入力像を次式に従って離散フーリエ変換しフーリエ変換像を求める。

$$F(k, l) = \frac{1}{\sqrt{N^2}} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n) \exp\left(-j \frac{2\pi(mk + nl)}{N}\right) \quad (3.2)$$

但し、 N は入力像平面における一辺当りの画素数であり、ここでは $N = 128$ である。

このフーリエ変換像を次式に従って、複素数値における実部の絶対値の最大が1となるようにあらかじめスケーリングしておく。

$$F_s(k, l) = \frac{F(k, l)}{\max |\operatorname{Re}[F(k, l)]|} \quad (3.3)$$

スケーリングを行う理由は、 $\max |\operatorname{Re}[F(k, l)]|$ が1より非常に小さい場合あるいは1より非常に大きい場合において誤差拡散法を適用すると、量子化誤差の成分が非常に大きくなり誤差拡散の効果が不十分となることによる。このスケーリングされた値 $F_s(k, l)$ を2値に位相量子化する。但し、位相量子化は $(k, l) = (0, 0)$ より開始し、ラスタ走査の順序により以下の手順で行う。

まず、 $(k, l) = (0, 0)$ のフーリエ変換値を、次式に従って2値に位相量子化し、位相量子化値 $F'(0, 0)$ を得る。

$$F'(0, 0) = \begin{cases} \exp(j0) & (-\pi/2 \leq \arg[F_s(0, 0)] \leq \pi/2) \\ \exp(j\pi) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3.4)$$

このとき、次式に示す量子化誤差が発生する。

$$s(0, 0) = F_s(0, 0) - F'(0, 0) \quad (3.5)$$

この量子化誤差 $s(0, 0)$ を図 3.2 に示すように4つの方向にそれぞれ $\beta(1, 0)$, $\beta(1, 1)$, $\beta(0, 1)$, $\beta(-1, 1)$ なる拡散係数を乗じ、誤差拡散を行う。この拡散する値は $\beta(1, 0)$, $\beta(1, 1)$, $\beta(0, 1)$, $\beta(-1, 1)$ 方向の隣接する画素のフーリエ変換値 $F_s(1, 0)$, $F_s(1, 1)$, $F_s(0, 1)$, $F_s(-1, 1)$ にそれぞれ加え合わせられ、その値を改めて $F_s(1, 0)$, $F_s(1, 1)$, $F_s(0, 1)$, $F_s(-1, 1)$ とする。但

し、 $k = 0$ においては、任意の l に対して $F_s(-1, l)$ が存在しないので、 $(-1, 1)$ 方向に対する誤差拡散は行わない。

次に、 $(k, v) = (1, 0)$ のフーリエ変換値の位相量子化を同様な手続きにより行う。更に、位相量子化を k 軸方向に順次行い、座標 $(k, l) = (N - 1, 0)$ における位相量子化が行われたら、 $(k, l) = (0, 1)$ より位相量子化を k 軸方向に順次行い、最終的には位相量子化の座標が $(N - 1, N - 1)$ となるまで行う。

一般に、座標 (k, l) における誤差拡散のアルゴリズムは次のように表される。

$$F'(k, l) = \begin{cases} \exp(j0) & (-\pi/2 \leq \arg[F_s(k, l)] \leq \pi/2) \\ \exp(j\pi) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3.6)$$

$$s(k, l) = F'(k, l) - F_s(k, l) \quad (3.7)$$

$$F_s(k + 1, l) = F_s(k + 1, l) + \beta(1, 0)s(k, l) \quad (3.8)$$

$$F_s(k + 1, l + 1) = F_s(k + 1, l + 1) + \beta(1, 1)s(k, l) \quad (3.9)$$

$$F_s(k, l + 1) = F_s(k, l + 1) + \beta(0, 1)s(k, l) \quad (3.10)$$

$$F_s(k - 1, l + 1) = F_s(k - 1, l + 1) + \beta(-1, 1)s(k, l) \quad (3.11)$$

但し、 (k, l) の定義されない領域への誤差拡散は行わないものとする。また、式 (3.8) から式 (3.11) は、手続き型計算機言語にみられる形式のものであり、右辺の値を改めて左辺に代入することを意味する。

以上の手順により、ホログラムパターンは 2 値に量子化した結果を白黒 2 値すなわち $\exp(j0)$ を白、 $\exp(j\pi)$ を黒と表示することによって作製される。

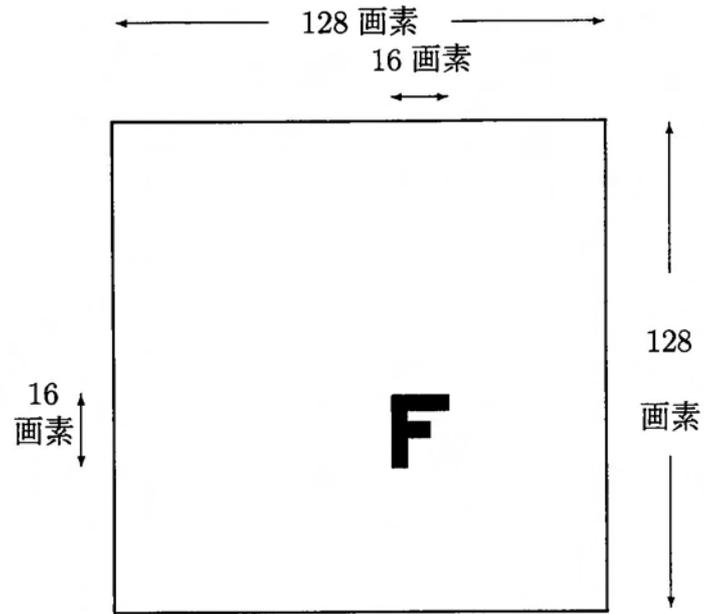


図 3.1: 再生パターンとその位置

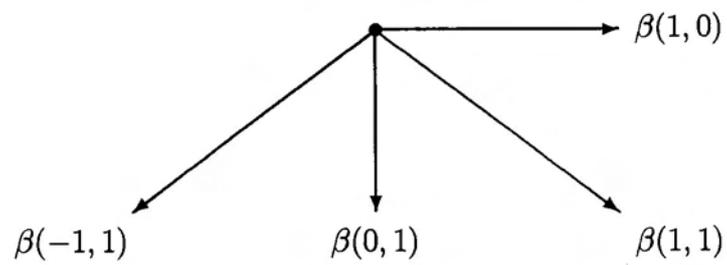


図 3.2: 2次元の誤差拡散の方向

3.3 計算機シミュレーション

計算機シミュレーションは、前節で述べた方法で合成された計算機ホログラムのパターンをスキヤニングし、2次元フーリエ変換することによって行う [43].

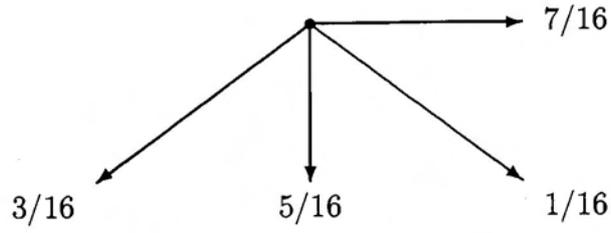
3.3.1 拡散係数に対する効果

再生パターンは画素数 16×16 の大きさをもつ (図 3.1). 種々の拡散係数に対する誤差拡散の効果について論じる. なお、ここで用いた拡散係数は5種類、すなわち Floyd-Steinberg の係数 [31], Barnard の係数 [41], Broja-Eschbach-Bryngdahl の係数 [42], Hauck-Bryngdahl の第 1 の係数 [39], Hauck-Bryngdahl の第 2 の係数 [39] である (図 3.3(a)~(e)). 但し、Broja-Eschbach-Bryngdahl の係数 [42] における拡散係数は $a=0.1, b=0.9$ である. また、Hauck-Bryngdahl の第 1 の係数 [39] は Hauck-Bryngdahl の第 2 の係数 [39] と拡散方向が異なるだけで本質的には同じであるためにここでは省略する (付録 A.4参照). なお、パターンの位置は再生像において雑音に影響がないようにそれぞれ選んでいる.

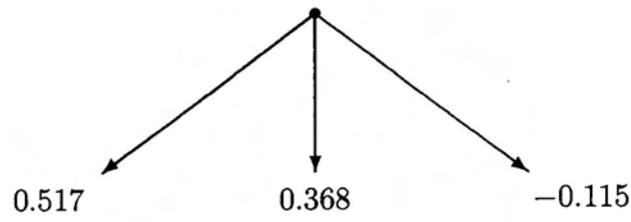
まず、個々の拡散係数に対する再生像を示す.

図 3.4に誤差拡散を適用しない場合の再生像を示す. 位相量子化の際に発生する量子化誤差が拡散されず、雑音がパターンの周辺に強く現れているために、パターンがはっきりと現れていないことがわかる.

図 3.5に Floyd-Steinberg の係数 [31] を適用した計算機ホログラムの再生像を示す. 誤差拡散の効果によって、雑音は全体的に外側に現れている. そのなかでも最大の拡散係数の方向と直交する縦方向に強く現れ、パターンの存在する中心部分の円形領域において雑音



(a) Floyd-Steinberg の係数



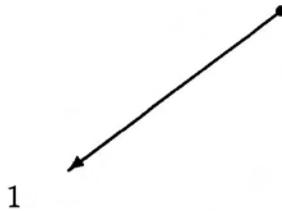
(b) Barnard の係数



(c) Broja-Eschbach-Bryngdahl の係数 ($|a| + |b| = 1$)



(d) Hauck-Bryngdahl の第 1 の係数



(e) Hauck-Bryngdahl の第 2 の係数

図 3.3: 拡散係数

は低減されている。

図 3.6に Barnard の係数 [41] を適用した計算機ホログラムの再生像を示す。雑音は右下りの斜め方向に強く発生しているが、左および右の端部と交差する雑音領域は狭く、上および下の端部に交差する雑音領域は広い。これは、拡散係数が 3 方向に存在するためである。

図 3.7に Broja-Eschbach-Bryngdahl の係数 [42]($a = 0.1, b = 0.9$) を適用した計算機ホログラムの再生像を示す。左下方向の拡散係数が非常に大きいため雑音は右下方向に強く発生し、他の方向の拡散係数の効果はより少なくなっている。

図 3.8に Hauck-Bryngdahl の第 2 の係数 [39] を適用した計算機ホログラムの再生像を示す。拡散係数が左下方向だけであるために、雑音は右下方向に強く現れ、パターンと雑音とは分離されている。

3.3.2 再生像の定量評価

ここでは、前述の 4 種類の拡散係数に対する再生像を比較する。再生像の比較は、再生像の評価領域をパターンの存在する 16×16 画素の領域に限定し、再生パターンの明るさ (Brightness) と、その領域における平均 2 乗誤差 (Mean Square Error) とにより定量的に行う [40]。再生像におけるパターンの明るさ B を次式により定義する。

$$B = \langle |r(m, n)|^2 \rangle \quad (3.12)$$

但し、 $|r(m, n)|$ は座標 (m, n) における再生像の振幅である。計算はパターンの存在する 16×16 画素の領域において入力像の振幅 $|f(m, n)|$ が 0 でない部分について行う。

再生パターンの存在する領域における平均 2 乗誤差 MSE を次式により定義する [40]。

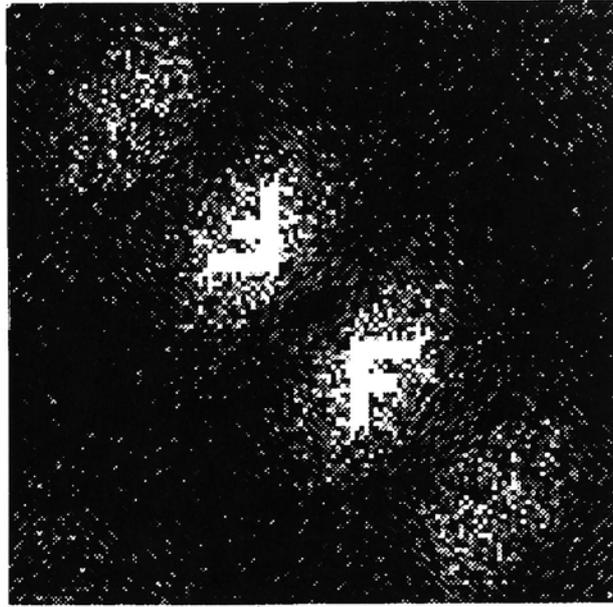


図 3.4: 再生像 (誤差拡散なし)

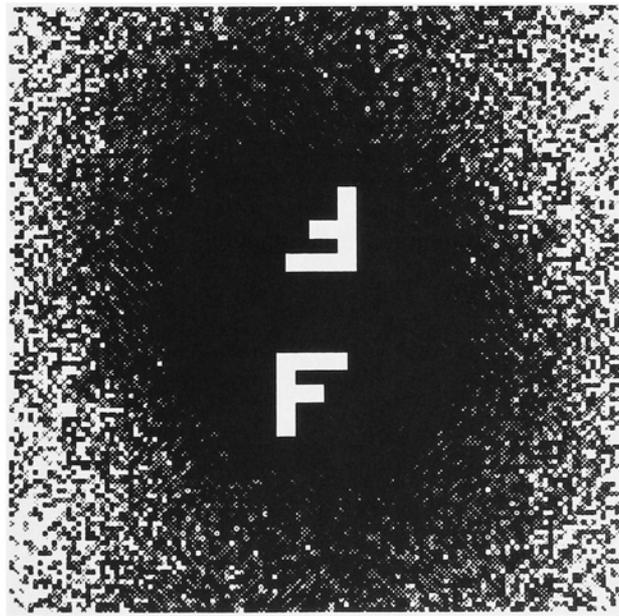


図 3.5: 再生像 (Floyd-Steinberg の係数)

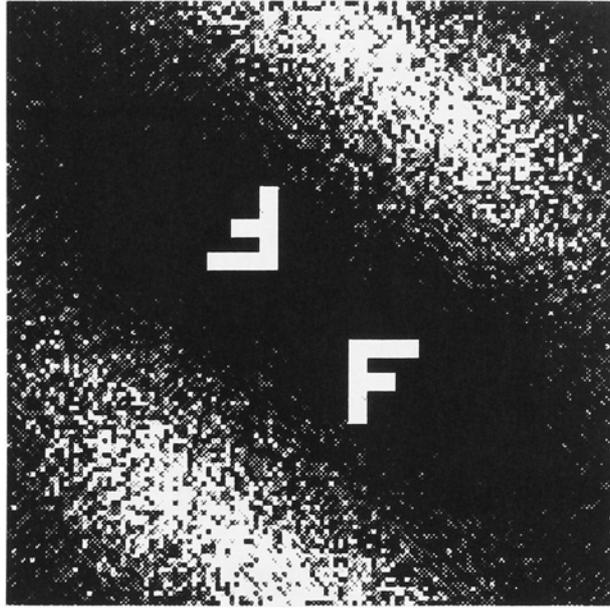


図 3.6: 再生像 (Barnard の係数)

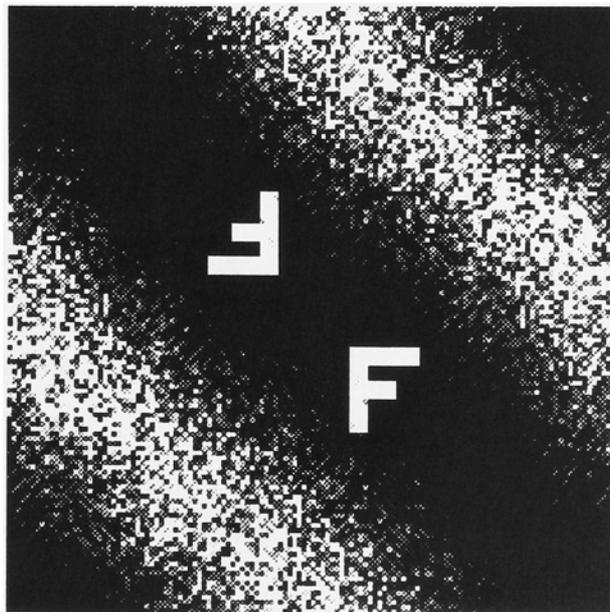


図 3.7: 再生像 (Broja-Eschbach-Bryngdahl の係数 ($a = 0.1, b = 0.9$))

$$MSE = \left\langle \left| \frac{|f| - \langle |f| \rangle}{\sigma_{|f|}} - \frac{|r| - \langle |r| \rangle}{\sigma_{|r|}} \right|^2 \right\rangle \quad (3.13)$$

但し、 $\langle |f| \rangle$ 、 $\langle |r| \rangle$ は入力像、再生像における平均振幅であり、 $\sigma_{|f|}$ 、 $\sigma_{|r|}$ は入力像、再生像の振幅の標準偏差である。また、 $\langle |r(m, n)| \rangle$ は再生像において $|f(m, n)| = 1$ に相当する部分の再生像の平均振幅であり、計算はパターンの存在する 16×16 画素の領域について行う。なお、式 (3.12)、(3.13) は、今後の章においても用いる。

表 3.1 に、これらの式 (3.12)、(3.13) によって計算された再生パターンの明るさと平均 2 乗誤差とを Floyd–Steinberg の係数 [31] を適用した場合の値で正規化した値として示す。この結果から平均 2 乗誤差が小さいという理由で、Hauck–Bryngdahl の第 2 の係数 [39] が優れた再生像を与える拡散係数であるということが出来る。また、このように拡散係数により再生像に違いがみられる理由は次のように考えられる。すなわち、フーリエ変換面の複素振幅の位相成分は振幅成分と比較して重要な情報を有していることが知られている [44] が、位相量子化の際に複数の方向に誤差拡散を行うと、再生パターンのもつ重要な位相情報までが拡散され、再生像の改善が不十分になると考えられる。

3.3.3 種々の表示方式との比較

ここでは、3.3.1 および 3.3.2 における議論より、Hauck–Bryngdahl の第 2 の係数 [39] による誤差拡散法の再生像と Brown–Lohmann の方法 [7]、Lee の方法 [14] および繰返し法 [25] の再生像とを比較する。但し、ホログラムパターンは 128×128 画素とする。

まず、Brown–Lohmann の方法による計算機ホログラム再生像を図 3.9 に示し、Lee の方法による計算機ホログラム再生像を図 3.10 に示す。但し、Brown–Lohmann および Lee の

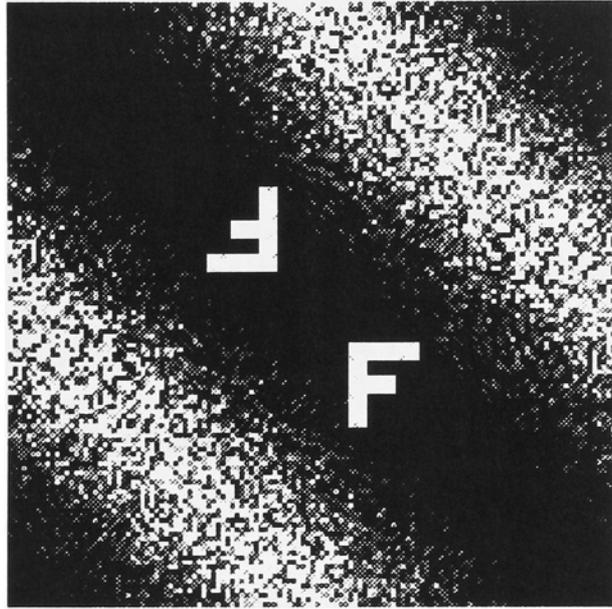


図 3.8: 再生像 (Hauck-Bryngdahl の第 2 の係数)

表 3.1: 拡散係数による再生像の比較

拡散係数	B	MSE
誤差拡散なし	3.72	1.39
Floyd-Steinberg の係数	1.00	1.00
Barnard の係数	1.02	0.67
Broja-Eschbach-Bryngdahl の係数	1.02	0.58
Hauck-Bryngdahl の第 2 の係数	1.04	0.56

方法については1つのサンプル点が 4×4 画素で表示されるものとし、ホログラムパターンを 128×128 画素で表示するために入力像領域すなわちサンプル点数は 32×32 画素とする。

Brown-Lohmannの方法の再生像は、たとえ最もはつきりと再生されている1次の回折光による再生像といえども、誤差拡散法と比較して多くの雑音が発生しているため、再生像は良質ではないといえる。また、Leeの方法の再生像も同様で、再生像は良好ではないといえる。一般的に、Brown-LohmannおよびLeeの方法は量子化数が多いほうが再生像は良好になると考えられるが、このときホログラムパターンを表示するための画素数は膨大な数を要するため、誤差拡散法は少ない画素数でホログラムパターンを表示でき、優れた再生像を得ることのできる表示方式であるといえることができる。

次に、繰返し法を用いた場合の再生像を図3.11に示す。但し、繰返し法における量子化は複素数値の振幅成分を1として位相成分を2値に量子化する方法とし、繰返し回数は 10^4 回とした。たとえ繰返し回数を 10^4 回しても、誤差拡散法の再生像と比較して、パターン周辺の雑音が多く発生しているため、再生像は良質であるとは言い難い。本来、繰返し法は比較的大きな物体に対して再生像の改善として有効な方法と考えられている[28]。このことから、誤差拡散法は繰返し法では再生像の改善が不十分である物体に対して有効であると考えられる。

更に、これらの4種類の表示方式による再生像を比較する。再生像の比較は、前節と同様、再生像の評価領域を再生パターンの存在する 16×16 画素の領域に限定し、物体の明るさと、その領域における平均2乗誤差とにより定量的に行う。表3.2に、再生パターンの明るさと平均2乗誤差とをFloyd-Steinbergの係数[31]を適用した場合の値で正規化した値

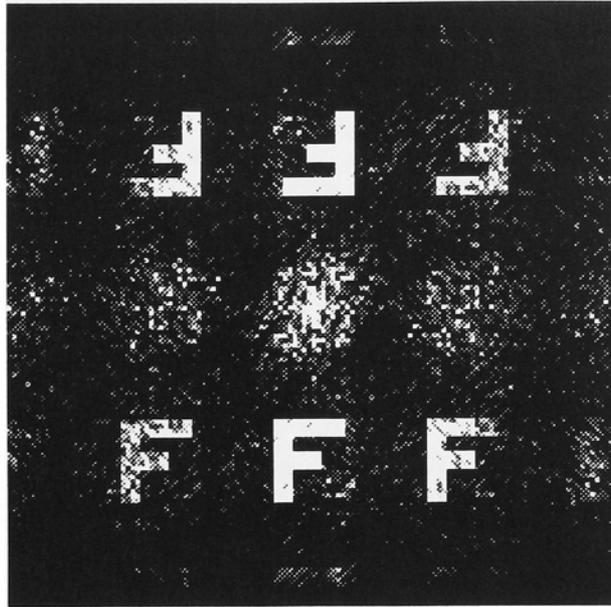


図 3.9: 再生像 (Brown-Lohmann の方法)

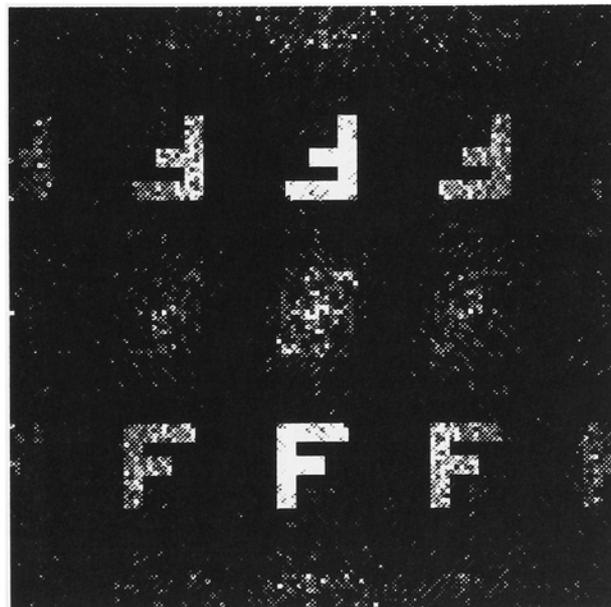


図 3.10: 再生像 (Lee の方法)

として示す。この結果から平均2乗誤差が小さいという理由で、誤差拡散法がこれらの表示方式のなかで最も優れた再生像を与える表示方式であるといえることができる。

3.4 光学再生実験

本節では、計算機シミュレーションと同様な光学再生像を得られることを光学実験によって確認する。

光学再生実験に用いるホログラムは、ホログラムパターンを、グラフィックディスプレイに表示し、そのハードコピーを写真フィルム(富士写真フィルム製ミニコピーフィルム)に縮写して作製する。光学再生像は、図3.12に示すように、ホログラムにビームエキスパンダを用いて拡げられたHe-Neレーザ(632.8nm)を照射し、焦点距離 f のフーリエ変換レンズを用いてフーリエ変換して再生像面に結像させたものを40万画素CCDカメラ(東京電子工業製SC3330S)を用いて撮像し、ビデオプリンタ(富士写真工機製FTI-500)に印画する。

図3.4に対応した光学再生像すなわち誤差拡散法を適用しない光学再生像を図3.13に、また、図3.8に対応した光学再生像すなわちHauck-Bryngdahlの第2の係数[39]による誤差拡散法を適用した光学再生像を図3.14にそれぞれ示す。これらの再生像より、中心の部分に直流成分と考えられるスポットが生じている以外は、シミュレーションによる再生像とほぼ同様な結果が得られることがわかる。従って、計算機シミュレーションによる再生像は光学再生像とよく一致しているといえることができる。

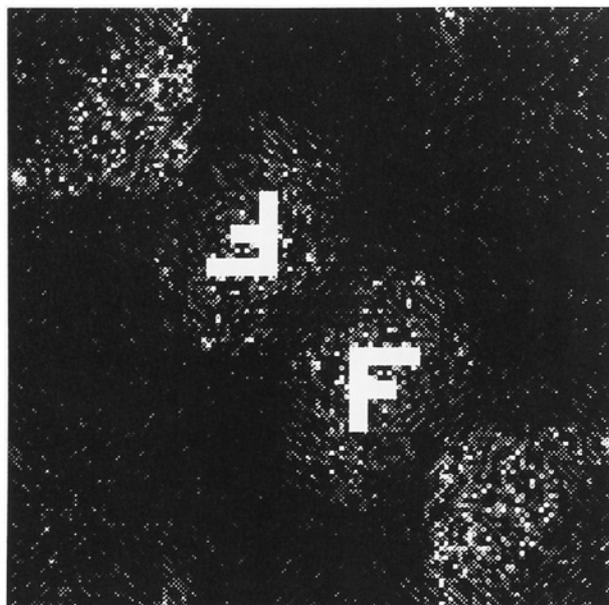


図 3.11: 再生像 (繰返し法)

表 3.2: 表示方式による再生像の比較

表示方式	B	MSE
Brown-Lohmann の方法	1.11	4.71
Lee の方法	0.82	3.09
繰返し法	4.29	0.86
誤差拡散法	1.04	0.56

(誤差拡散法：Hauck-Bryngdahl の第 2 の係数)

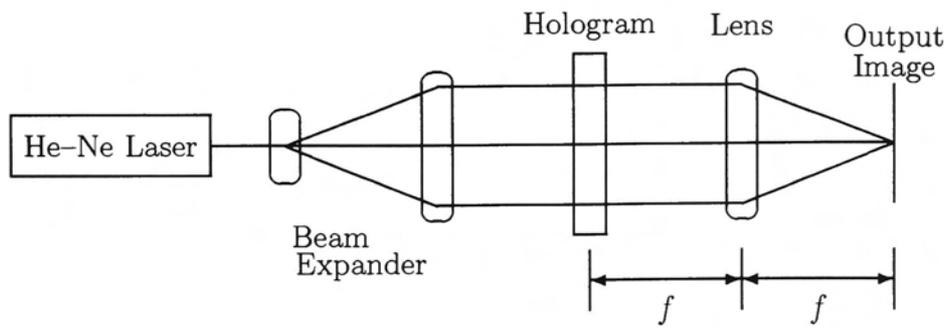


図 3.12: 光学系

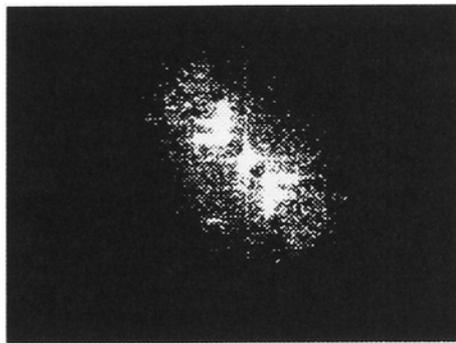


図 3.13: 光学再生像 (誤差拡散なし)

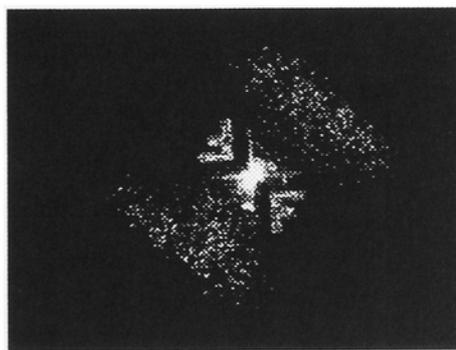


図 3.14: 光学再生像 (誤差拡散法)

3.5 結 言

本章では，ラスト走査 2 値に位相量子化した計算機ホログラムに誤差拡散法を適用し，再生像の改善について検討した。

まず，種々の拡散係数すなわち Floyd–Steinberg の係数 [31]，Barnard の係数 [41]，Broja–Eschbach–Bryngdahl の係数 [42] および Hauck–Bryngdahl の第 2 の係数 [39] に対する効果を検討した。その結果，平均 2 乗誤差が小さいことから，1 方向の拡散係数すなわち Hauck–Bryngdahl の第 2 の係数 [39] が再生像の改善として優れた効果を与えることが明らかになった。

次に，Hauck–Bryngdahl の第 2 の係数 [39] による誤差拡散法の再生像と Brown–Lohmann の方法 [7]，Lee の方法 [14] および繰返し法の再生像 [25] とを， 128×128 画素でホログラムパターンを構成する条件のもとで比較した。その結果，誤差拡散法の再生像は，他の表示方式と比較して平均 2 乗誤差が小さいため，優れた再生像を与える表示方式であることが明らかとなった。

更に，光学実験を行い，計算機シミュレーションによる再生像は光学再生像とよく一致することを確認した。

以上のことから，誤差拡散法は，再生像において物体が拡散された雑音に接しない範囲で，他の表示方式と比較して，優れた再生像を得ることのできる方式であることが明らかとなった。

第 4 章

ペアノ走査による誤差拡散法

4.1 緒言

前章では、複素数値を 2 値に位相量子化した計算機プログラムの再生像の改善策の一つとしてラスタ走査を用いた誤差拡散法 [45] について述べた。この誤差拡散法はラスタ走査の順序に従って複素振幅を量子化する際に発生する誤差を隣接する未量子化画素に拡散する方法である。この方法による再生像は、再生像の外側において最大の拡散係数と直交する方向に拡散されたしま状の雑音が発生する。このため、再生像において雑音に接しないように物体の位置と拡散係数とを選ばなければならない。それに加えて、光学再生においては、再生像の中心に記録媒体の非線形性が原因で発生するスポットの影響があるために、再生像においてこのスポットに接しないように物体の位置を選ばなければならない [46]。このことから、入力物体に対する制約が非常に大きい。

ところで、画像処理におけるハーフトーン処理については、つぎのような知見が得られている。すなわち、ラスタ走査による誤差拡散法をハーフトーン処理に適用した画像は周期的な縞模様が生じるが、ペアノ走査 [47] による誤差拡散法をハーフトーン処理に適用し

た画像は量子化誤差がすべての方向にランダムに配分されることから周期的な縞模様が生じなくなる [53] という知見である。このペアノ走査による誤差拡散法を計算機ホログラムに応用すると、ホログラム面における誤差が全ての方向にランダムに配分されることから誤差成分は空間的に一様分布し、誤差成分のフーリエ変換がデルタ関数状になると予測される。従って、光学再生像における中心のスポットの周辺に雑音を集中できるため、入力物体に対する制約は光学再生像におけるスポットに接しないように物体の位置を選べばよいということだけになると予測される。

本章では、ペアノ走査による誤差拡散法を適用し、2 値に位相量子化した計算機ホログラムの再生像の改善について、計算機シミュレーションによって検討する。まず、拡散係数に対するペアノ走査による誤差拡散の効果を検討する [54], [55]。次に、ペアノ走査による誤差拡散法の再生像と、ラスタ走査による誤差拡散法 [45] の再生像とを同一物体の下で比較する。

4.2 ペアノ走査

ペアノ走査とは平面あるいは空間上の特定の領域内のすべての点を通る連続曲線をいう。1890 年に Peano [47] によって示されたオリジナルのペアノ走査のほかにも、さまざまな例が考案された。そのなかで 1891 年に Hilbert [56] によって示されたペアノ走査はヒルベルト走査と呼ばれ、画像の擬似カラー化 [48]、画像符号化 [48]~[50]、濃淡画像のデジタルハーフトーン処理 [51]~[53] などに応用されている。本論文で扱うペアノ走査はこの Hilbert によるもので、以後、これを単にペアノ走査と呼ぶことにする。本節では、 $2^n \times 2^n$ 画素から

なる正方形領域におけるペアノ走査の再帰的計算法について述べる。但し、再帰的計算法の記述は鎌田-Perez-河口 [57] によるものが明快であるので、その記述に従うものとする。

まず、平面上の正方形領域におけるアドレスの記述法を示す。領域内の座標は、図 4.1 に示す $X - Y$ 直交座標系により $0 \leq x \leq 2^{L-1}$, $0 \leq y \leq 2^{L-1}$ で表される。この領域内の画素の座標を次式のように 2 進数表現する。

$$\left. \begin{aligned} x &= \langle x_{L-1}x_{L-2} \dots x_2x_1x_0 \rangle \\ &= \sum_{i=0}^{L-1} x_i 2^i \\ y &= \langle y_{L-1}y_{L-2} \dots y_2y_1y_0 \rangle \\ &= \sum_{i=0}^{L-1} y_i 2^i \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

このとき、 x と y との結合による $2L$ ビットの 2 進数 $z(x, y)$ を考える。

$$\begin{aligned} z &= \langle x_{L-1}y_{L-1}x_{L-2}y_{L-2} \dots x_2y_2x_1y_1x_0y_0 \rangle \\ &= \sum_{i=0}^{L-1} (2x_i + y_i) 4^i \end{aligned} \quad (4.2)$$

この $z(x, y)$ の値は x, y を各々 0 から $2^L - 1$ まで変化することにより 0 から $4^L - 1$ までの値をとる。これは図 4.2 に示すように $X - Y$ 平面上の各画素に与える 1 次元アドレスと見なすことができる。

次に、 $2^r \times 2^r$ 画素の各正方形領域中を進行する曲線の記述法を示す。この領域を 4 分割し、分割領域の順序を図 4.3 に示すように 4 種類とし、それぞれ a_{r-1} , b_{r-1} , c_{r-1} , d_{r-1} とする。図 4.3 よりペアノ走査 a_{r-1} , b_{r-1} , c_{r-1} , d_{r-1} ($0 \leq r \leq L$) の再帰的探索アルゴリズムは次のように記述される。

〈再帰的探索アルゴリズム〉

1. $r = 1$ のときのペアノ走査は次のような画素のアドレス列として表される。

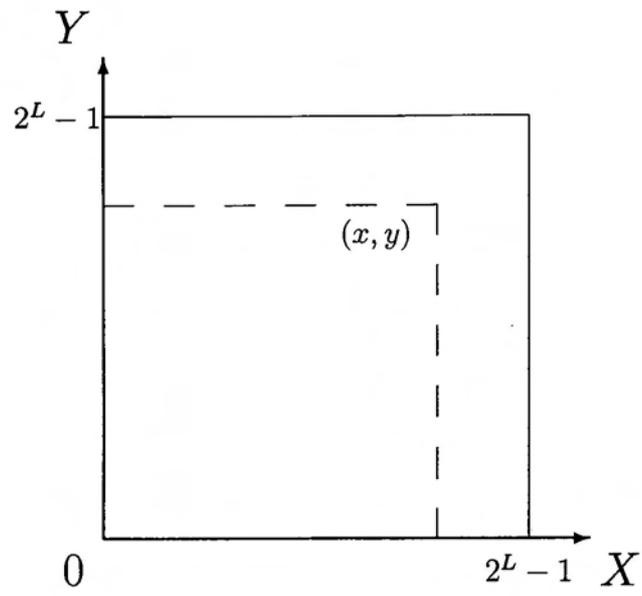


図 4.1: $X - Y$ 座標系

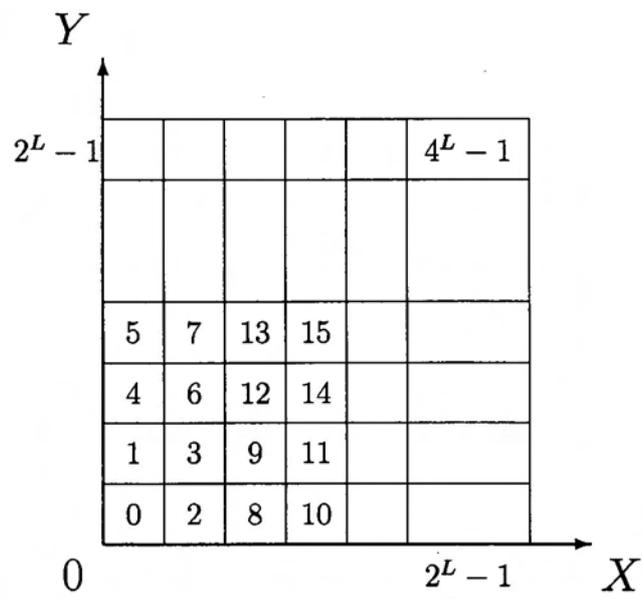


図 4.2: アドレス配置

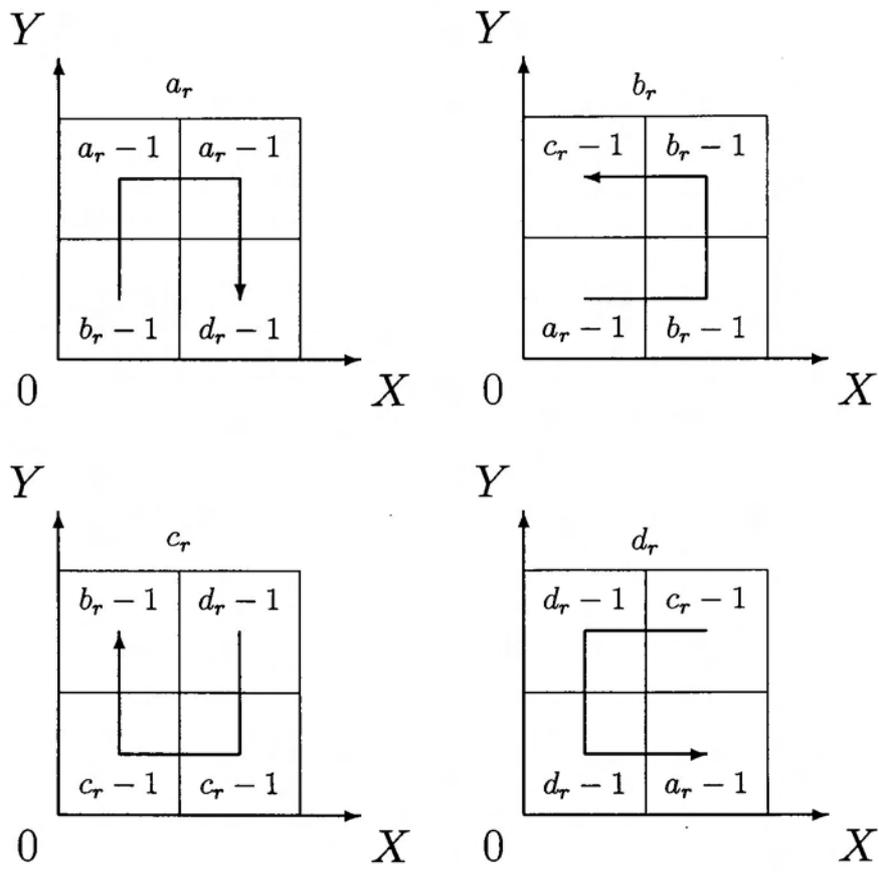


图 4.3: 探索顺序

$$\left. \begin{array}{l} a_0 \rightarrow 0, 1, 3, 2 \quad b_0 \rightarrow 0, 2, 3, 1 \\ c_0 \rightarrow 3, 2, 0, 1 \quad d_0 \rightarrow 3, 1, 0, 2 \end{array} \right\} \quad (4.3)$$

2. 各曲線のタイプ a, b, c, d に関する $r-1$ と $r (1 \leq r \leq L)$ との関係は次のように表される。

$$\left. \begin{array}{l} a_r \rightarrow 0b_{r-1}, 1a_{r-1}, 3a_{r-1}, 2d_{r-1} \\ b_r \rightarrow 0a_{r-1}, 2b_{r-1}, 3b_{r-1}, 1c_{r-1} \\ c_r \rightarrow 3d_{r-1}, 2c_{r-1}, 0c_{r-1}, 1b_{r-1} \\ d_r \rightarrow 3c_{r-1}, 1d_{r-1}, 0d_{r-1}, 2a_{r-1} \end{array} \right\} \quad (4.4)$$

この表記法では、例えば、 a_{r-1} は $2^r \times 2^r$ 画素の正方形を 4 分割した 4 つの領域の中で左下領域 (0) を b_{r-2} で進行し、次に左上領域 (1) を a_{r-2} で進行し、続いて右上領域 (3) を a_{r-2} で進行し、最後に右下領域 (2) を d_{r-2} で進行することを表す。形式的には、 $0b_{r-2}$ 、 $1a_{r-2}$ などでは $0 \times 2^r + b_{r-2}$ 、 $1 \times 2^r + a_{r-2}$ を表す。この場合、 b_{r-2} 、 a_{r-2} はアドレス値の系列を示すものであり、 $+$ は b_{r-2} や a_{r-2} 中の個々のアドレス値に 0×2^r や 1×2^r などを加えることを意味している。

以上により、ペアノ走査の再帰的計算法を示した。例として、 $r = 1, 2, 3$ におけるペアノ走査を図 4.4 に示す。計算機上においてペアノ走査を計算する際には、テーブルを参照し逐次のペアノ走査を生成する方法 [57] を用いると高速処理が可能となる。

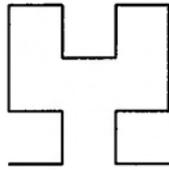
4.3 ペアノ走査の適用

本節では、ペアノ走査による誤差拡散法の計算機プログラムの合成への適用方法について述べる。

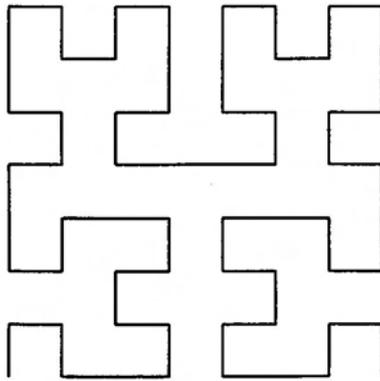
再生パターンとその位置とを図 4.5 に示す。パターン “F” の大きさは画素数 16×16 である。また、作製される計算機プログラムは画素数 128×128 で構成される。



(a) $r = 1$



(b) $r = 2$



(c) $r = 3$

図 4.4: ペアノ走査

計算機ホログラムの作製にあたっては、まず、3.2における式(3.1)~(3.3)と同様な計算を行うことによりスケーリングされたフーリエ変換像 $F_s(k, l)$ を得る。

次に、 $F_s(k, l)$ をペアノ走査の進行する順序により位相量子化し、位相量子化値 $F'(k, l)$ を得る。位相量子化は $(k, l) = (0, 0)$ より開始し、次式に従うものとする。

$$F'(k, l) = \begin{cases} \exp(j0) & (-\pi/2 \leq \arg[F_s(k, l)] \leq \pi/2) \\ \exp(j\pi) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4.5)$$

このとき、次式に示す量子化誤差 $s(k, l)$ が発生する。

$$s(k, l) = F_s(k, l) - F'(k, l) \quad (4.6)$$

この量子化誤差 $s(k, l)$ を図 4.6 に示すように四つの方向の隣接する画素へ、それぞれ $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ なる拡散係数を乗じ、誤差拡散を行う。但し、拡散係数 β_1 の方向はつねにペアノ走査の進行方向と同一方向のものとし、 $\beta_2 \sim \beta_4$ の方向は β_1 の方向より時計回りに 45° ずつ回転した方向をとるものとする。また、 $\beta_2 \sim \beta_4$ の方向に既量子化画素が存在する場合にはそれと 180° をなす方向に対して誤差を拡散するものとし、その方向も既量子化画素である場合には誤差を拡散しないものとする。

以上のプロセスによってつくられた $F'(k, l)$ をホログラムパターンとして表示することによって、計算機ホログラムを合成することができる。

4.4 計算機シミュレーション

計算機シミュレーションは、前節で述べた方法で合成された計算機ホログラムをスキヤニングし2次元フーリエ変換することによって行う。

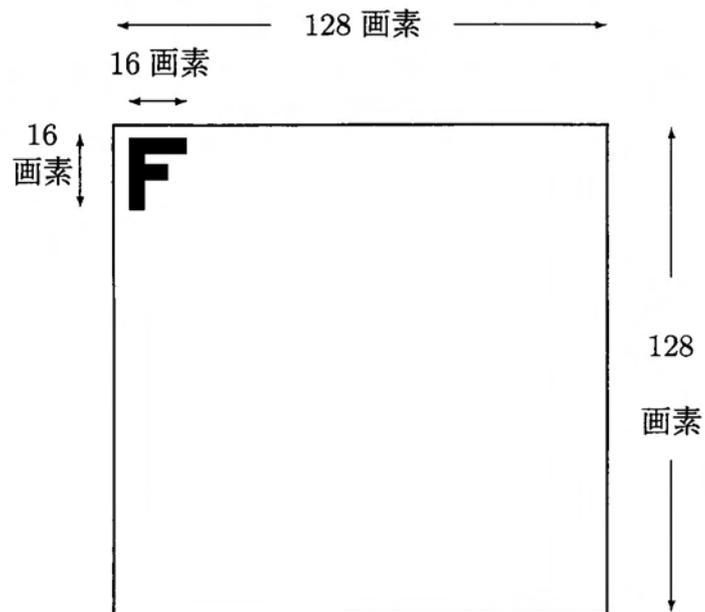


図 4.5: 再生パターンとその位置

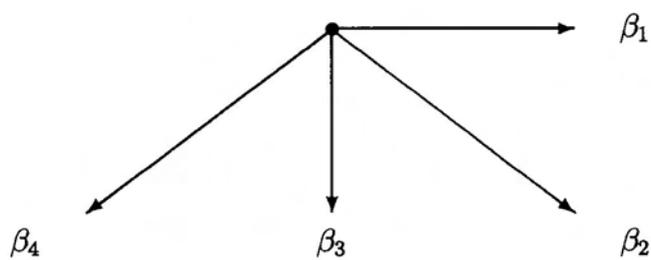


図 4.6: 2次元の誤差拡散の方向

4.4.1 拡散係数に対する効果

図 4.7に示す種々の拡散係数に対するペアノ走査による誤差拡散の効果について議論する。但し、拡散係数は、ペアノ走査における走査方向の係数が大きいもの（図 4.7(a)）、走査方向の係数が小さいもの（図 4.7(b)）、走査方向の係数が中程度のもの（図 4.7(c)）の3種類となるように、ラスタ走査に用いられた拡散係数 [45] を変形したものを選んでいく。

まず、個々の拡散係数に対する再生像を示す。

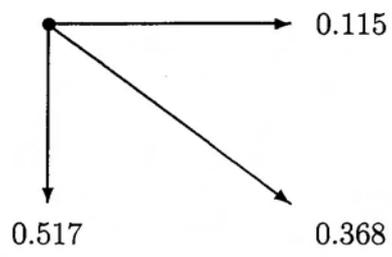
図 4.8に、図 4.7(a) に示す拡散係数、すなわち $\beta_1 = 1$ による誤差拡散法を適用した計算機プログラムの再生像を示す。誤差拡散の効果によって、雑音は再生像における中央の部分に現れている。しかしながら、雑音は比較的広範囲に現れ、再生パターンの明るさは弱められているため、必ずしも再生像は良好であるとはいえない。その理由は次のように考えることができる。すなわち、ペアノ走査の進行方向の拡散係数すなわち β_1 が再生像に大きく寄与し、この値が大きすぎると考えられる。

図 4.9に、図 4.7(b) に示す拡散係数、すなわち $\beta_1 = 0.115$, $\beta_2 = 0.368$, $\beta_3 = 0.517$ による誤差拡散法を適用した計算機プログラムの再生像を示す。再生像の内側に発生する雑音領域は図 4.8と比較すると狭くなり、再生パターンの明るさは向上しているが、パターン周辺の雑音が多く残存している。このため、必ずしも再生像は良好ではない。その理由は図 4.8の場合と逆で、 β_1 の値が小さすぎると考えられる。

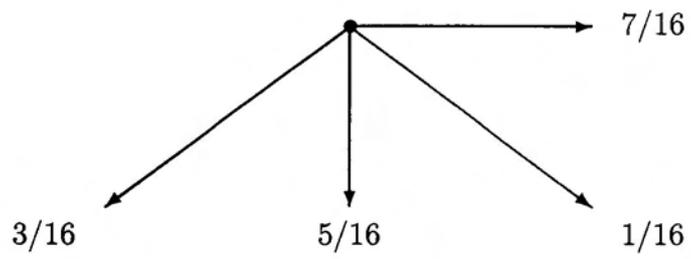
図 4.10に、図 4.7(c) に示す拡散係数、すなわち $\beta_1 = 7/16$, $\beta_2 = 1/16$, $\beta_3 = 5/16$, $\beta_4 = 3/16$ による誤差拡散法を適用した計算機プログラムの再生像を示す。再生像の内側に発生する雑音領域は図 4.9と同程度で、再生パターンの明るさは改善され、パターン周辺



(a)



(b)



(c)

图 4.7: 扩散系数

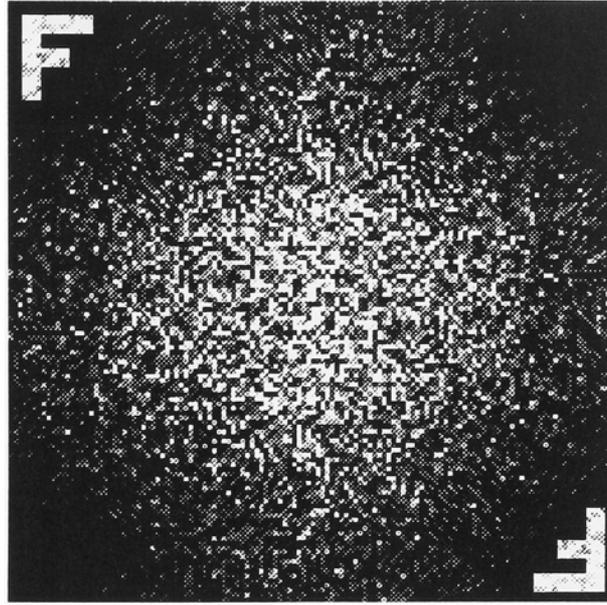


図 4.8: 再生像 (図 4.7(a) の係数)

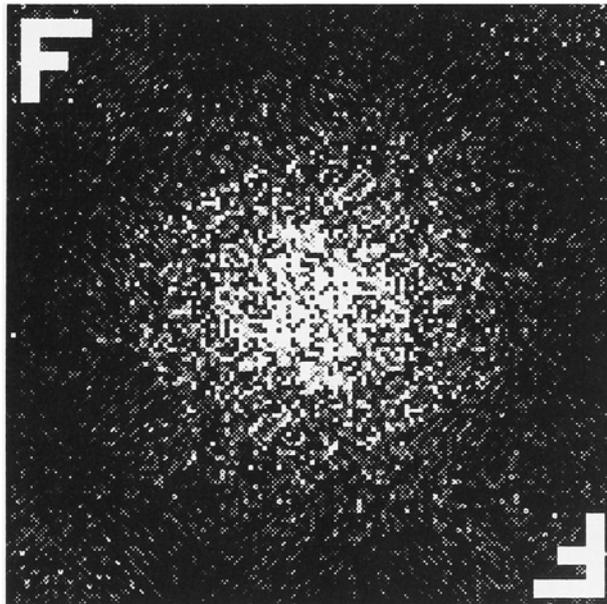


図 4.9: 再生像 (図 4.7(b) の係数)

の雑音は他の再生像と比較するとより低減されている。このため、パターンがはっきりと再生されことから、再生像は良質になっている。

次に、再生像の定量評価をする。定量評価は、評価領域をパターンの存在する 16×16 画素に限定し、式 (3.12),(3.13) で示されるパターンの明るさと平均 2 乗誤差によって行う。表 4.1 に、種々の拡散係数に対する再生像に関して、式 (3.12),(3.13) による計算結果を示す。但し、表中の数値は 1 方向の拡散係数によるペアノ走査による誤差拡散法を適用した場合における数値で正規化している。3 種類の拡散係数について比較すると、 MSE の値が最も小さいという理由によって、4 方向の拡散係数 (図 4.7(c)) によるペアノ走査による誤差拡散法が優れた再生像を与えるということが出来る。また、このように拡散係数により再生像に差異が生じる理由は、前述のように、ペアノ走査の進行方向の拡散係数すなわち β_1 に再生像が大きく寄与するからであると考えられる。

4.4.2 ラスタ走査との再生像の比較

本節では、4.4.1 の議論より、図 4.7(c) に示す拡散係数によるペアノ走査による誤差拡散法の再生像と、ラスタ走査による誤差拡散法 [45] の再生像と同一物体の下で比較する。

図 4.11 にラスタ走査を用いた誤差拡散法 [45] を適用した場合の再生像を示す。但し、拡散係数は $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0, \beta_4 = 1$ である。誤差拡散の効果によりパターンと雑音とが分離されているが、パターンの明るさが小さく、拡散された縞状の雑音が広範囲に現れている。

図 4.10 に示すペアノ走査による誤差拡散法の再生像と、図 4.11 に示すラスタ走査を用いた誤差拡散法の再生像とを比較すると、ペアノ走査による誤差拡散法による再生像の方が、

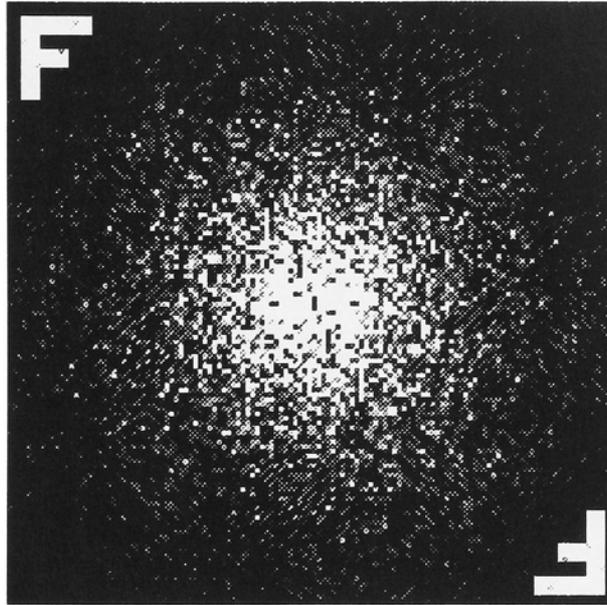


図 4.10: 再生像 (図 4.7(c) の係数)

表 4.1: 拡散係数による再生像の比較

β_1	β_2	β_3	β_4	B	MSE
1	0	0	0	1	1
0.115	0.368	0.517	0	1.59	0.45
7/16	1/16	5/16	3/16	1.28	0.40

パターンの明るさが向上し、雑音の発生する領域が非常に狭くなっていることから、良質になっているといえる。

これらの再生像を、前節と同様な方法によって定量的に評価する。表 4.2 に、ペアノ走査による誤差拡散法の再生像と、ラスタ走査を用いた誤差拡散法の再生像に関して、式 (3.12),(3.13) により計算した結果を示す。但し、表中の数値は 1 方向の拡散係数によるペアノ走査による誤差拡散法を適用した場合における数値で正規化している。表 4.2 の結果より、ラスタ走査を用いた誤差拡散法と比較してペアノ走査による誤差拡散法による再生像は、パターンの明るさ B が大きくなり、平均 2 乗誤差 MSE の値が小さくなっている。このことから、ペアノ走査による誤差拡散法は 2 値に位相量子化した計算機ホログラムの再生像の改善に有効であるといえることができる。

4.5 結 言

本章では、2 値に位相量子化した計算機ホログラムの再生像を改善するために、ペアノ走査による誤差拡散法を導入し、計算機シミュレーションにより再生像の検討をした。

まず、拡散係数に対する誤差拡散の効果を検討した結果、平均 2 乗誤差が最も小さいという理由により、図 4.7(c) に示した 4 方向の拡散係数が優れた再生像を与えることが明らかとなった。

次に、前述の図 4.7(c) に示した拡散係数を用いたペアノ走査による誤差拡散法の再生像と、ラスタ走査を用いた誤差拡散法の再生像とを同一物体を用いるという条件の下で比較した結果、再生像における雑音の発生する領域が小さく、パターンが明るく、平均 2 乗誤

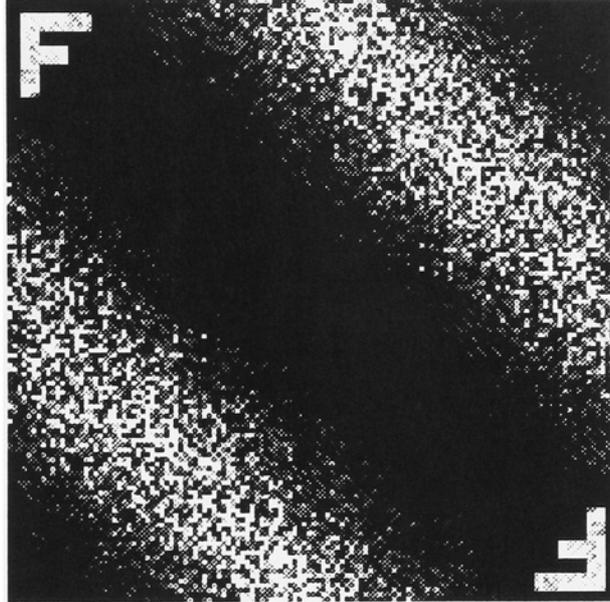


図 4.11: 再生像 (ラスタ走査)

表 4.2: 走査方式による再生像の比較

走査方式	B	MSE
ラスタ	1.01	1.49
ピアノ走査	1.28	0.40

差が小さいことから、ペアノ走査による誤差拡散法はラスタ走査による誤差拡散法と比較して優れた再生像を与えることが明らかとなった。

これらのことから、ペアノ走査による誤差拡散法が2値に位相量子化した計算機ホログラムの再生像を改善するために有効であることが明らかとなった。

第 5 章

エッジ強調誤差拡散法

5.1 緒 言

計算機ホログラムの再生像は，誤差拡散法を用いることにより，物体と雑音とを分離することによって改善される．しかしながら，再生像における物体の明るさが弱められるという問題がある．その改善策として，繰返し法と誤差拡散法との併用 [29] がある．この方法は，繰返し法により入力物体に与える位相を最適化した後，誤差拡散法を用いて計算機ホログラムを合成する方法である．繰返し法を併用することで再生像はより改善することが可能となる反面，誤差拡散法の有する良質な再生像を 1 回の処理で得ることができるといった特徴は失われてしまう．誤差拡散法の有する特徴を損なうことなく，前述の誤差拡散法と比較して優れた再生像を与える方法を構築するためには，誤差拡散法のアルゴリズムそのものを何らかの形で改善する必要がある．

前章までに述べた誤差拡散法は，しきい値が入力データの値によらず一定のものであった．本章で扱う誤差拡散法は，しきい値が入力データによって変化するもので，エッジ強調誤差拡散法と呼ばれ，ハーフトーン処理を行った場合においては前処理を行うことなく

像のエッジが強調されることが知られているものである [58]。本章では、エッジ強調誤差拡散法を計算機プログラムに適用した場合の効果について検討する。このエッジ強調誤差拡散法 [58] は、ラスタ走査を用いた場合にだけ計算機プログラムからの再生像についての知見がある。すなわち、誤差拡散法と比較して物体の明るさが改善されるという知見である [40]。しかしながら、再生像の画質すなわち平均 2 乗誤差を必ずしも小さくすることができるとは限らないという問題点があった。

本章では、エッジ強調誤差拡散法について詳細に検討する。まず、エッジ強調誤差拡散法の原理について述べる。次に、ハーフトーン処理に対するエッジ強調誤差拡散法の効果について検討する [59]。エッジ強調誤差拡散法を適用する走査についてはラスタ走査とピアノ走査の 2 種類である。更に、計算機プログラムに対するエッジ強調誤差拡散法の効果について検討する [60]。エッジ強調誤差拡散法を適用する走査すなわちラスタ走査、往復走査、らせん走査、モルトン走査およびピアノ走査に対する効果について検討し、エッジ強調誤差拡散法における強調係数に対する効果についても検討する。

5.2 エッジ強調誤差拡散法の原理

エッジ強調誤差拡散法の基本概念を図 5.1 に示す。データ $f(n)$ は n が 0 から $N-1$ までの N 個存在するものとする。また、計算機プログラムへの応用上、 $f(n)$ は -1 から $+1$ の範囲の値をとるものとする。まず、 $n=0$ におけるデータ $f(0)$ を読み込む。1 個前のデータにおける量子化誤差を付加した値 $g(0)$ は 1 個前にデータが存在しないことから次式で与えられる。

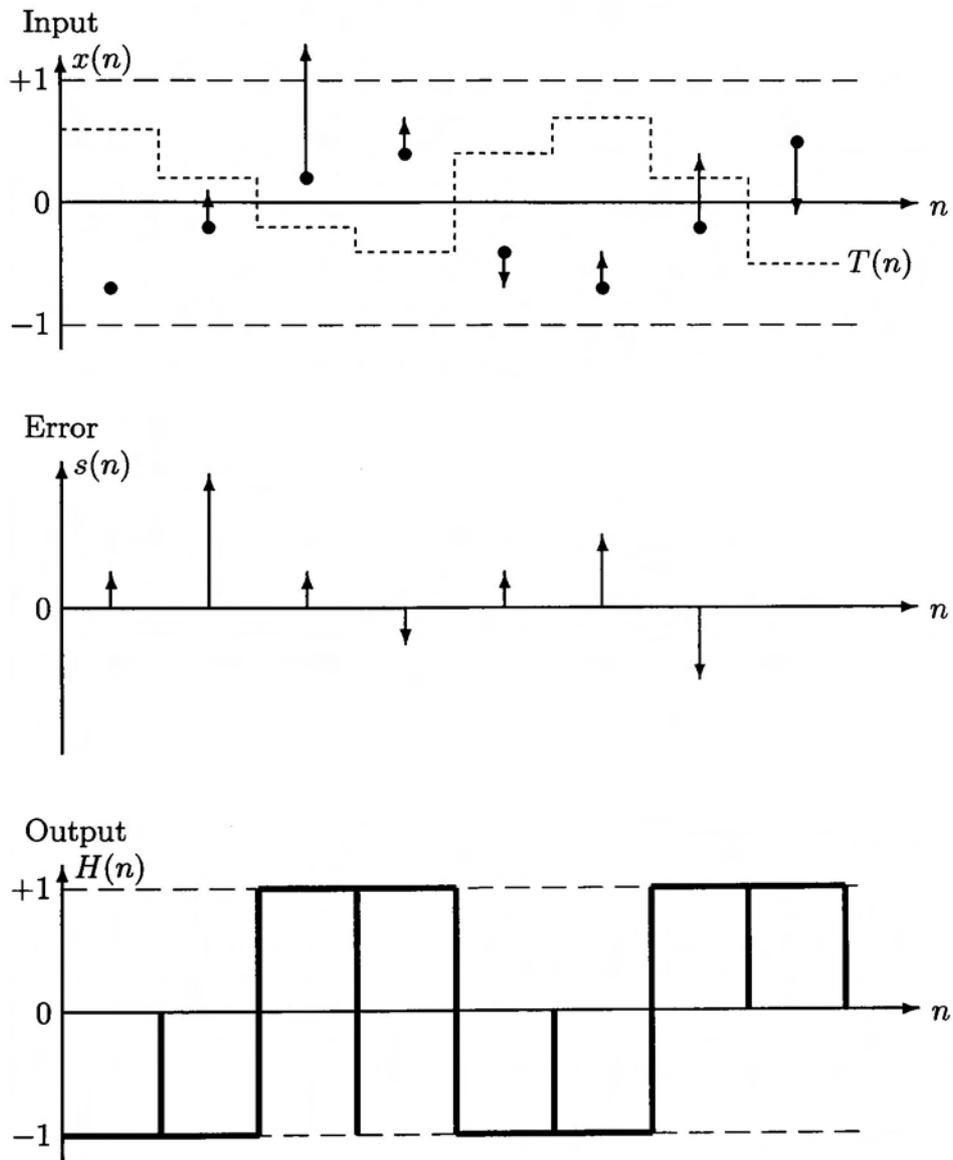


図 5.1: エッジ強調誤差拡散法の基本概念 ($k = 1$)

$$g(0) = f(0) \tag{5.1}$$

この $g(0)$ の値をしきい値 $T(0)$ と比較して次式のように量子化する.

$$H(0) = \begin{cases} +1 & (g(0) \geq T(0)) \\ -1 & (g(0) < T(0)) \end{cases} \tag{5.2}$$

但し, $H(0)$ は量子化された値であり, しきい値 $T(0)$ は強調係数を k とすると次式で与えられる.

$$T(0) = -kf(0) \tag{5.3}$$

このとき $g(0)$ と $H(0)$ との間に発生する量子化誤差 $s(0)$ は次式で与えられる.

$$s(0) = g(0) - H(0) \tag{5.4}$$

次に, $n = 0$ において発生した量子化誤差 $s(0)$ を次のデータに拡散する. このとき誤差拡散を受けた $n = 1$ のデータ $g(1)$ は次式で与えられる.

$$g(1) = s(0) + f(1) \tag{5.5}$$

以下, 式 (5.2)~(5.5) と同様な手続きにより, すべてのデータにわたって順次誤差を拡散させながら量子化し出力量子化列 $\{H(n)\}$ を求める.

エッジ強調誤差拡散法のアルゴリズムにおいて $k = 0$ の場合は $T(n) = 0$ となり, 従来の誤差拡散法のアルゴリズムに帰着する.

5.3 ハーフトーン処理への適用

ここでは, エッジ強調誤差拡散法のハーフトーン処理に対する効果について述べる. エッジ強調誤差拡散法をハーフトーン処理に適用する際に, 5.2で述べた原理と異なる点は以下

に示す通りである。

1. 入力データ $f(n)$ が 0 から +1 までの値をとる。
2. 量子化された値が 0 あるいは +1 のいずれかとなる。
3. しきい値が $T(n) = (1 - k)f(n) + k/2$ となる。

実験に用いた原画像は、図 5.2 に示す大きさ 256×256 画素、256 階調のものである。また、ペアノ走査において用いた拡散係数は図 5.3 に示す二種類とする。個々の拡散係数における実験結果について、それぞれ述べる。

(a) ラスタ走査に対する結果

図 5.4 は、ラスタ走査による再生像について、エッジ強調誤差拡散法を適用した再生像を示している。但し、用いた強調係数 k はそれぞれ 1, -1, 5, 15 の 4 種類である。強調係数 k を大きくするに従ってエッジが強調され、像の形状がはっきりとしてくることが観察される。しかし、階調濃度の変化の少ない領域では、ラスタ走査の問題点である規則的な縞模様が観察される。

(b) 1 方向の拡散係数のペアノ走査に対する効果

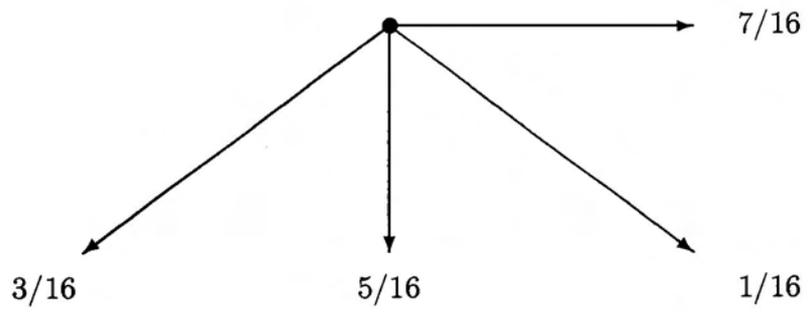
図 5.5 は、1 方向の拡散係数すなわち図 5.3(a) の方法を適用したペアノ走査による再生像について、エッジ強調誤差拡散法を適用した再生像を示している。但し、用いた強調係数 k はそれぞれ 1, -1, 5, 15 の四種類である。強調係数を大きくするに従ってエッジが強調され、像の形状がはっきりとしてくることが観察される。また、階調濃度の変化の少ない領域では規則的な縞模様が発生していないことが観察される。従って、ペアノ走査の特徴を



图 5.2: 原画像



(a)



(b)

图 5.3: 扩散系数



(a) $k = 1$



(b) $k = -1$



(c) $k = 5$



(d) $k = 15$

図 5.4: 再生像 (ラスト走査)



(a) $k = 1$



(b) $k = -1$



(c) $k = 5$



(d) $k = 15$

図 5.5: 再生像 (1 方向の拡散係数)

損なうことなくエッジが強調されていることがわかる。

このように、ペアノ走査の特徴を損なうことなくエッジ強調が行われる理由については、次のように考えられる。

まず、階調濃度の変化の大きい部分においては、強調係数を1より大きくとるとしきい値と入力データとの差が従来の誤差拡散アルゴリズムよりも大きくなるため、見掛け上の階調濃度の変化が従来の誤差拡散アルゴリズムと比較して急峻となり、その結果として、エッジが強調される。逆に、強調係数を1より小さくとるとしきい値と入力データとの差が逆に小さくなるために、見掛け上の階調濃度の変化が従来の誤差拡散アルゴリズムと比較して平坦になり、その結果として、エッジが弱くなる。これらの現象は、隣接する画素との見掛け上の階調濃度の変化を急峻あるいは平坦にすることであるから、ラスト走査であれペアノ走査であれエッジが強調されることがいえる。

次に、強調係数の如何によらず、階調濃度の変化しない部分については、しきい値の変化も少なくなるために、従来の誤差拡散法のアルゴリズムと同様な結果が得られると考えられる。従って、階調濃度が変化しない部分で、ラスト走査の場合は再生像に規則的な縞模様が発生するが、ペアノ走査の場合は再生像に規則的な縞模様は発生しなくなる。それ故、階調濃度が変化しない部分ではペアノ走査の特徴が損なわれないのである。

以上の理由により、ペアノ走査を誤差拡散の走査としてエッジ強調誤差拡散法を用いた場合、ペアノ走査の特徴が損なわれることなく、エッジが強調される。

(c) 4方向の拡散係数のペアノ走査に対する効果



(a) $k = 1$



(b) $k = -1$



(c) $k = 5$



(d) $k = 15$

図 5.6: 再生像 (4 方向の拡散係数)

図 5.6は、4 方向の拡散係数すなわち図 5.3(b) の方法を適用したペアノ走査による再生像について、エッジ強調誤差拡散法を適用した再生像を示している。但し、用いた強調係数 k はそれぞれ 1, -1, 5, 15 の四種類である。強調係数 k を大きくするに従ってコントラストが強調されるとともに形状がはっきりとすることが観察される。このことは、エッジ強調誤差拡散法の適用に関して、拡散係数を同一とした場合にラスタ走査とペアノ走査とでは結果が大きく異なることを示すものである。また、階調濃度の変化の少ない領域では規則的な縞模様は発生していないことがわかる。

このように、コントラストが強調される理由については、次のように考えられる。すなわち、拡散係数が 4 方向のエッジ強調誤差拡散法であるために、次に量子化する画素以外にも量子化誤差が拡散され、多方向にわたる近傍画素との相関と相まって、高い階調濃度はより高く、低い階調濃度はより低くなり、その結果として、コントラスト強調が行われるのであると考えられる。

(d) 再生像の定量評価

まず、エッジ強調の効果を定量的に評価する。評価量としては、再生像と原画像のラプラシアンとの相互相関の振幅のピーク値を用いる。その理由は、原画像のラプラシアンは原画像のエッジに相当し、相互相関関数の振幅のピーク値は再生像と原画像との類似度を示すものであることによる。従って、再生像と原画像のエッジ画像との類似度が高ければ再生像においてエッジが強調されていると考えられる。

図 5.7に、強調係数と相互相関関数(再生像と原画のラプラシアン)の振幅のピーク値との関係を示す。但し、図中の数値は 1 方向の拡散係数のペアノ走査で強調係数が 1 の場合

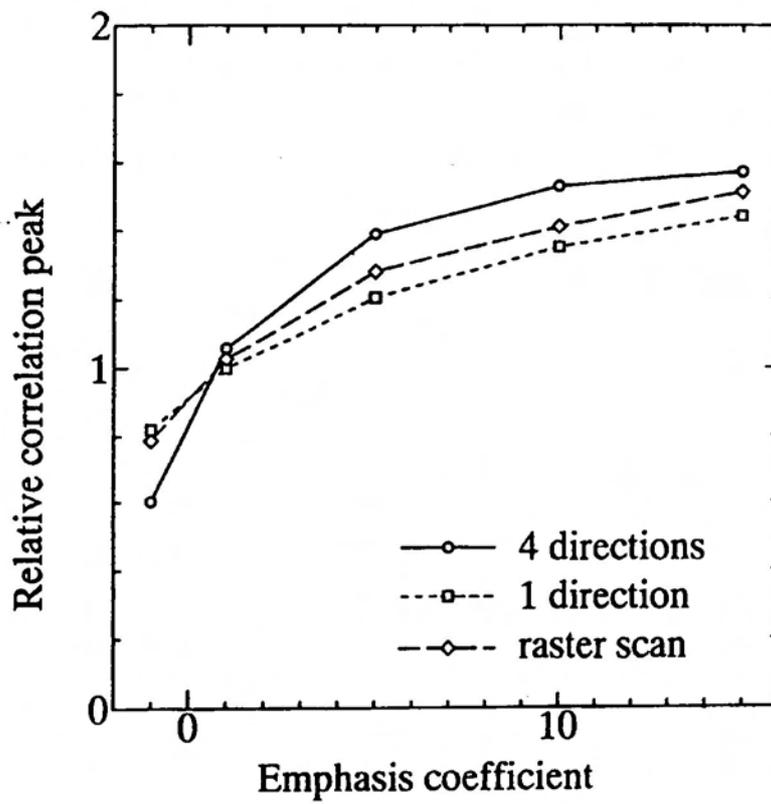


図 5.7: 強調係数と相互相関関数のピークとの関係

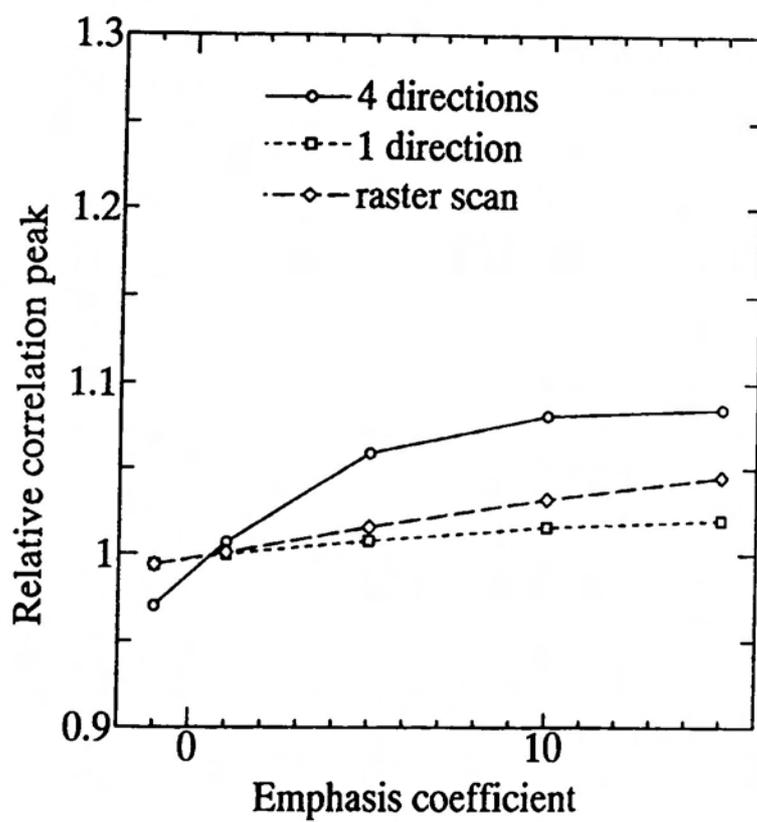


図 5.8: 強調係数と相互相関関数のピークとの関係

の値で正規化している。いずれの拡散係数に対しても、強調係数を増加するに従って、相互相関関数の振幅のピーク値が増加する傾向が認められることから、エッジが強調されていることがわかる。また、4方向の拡散係数によるペアノ走査に適用した再生像は、ラスト走査に適用した再生像と比較してエッジ強調の効果が大きく現れていることがわかる。

次に、コントラスト強調の効果を定量的に評価する。評価量としては、再生像と原画像との相互相関関数の振幅のピーク値を用いる。その理由は、原画像との類似度が高ければ、再生像における擬似的な階調濃度が高い部分はより高く低い部分はより低く変換されるため、コントラストが強調されていると考えられることによる。

図 5.8に、強調係数と相互相関関数(再生像と原画)の振幅のピーク値との関係を示す。但し、図中の数値は1方向の拡散係数のペアノ走査で強調係数が1の場合の値で正規化している。いずれの拡散係数に対しても、強調係数を増加するに従って、相互相関関数の振幅のピーク値が増加する傾向が認められ、コントラストが強調されることがわかる。また、4方向の拡散係数によるペアノ走査に適用した再生像においてはこの傾向は顕著であり、ラスト走査に適用した再生像や1方向の拡散係数によるペアノ走査に適用した再生像と比較して、コントラスト強調の効果が大きく現れていることがわかる。

(e) 複雑なエッジをもつ入力画像に対する効果

ここでは、複雑なエッジをもつ画像に対するペアノ走査によるエッジ強調処理の効果について、実験結果により示す。

まず、図 5.9に示す原画像を用いて、1方向の拡散係数を適用した場合の再生像を図 5.10に示す。(b)の議論と同様に、強調係数を大きくするに従ってエッジが強調されることが

わかる。

次に、図 5.9 に示す原画像を用いて、4 方向の拡散係数を適用した場合の再生像を図 5.11 に示す。(c) の議論と同様に、強調係数 k が大きくなるに従ってエッジならびにコントラストが強調されることがわかる。以上のことから、ペアノ走査を用いたエッジ強調処理に関して、複雑なエッジが少なく陰影のある画像に対して、また複雑なエッジをもつ画像に対してもエッジならびにコントラスト強調の効果は同様な効果を有することがわかる。

5.4 計算機ホログラムへの適用

計算機による数値シミュレーションは、計算機ホログラムのパターンを 2 次元フーリエ変換することによって行う。また、再生像はディスプレイに白黒 256 階調表示し、写真撮影したものを用いている。

入力像の領域は 128×128 画素で、再生パターンである文字“F”の大きさは 16×16 画素である。

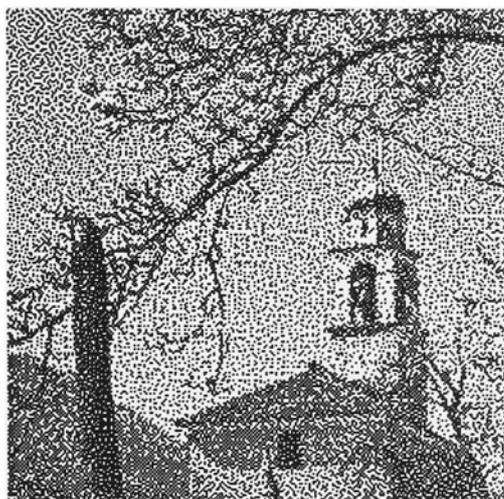
(a) 走査に対する効果

用いた走査は 5 種類、すなわちラスタ走査、往復走査、ら旋走査、モルトン走査、ペアノ走査である (図 5.12(a)~(e)) [61]。これらの走査について個々の再生像を図 5.13~5.17 に示す。

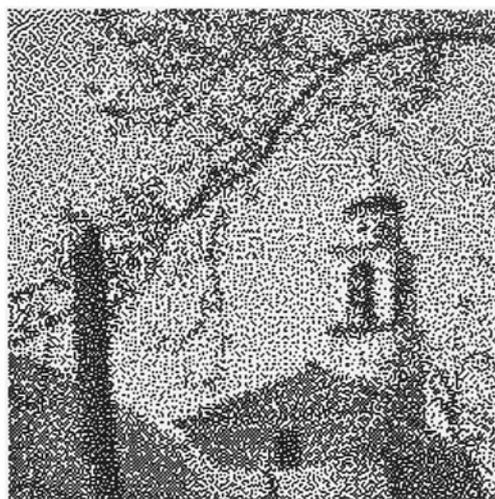
ラスタ走査、往復走査、ら旋走査を適用した場合 (図 5.13~5.15) は、エッジ強調を行うことによってパターンが明るく再生されているが、パターンの周辺に拡散された雑音とは別の雑音が発生している。この理由は、ハーフトーン処理において、ラスタ走査にエッジ



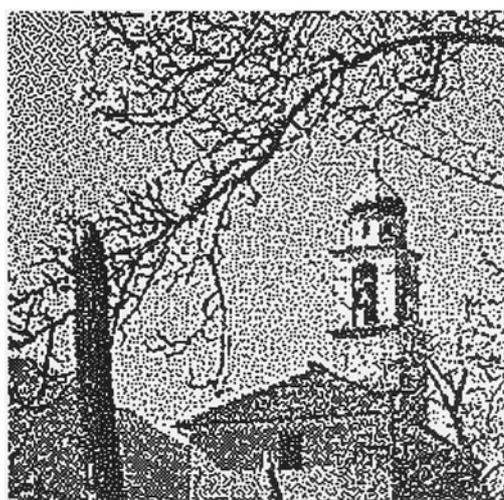
图 5.9: 原画像



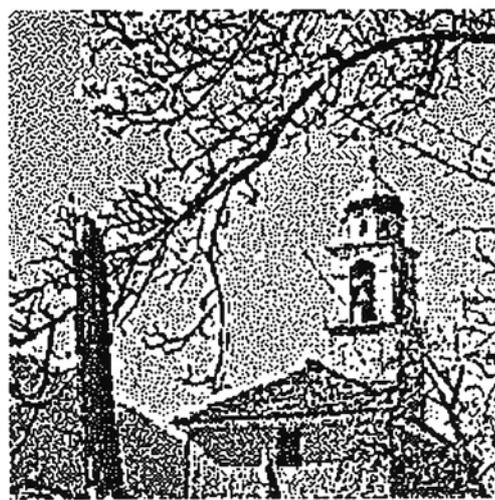
(a) $k = 1$



(b) $k = -1$

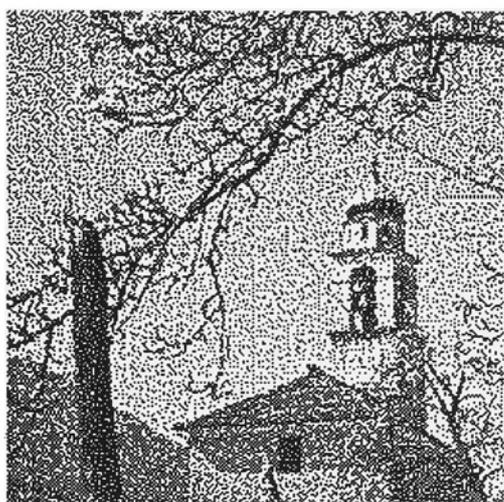


(c) $k = 5$

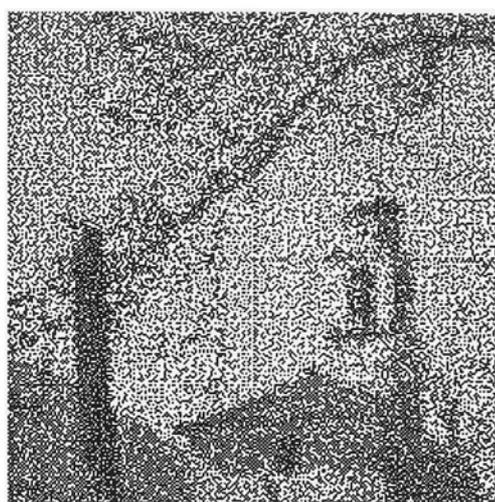


(d) $k = 15$

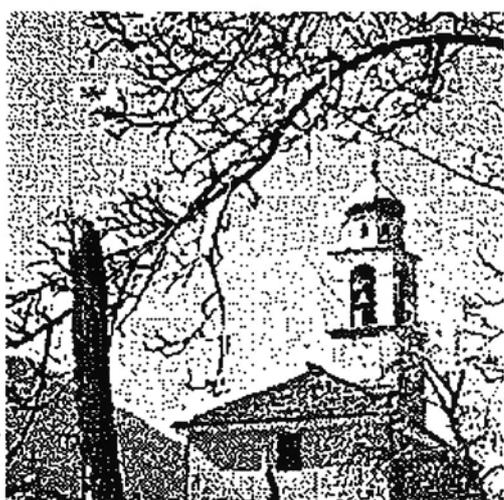
図 5.10: 再生像 (1 方向の拡散係数)



(a) $k = 1$



(b) $k = -1$

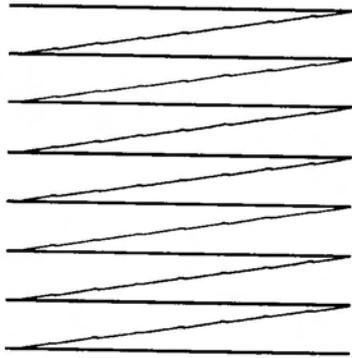


(c) $k = 5$

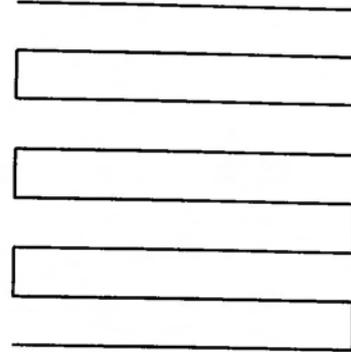


(d) $k = 15$

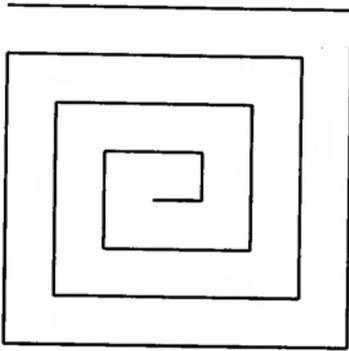
図 5.11: 再生像 (4 方向の拡散係数)



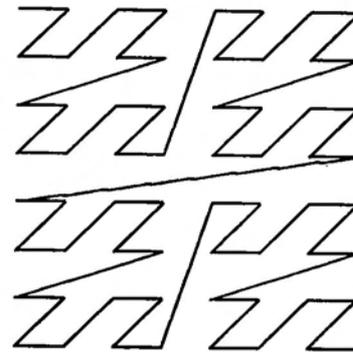
(a) ラスタ走査



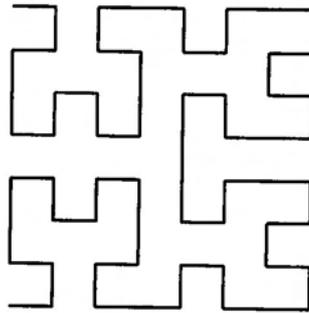
(b) 往復走査



(c) ら旋走査

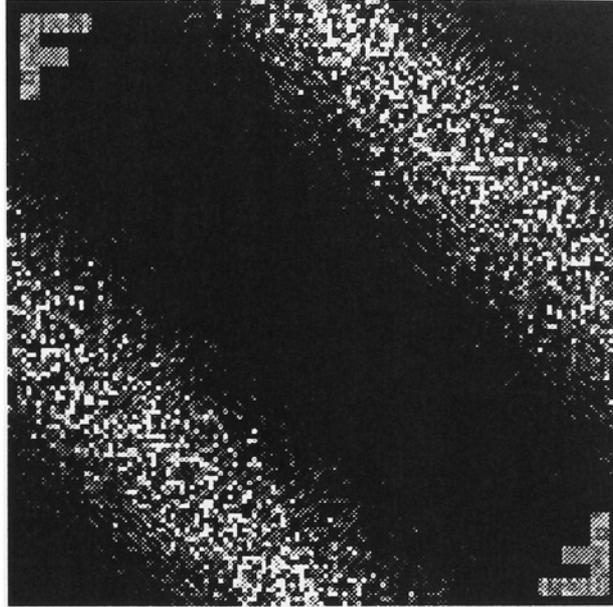


(d) モルトン走査

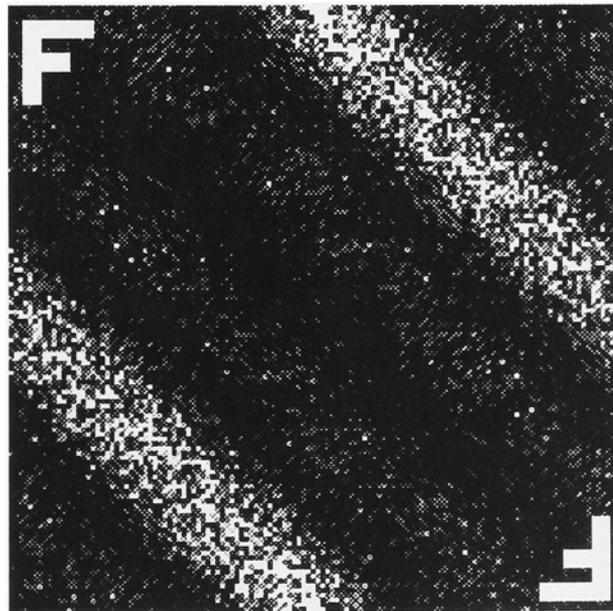


(e) ペアノ走査

図 5.12: 走査

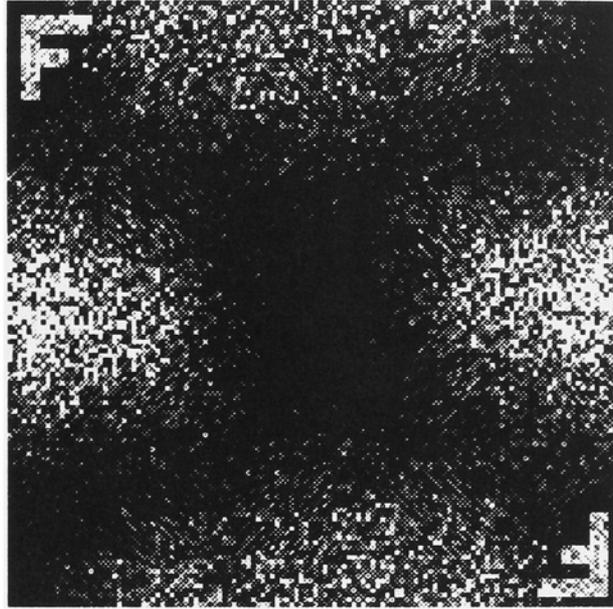


(a) $k = 0$

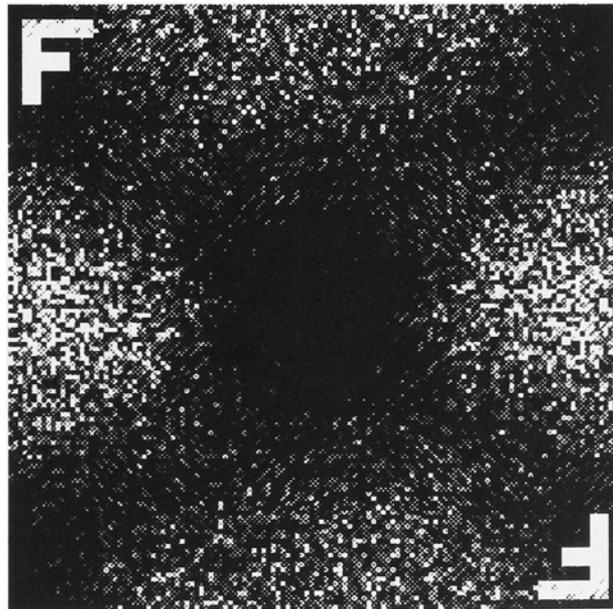


(b) $k = 1.5$

図 5.13: 再生像 (ラスタ走査)

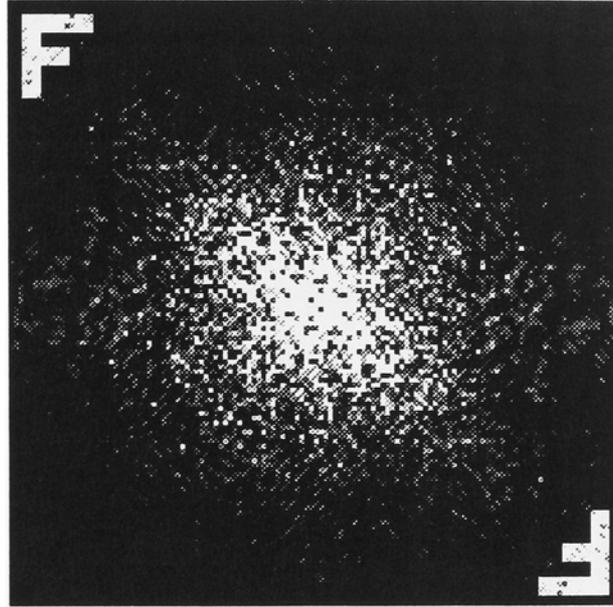


(a) $k = 0$

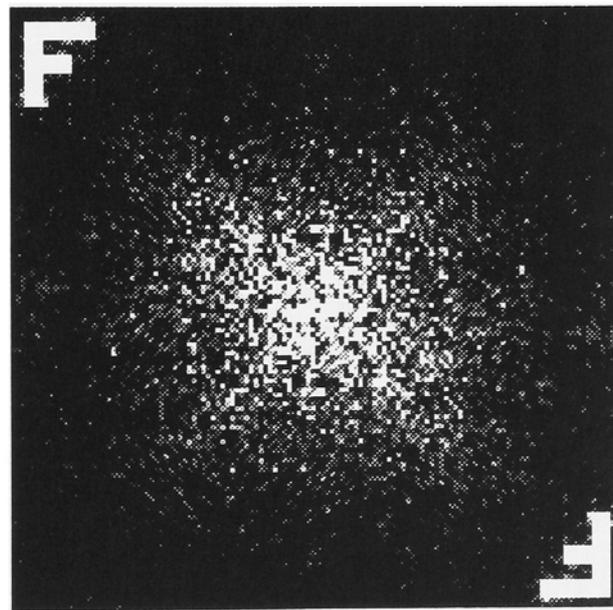


(b) $k = 1.5$

图 5.14: 再生像 (往復走査)

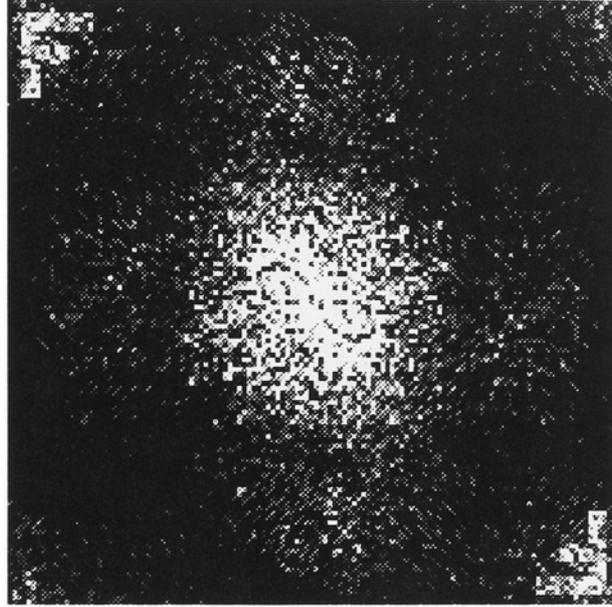


(a) $k = 0$

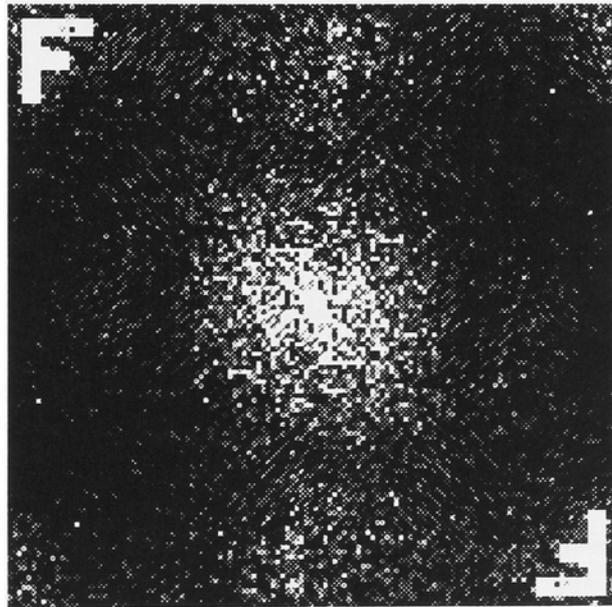


(b) $k = 1.5$

図 5.15: 再生像 (ら旋走査)

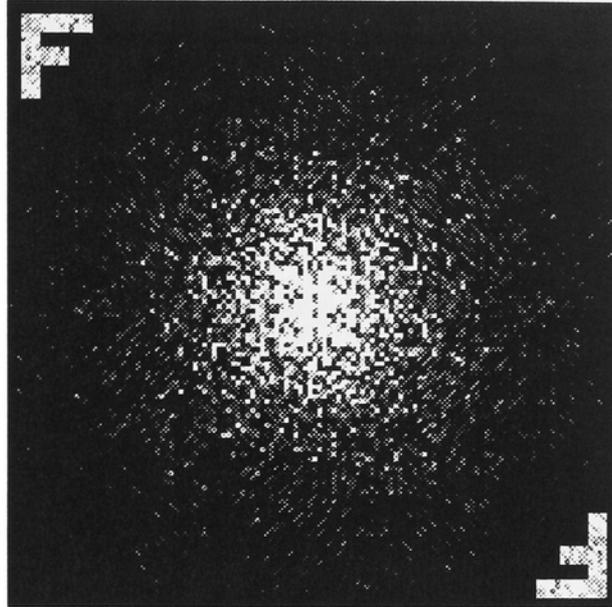


(a) $k = 0$

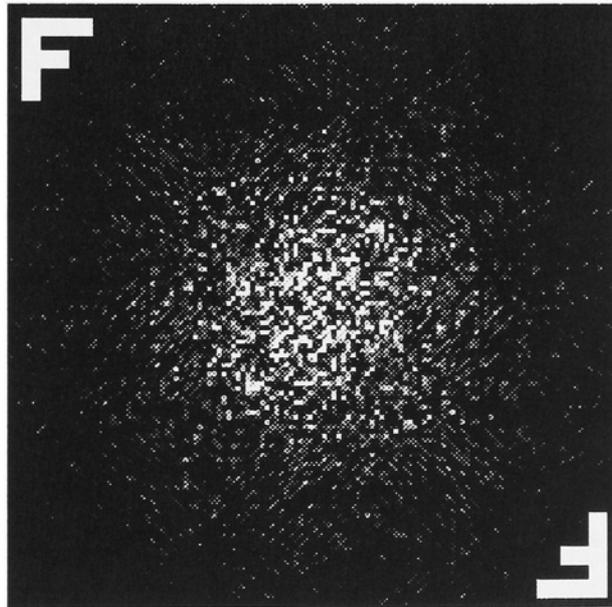


(b) $k = 1.5$

図 5.16: 再生像 (モルトン走査)



(a) $k = 0$



(b) $k = 1.5$

図 5.17: 再生像 (ペアノ走査)

強調誤差拡散法を適用すると像のエッジが強調されることが知られている [58], [59] が、このエッジ成分のフーリエ変換が別の雑音成分を発生させる原因であると考えられ、往復走査やら旋走査を用いた場合でも同様であると考えられるためである。

モルトン走査を適用した場合 (図 5.16) は、エッジ強調の有無にかかわらずパターン周辺の雑音が多く残存し、パターンの形状が保持されていない。その理由は走査の性質上、次に量子化する画素が隣接しない画素となる場合が非常に多くなるためであると考えられる。

ペアノ走査を適用した場合 (図 5.17) は、エッジ成分による雑音成分が発生せず、パターンが明るく再生されている。その理由は、ハーフトーン処理においてペアノ走査にエッジ強調誤差拡散法を適用すると、コントラストが強調される [59] ために、量子化誤差の成分がより小さくなるためであると考えられる。このことから、計算機プログラムに対するエッジ強調誤差拡散法はペアノ走査に対して有効であることがわかる。

(b) 強調係数に対する効果

ここでは、エッジ強調誤差拡散法における強調係数に対する効果を定量的に評価する。再生像の評価は、式 (3.13) に示した平均 2 乗誤差 MSE [40] により行う。なお、計算はパターンの存在する 16×16 画素の領域で行っている。

図 5.18 は式 (3.13) によって計算された平均 2 乗誤差 MSE を、ペアノ走査で強調係数 k を 0 とした場合の値で正規化した値で示している。この結果からいずれの場合も強調係数 k が正のほうが平均 2 乗誤差 MSE が小さい傾向にあることがわかる。なかでも、ペアノ走査の場合においては、他の走査と比較して平均 2 乗誤差 MSE が小さく、強調係数 k を

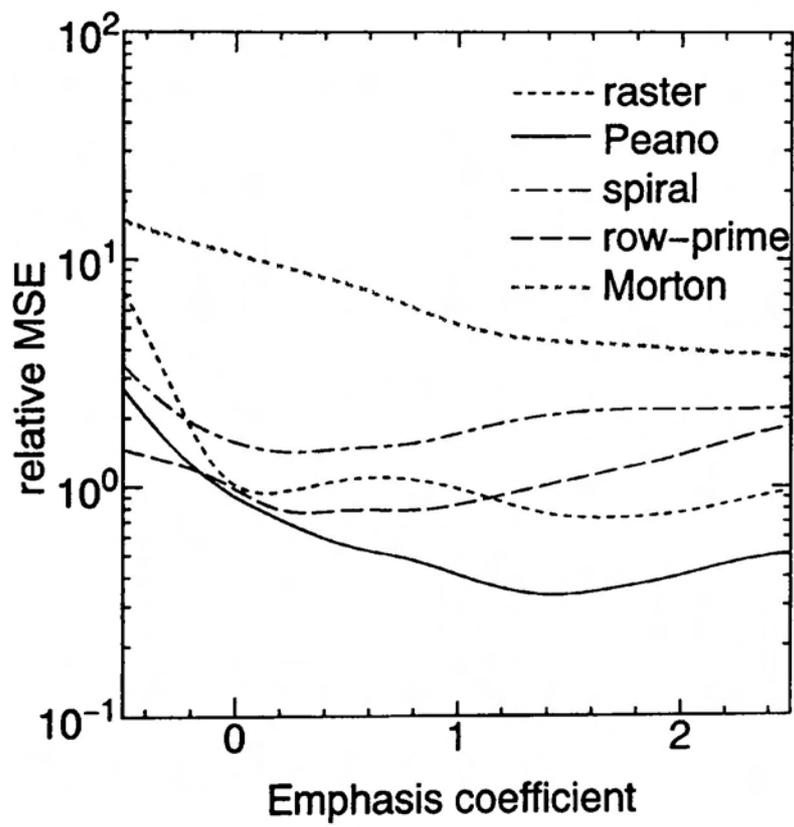


図 5.18: 強調係数と平均 2 乗誤差との関係

大きくするに従って平均2乗誤差 MSE が小さくなることがわかる。

以上のことから、ペアノ走査によるエッジ強調誤差拡散法が計算機ホログラムの再生像の改善に有効であることがわかる。

5.5 結 言

本章では、計算機ホログラムに対してエッジ強調誤差拡散法を適用した場合における再生像について検討した。

まず、ハーフトーン処理に対してエッジ強調誤差拡散法を適用した場合の再生像について検討した。ラスタ走査を適用した場合は像のエッジが強調されるが階調濃度の変化が少ない領域で規則的な縞模様が発生することが明らかとなった。1方向の拡散係数によるペアノ走査を適用した場合はペアノ走査の特徴を損なうことなく像のエッジが強調されることが明らかとなった。4方向のペアノ走査を適用した場合はペアノ走査の特徴を損なうことなくコントラストが強調されることが明らかとなった。

次に、計算機ホログラムに対してエッジ強調誤差拡散法を適用した場合の再生像について検討した。エッジ強調誤差拡散法を適用する走査がラスタ走査、往復走査、螺旋走査の場合は物体上にエッジ強調が原因と見られる雑音を重ねることが明らかとなった。モルトン走査の場合は、走査の性質上次に量子化する画素が隣接しない場合があることから、物体の形状が保持されないことが明らかとなった。ペアノ走査である場合はエッジ成分による雑音成分が発生せずに、物体が明るく再生されていることが明らかとなった。これらの走査について再生像を比較し、ペアノ走査が優れた再生像を与える走査であることを明ら

かにした。ピアノ走査における強調係数については、強調係数を大きくするに従って再生像を改善できることを明らかとした。

以上のことより、計算機ホログラムに対するエッジ強調誤差拡散法は、走査がピアノ走査である場合において再生像改善に顕著な効果を与えることが明らかとなった。

第 6 章

3 次元像再生シミュレーション

6.1 緒 言

計算機ホログラム [17], [66] は仮想物体画像, あるいは 2 光束干渉によるホログラムの記録が困難な物体画像のホログラフィ的な再生をはじめとして種々の目的で合成される. これまでの計算機ホログラムの像改善に関する研究は, そのほとんどが 2 次元物体を再生する計算機ホログラムを対象にしており, 3 次元物体を再生する計算機ホログラムを対象とした研究は非常に少ない. その理由は, 例えば計算機ホログラムの再生像改善を行うとすれば計算機シミュレーションによる再生像の検討が不可欠で, 2 次元の場合は正確な像再生シミュレーションの手法が確立している [43], [45] が, 3 次元の場合はまだ正確な像再生シミュレーションの手法が確立していないことによる. 従って, 3 次元物体を再生する計算機ホログラム [17], [62]~[64] の再生像改善について検討を行うためには, 正確な像再生シミュレーションを実現することが必要である.

ところで, 計算機ホログラムの 2 次元像再生シミュレーションはホログラムパターンをスキャンニングし 2 次元離散フーリエ変換すればよいとされている [43], [45]. この手法によっ

て得られた再生像はフーリエ変換レンズの焦点面あるいはフラウンホーファー回折となる面に現れるものである。ところが、計算機ホログラムからの3次元再生像はフーリエ変換レンズの焦点から外れた面、すなわちフレネル回折となる面にも再生物体が現れるため、これらの面における像再生シミュレーションが可能となればよいことになる。

本章では、計算機ホログラムからの3次元像再生シミュレーションについて検討する[65]。まず、回折計算により、レンズの焦点面以外での得られる像について解析を行う。次に、Brown-Lohmannの方法による3次元物体再生計算機ホログラム[17]を合成し、計算機シミュレーションならびに光学実験を行い、計算機シミュレーションの妥当性について検討する。更に、デトア位相法による計算機ホログラムの表示方式すなわちBrown-Lohmannの方法[17]ならびに尾上-金子の方法[64]に対する再生像の比較を行う。但し、本論文で扱う3次元物体再生計算機ホログラムは断層型計算機ホログラム[17],[64]とする。

6.2 数値的像再生理論

6.2.1 3次元物体再生計算機ホログラム

ここでは、3次元物体を再生する計算機ホログラムの一つである断層タイプの計算機ホログラムの合成法について述べる。

計算機ホログラムに記録される複素振幅 $H(u, v)$ は入力物体の複素振幅 $g(x, y, z)$ が3次元的に分布していると考えると、次式で表される。

$$H(u, v) = \iiint g(x, y, z) \exp \left\{ \frac{\pi(f-z)}{j\lambda f^2} (u^2 + v^2) \right\} \cdot \exp \left\{ \frac{2\pi}{j\lambda z} (xu + yv) \right\} dx dy dz \quad (6.1)$$

但し、 j は虚数単位、 f はレンズの焦点距離である。実際の計算においては、例えば、次式に示すように z 方向に垂直な多数の層 ($i = 0, 1, 2, \dots$) の合成によって計算される [17]。

$$H(u, v) = \sum_i \exp \left\{ \frac{\pi(f - z_i)}{j\lambda f z_i} (u^2 + v^2) \right\} G(u, v, z_i) \quad (6.2)$$

但し、 $G(u, v, z_i)$ は $g(x, y, z_i)$ の2次元フーリエ変換である。実際の計算機プログラムはこの複素振幅 $H(u, v)$ を量子化して表示したものである。

6.2.2 回折理論による再生像の解析

ここでは、計算機プログラムの再生像がどのように結像されるかを示す。

計算機プログラムの再生光学系を図 6.1に示す。光学系においてレンズの焦点距離を f 、計算機プログラムからレンズまでの距離を d_1 、レンズから再生像を得る位置までの距離を d_2 とする。

ビームエキスパンダで拡げられたレーザ光で計算機プログラムを照射する。このレーザ光がプログラムを通過後、レンズの直前に到達する波面の複素振幅分布 $u^-(u, v)$ は、計算機プログラムからレンズまでの距離を d_1 とおくと、フレネル回折によって次式で示すたたみ込み積分 (convolution integral) で与えられる。

$$u^-(u, v) = H(u, v) * \frac{1}{j\lambda d_1} \exp \left\{ \frac{\pi}{j\lambda d_1} (u^2 + v^2) \right\} \quad (6.3)$$

式 (6.3) によって計算された $u^-(u, v)$ がレンズを通過する際、次式に示すレンズの透過関数 $t(u, v)$ が乗じられる。

$$t(u, v) = \exp \left\{ \frac{\pi}{j\lambda f} (u^2 + v^2) \right\} p(u, v) \quad (6.4)$$

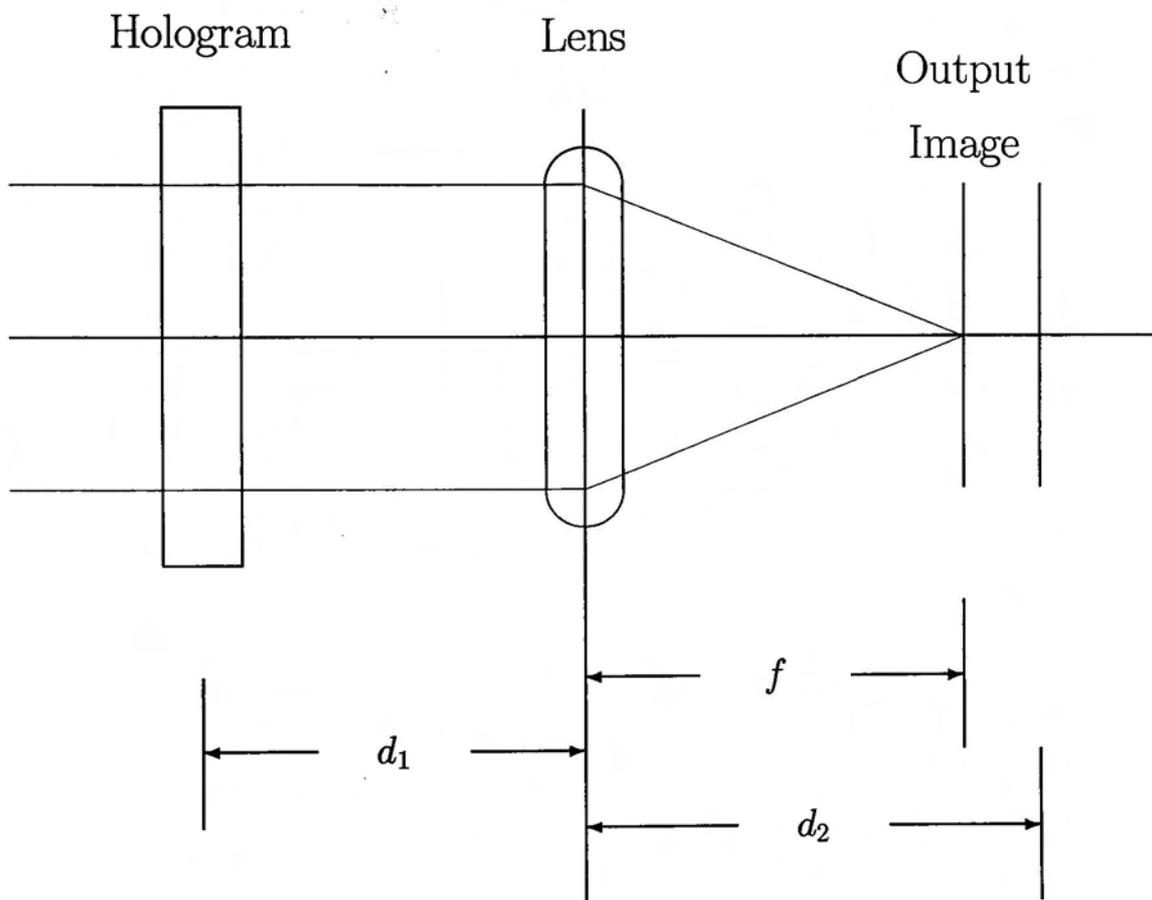


图 6.1: 实验光学系

但し、 $p(u, v)$ はレンズの瞳関数でレンズの口径は十分広いものとする、 $p(x, y) = 1$ とすることができる。レンズを通過し、レンズからの距離 d_2 における複素振幅分布 $r(x, y)$ はフレネル回折に従って次式で示される [67]。

$$\begin{aligned}
 r(x, y) &= \left\{ u^-(x, y) t(x, y) \right\} * \frac{1}{j\lambda d_2} \exp \left\{ \frac{\pi}{j\lambda d_2} (x^2 + y^2) \right\} \\
 &= \frac{1}{j\lambda d_2} \exp \left\{ \frac{\pi(f - d_2)}{j\lambda f d_2} (u^2 + v^2) \right\} \\
 &\quad \cdot \iint u^-(u, v) \exp \left\{ \frac{\pi(f - d_2)}{j\lambda f d_2} (u^2 + v^2) \right\} \\
 &\quad \cdot \exp \left\{ \frac{2\pi}{j\lambda d_2} (xu + yv) \right\} dudv \tag{6.5}
 \end{aligned}$$

式 (6.5) に式 (6.3), (6.4) を代入すると、計算機ホログラムに記録された複素振幅 $H(u, v)$ と再生像の複素振幅 $r(x, y)$ との関係が次式で表される。

$$\begin{aligned}
 r(x, y) &= \frac{w}{j\lambda d_1 d_2} \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} (x^2 + y^2) \right\} \exp \left\{ \frac{\pi(d_2 - w)}{j\lambda d_2^2} (x^2 + y^2) \right\} \\
 &\quad \cdot \iint H(u, v) \exp \left\{ \frac{\pi(d_1 - w)}{j\lambda d_1^2} (u^2 + v^2) \right\} \\
 &\quad \cdot \exp \left\{ \frac{2\pi w}{j\lambda d_1 d_2} (xu + yv) \right\} dudv \tag{6.6}
 \end{aligned}$$

但し、 w は次式で表される。

$$\frac{1}{w} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} - \frac{1}{f} \tag{6.7}$$

式 (6.6) により数値計算を行う場合には、次式に示すように、離散フーリエ変換を用いた計算が可能となる。

$$\begin{aligned}
 r(m, n) &= \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} H(k, l) \exp \left\{ \frac{\pi(d_1 - w)L^2}{j\lambda d_1^2 N^2} \left(\left(k - \frac{N}{2} \right)^2 + \left(l - \frac{N}{2} \right)^2 \right) \right\} \\
 &\quad \cdot \exp \left\{ \frac{2\pi}{jN} (km + ln) \right\} \tag{6.8}
 \end{aligned}$$

但し、 N は標本点数、 L はホログラムパターンの大きさ、 k, l, m, n は0から $N-1$ の値を取る整数であり、式(6.6)における定数項は再生像の振幅分布に寄与しないため省略している。

なお、式(6.8)による計算を可能とする条件は、式(6.8)の右辺第2項における位相項の位相変化が隣り合うサンプル点で最大 π 以下となることである。すなわち、次式で示す条件を満たすことである。

$$\frac{\pi(d_1 - w)L^2}{\lambda d_1^2 N^2} \left(\left(k - \frac{N}{2}\right)^2 - \left((k-1) - \frac{N}{2}\right)^2 \right) < \pi \quad (6.9)$$

この不等式を簡単化すると次式で表現される。

$$\frac{d_1 - w}{d_1^2} < \frac{\lambda N}{L^2} \quad (6.10)$$

6.3 計算機シミュレーションと光学再生実験

本節では、計算機ホログラムの3次元像再生を計算機シミュレーションにより行い、光学再生像と比較を行う。

用いた計算機ホログラムは、Brown-Lohmannの方法[17]によるもので、1つのサンプル点を 4×4 画素で表示したものである。入力物体は、 128×128 画素の領域に対して、焦点面に文字パターン“九州”を、焦点面より30mm離れた位置に文字パターン“工大”をそれぞれが互いに重ならないように配置している。また、入力物体に付加する位相はランダム位相とした。

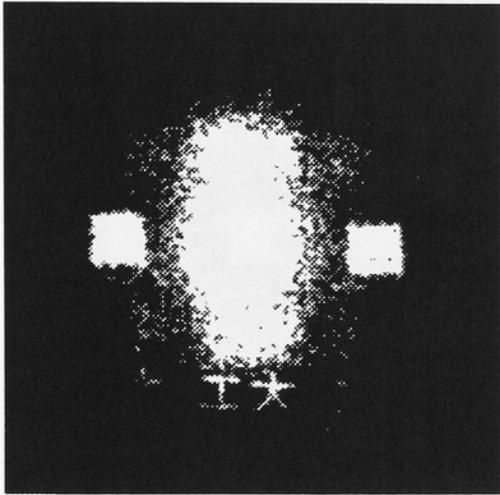
計算機シミュレーションによる再生像はホログラムパターンをスキャニングし、式(6.8)に対応した計算を行い、再生像の強度を256階調でモニタに表示したものを写真撮影する

ことにより得た。なお、レンズの焦点距離 f は 300mm, 記録されたホログラムパターンの大きさ L は 10mm とした。

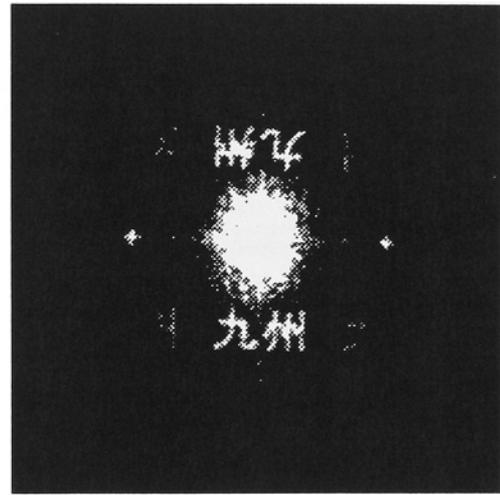
光学再生像は、ビームエキスパンダによって拡げられた He-Ne レーザ ($\lambda=632.8\text{nm}$) をホログラムに照射し、フーリエ変換レンズを通過した後結像したものを CCD カメラで撮像し、ビデオプリンタで印画することにより得た。なお、光学再生実験に用いたホログラムは、ホログラムパターンをグラフィックディスプレイに表示した後、そのハードコピーを白黒写真フィルム (富士写真フィルム製ミニコピーフィルム) に縮写することによって作製した。

まず、ホログラムからレンズまでの距離 d_1 をレンズの焦点距離 f と等しくした場合の、光学再生像を図 6.2 に、計算機シミュレーションによる再生像を図 6.3 にそれぞれ示す。レンズの後側焦点面においては文字パターン“九州”が焦点に関して対称に再生されていることがわかる。焦点面から 30mm 前側に離れた面においては文字パターン“工大”が 1 箇所だけ再生されている。焦点面から 30mm 後側に離れた面においては文字パターン“工大”が 1 箇所だけ焦点に関して空間的対称な位置に再生されていることがわかる。このことから、再生物体は焦点に関して空間的対称に再生されるという 3 次元計算機ホログラム再生像の性質 [64] が計算機シミュレーションでも確認できることがわかる。従って、計算機シミュレーションによる再生像は光学再生像とよく一致している言うことができる。

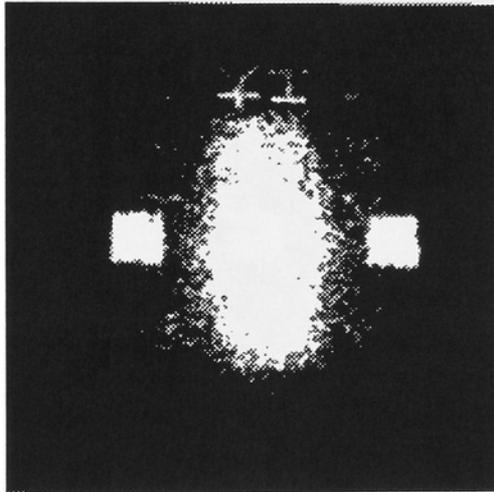
次に、ホログラムからレンズまでの距離が焦点距離と等しくない場合 ($d_2 = 0.4f$) の光学再生像を図 6.4 に、計算機シミュレーションによる再生像を図 6.5 に示す。この場合も、焦点面に文字パターン“九州”が焦点に関して対称に再生されており、焦点から 30mm 離れた



(a) $d_2 = 330\text{mm}$

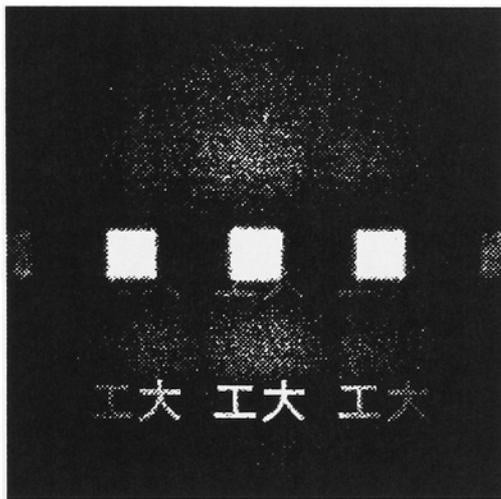


(b) $d_2 = 300\text{mm}$

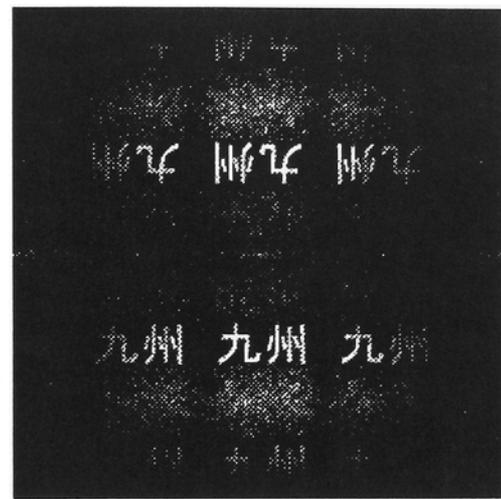


(c) $d_2 = 270\text{mm}$

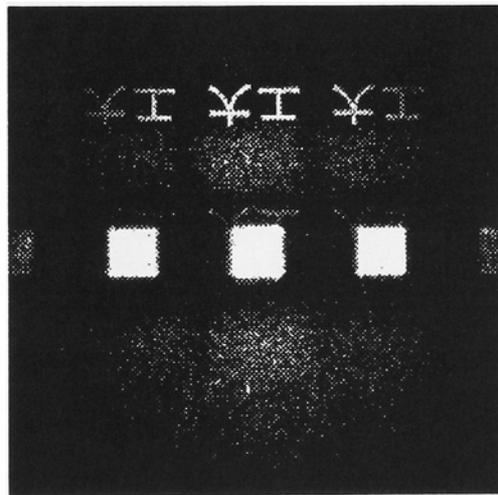
图 6.2: 光学再生像 ($d_1 = f$).



(a) $d_2 = 330\text{mm}$

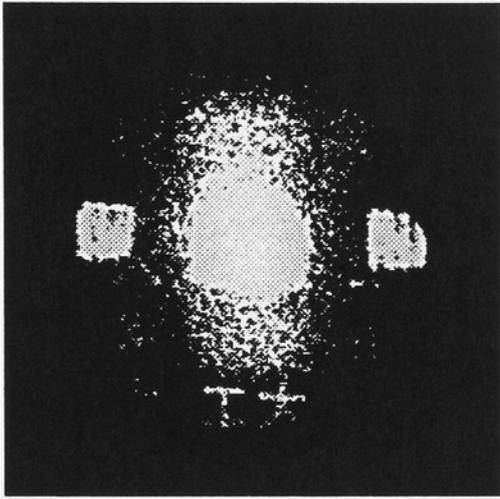


(b) $d_2 = 300\text{mm}$

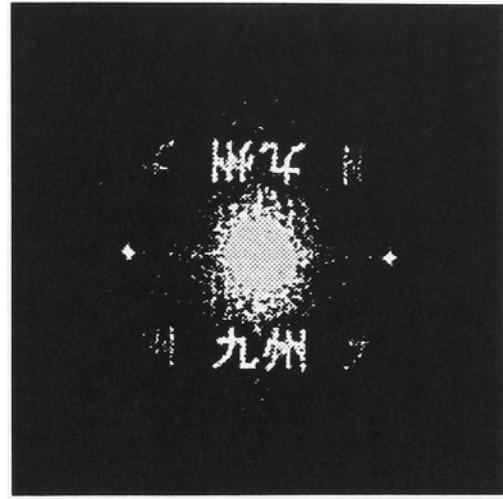


(c) $d_2 = 270\text{mm}$

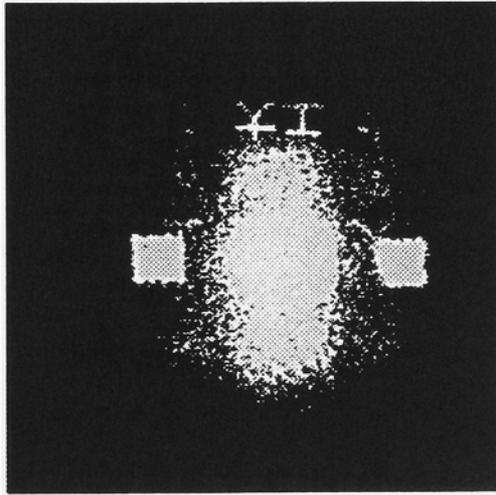
図 6.3: シミュレーションによる再生像 ($d_1 = f$).



(a) $d_2 = 330\text{mm}$

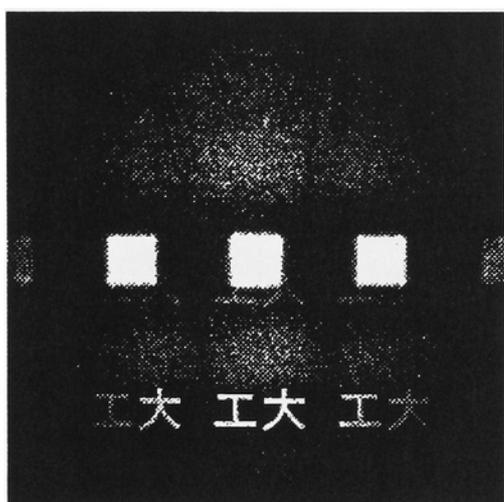


(b) $d_2 = 300\text{mm}$

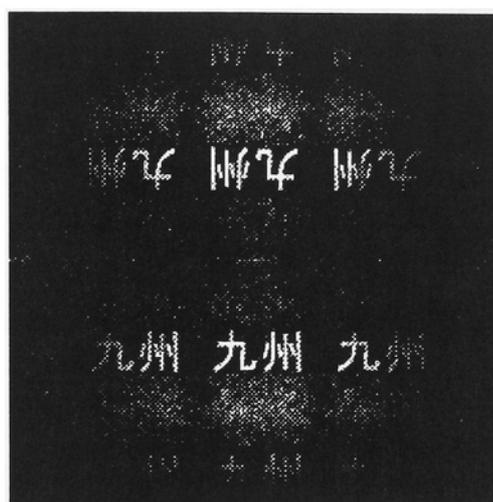


(c) $d_2 = 270\text{mm}$

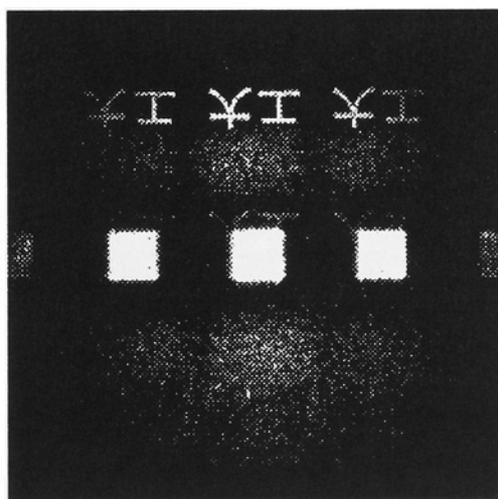
图 6.4: 光学再生像 ($d_1 = 0.4f$).



(a) $d_2 = 330\text{mm}$



(b) $d_2 = 300\text{mm}$



(c) $d_2 = 270\text{mm}$

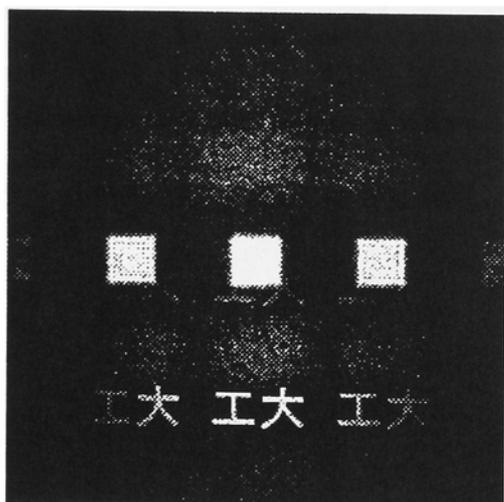
図 6.5: シミュレーションによる再生像 ($d_1 = 0.4f$).

面においては文字パターン“工大”が焦点に関して空間的対称に再生されている。光学実験においては再生パターンの大きさが焦点面以外で変化することが知られている [64] が、計算機シミュレーションではこの現象は認められない。その理由は次のことによる。すなわち、計算機シミュレーションを行う際に離散フーリエ変換を用いた計算をしているが、標本点間隔が d_1 ならびに d_2 によって変動するにもかかわらず、表示の際モニタ上での標本点の間隔が変動していないためである。一般的に、レンズから距離 d_2 の面における再生物体の寸法と焦点面における再生物体の寸法との比 ζ は、次式で与えられる [64]。

$$\zeta = \frac{d_2}{f} \left(1 - \frac{d_1}{f} \right) + \frac{d_1}{f} \quad (6.11)$$

従って、数値的再生像を表示する際にはモニタ上の隣り合う標本点の間隔を式 (6.11) に応じて伸縮させればよい。この場合も、計算機シミュレーションによる再生像は光学再生像と再生物体の大きさの変化を除いてよく一致していることがわかる。

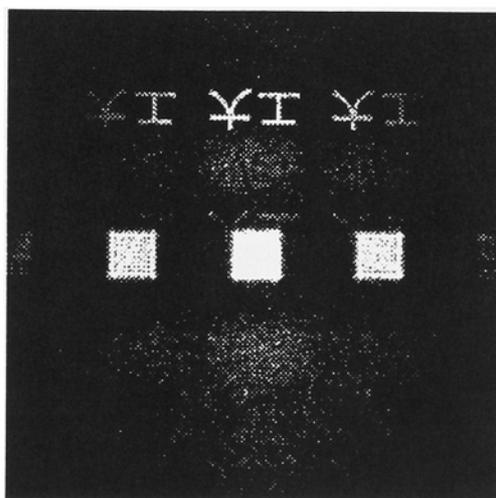
更に、この像再生シミュレーションを用いた再生像の検討の一例として、デトア位相法による計算機プログラムの表示方式に対する再生像の評価について述べる。すなわち、Brown-Lohmann の方法 [17] と、尾上-金子の方法 [64] との2種類について、3次元物体再生計算機プログラムからの再生像の評価を行う。但し、尾上-金子の方法については文献 [66] に示されている A-III タイプによるものとする [64] (付録 A.5 参照)。尾上-金子の方法による再生像を図 6.6 に示す。但し、再生に関する条件は図 6.3 に示したものと同一としている。図 6.3, 図 6.6 より、尾上-金子の方法による再生像は、Brown-Lohmann の方法を用いた場合と比較して、再生パターンがはっきりと再生されていることがわかる。これらの再生像に関して、定量的評価を行う。定量的評価に用いる評価量は、再生パターンが存在する 1



(a) $d_2 = 330\text{mm}$



(b) $d_2 = 300\text{mm}$



(c) $d_2 = 270\text{mm}$

図 6.6: シミュレーションによる再生像 (尾上-金子の方法).

表 6.1: 表示方式に対する再生像の比較 (MSE)

表示方式	“九州”	“工大”
Brown-Lohmann の方法	1.00	1.00
尾上-金子の方法	0.82	0.90

次の回折光の成分の領域についての平均 2 乗誤差 MSE とする。この平均 2 乗誤差 MSE は式 (3.13) で表される [40]。表 6.1 に、それぞれの方法による再生像の平均 2 乗誤差を示している。表中の数値は Brown-Lohmann の方法による再生像の数値で正規化している。この結果より、尾上-金子の方法は、Brown-Lohmann の方法と比較して、再生像の平均 2 乗誤差 MSE が小さくなる方式であることがわかる。

2 次元計算機プログラムに関して、尾上-金子の方法[†]は Brown-Lohmann の方法と比較して優れた再生像を与える方式である [66] という知見があるが、この知見を 3 次元計算機プログラムにも拡張できることを表 6.1 の結果は示唆していると考えられる。

6.4 結 言

本章では、計算機プログラムからの 3 次元像再生を計算機シミュレーションにより行い、光学再生像との比較検討をした。

まず、計算機プログラムからの再生像を回折理論により解析し、計算機シミュレーションは離散フーリエ変換を用いた計算によって可能となることを示した。

次に、Brown-Lohmann 型計算機プログラムを合成し、計算機シミュレーションと光学実験とを行った。計算機シミュレーションによる再生像は光学再生像とよく一致することが明らかとなった。

更に、像再生シミュレーションを用いた再生像の検討の一例として、デトア位相法による計算機プログラムの表示方式についての比較を行った。比較した表示方式は Brown-Lohmann

[†]文献 [66] においては A-III, B-II, C タイプの 3 種類のことを指しているが、本論文ではこのなかの A-III タイプのことをいう。

の方法と尾上-金子の方法との2つである。その結果、尾上-金子の方法は Brown-Lohmann の方法と比較して優れた再生像を与え、2次元物体を再生する計算機プログラムの場合と同様な傾向が現れることが明らかとなった。

これらのことから、計算機プログラムの3次元像再生シミュレーションが実行できることが明らかとなった。

第 7 章

3 次元像再生への誤差拡散法

7.1 緒 言

第5章までにおいては，2次元物体を再生する計算機プログラムに対して誤差拡散法を適用してきた．それにより，誤差拡散法は良質な再生像を得ることのできる方法であるということがわかった．しかしながら，計算機プログラム [7], [39], [40], [43], [45], [64] の最終的な作成目的の1つは，3次元物体の再生にあるため，実用にはまだ程遠いのが実情であった．このため，以上に述べた知見を3次元物体を再生する計算機プログラムに拡張することが必要となってくる．前章では，3次元物体を再生する計算機プログラムに誤差拡散法を拡張するための準備として，3次元物体を再生する計算機プログラムの1つである断層タイプの計算機プログラムの計算機シミュレーションの方法 [65] について述べた．本章では，誤差拡散法を3次元物体を再生する計算機プログラムに対して適用する．

本章では，誤差拡散法を適用し，断層タイプの3次元計算機プログラム [7], [64] の再生像の改善について検討する．まず，拡散係数に対する効果を検討する．次に，誤差拡散法の再生像と種々の表示方式の再生像とを，プログラムパターンを同一画素数で表示する条

件のもとで比較する。更に、光学実験によって誤差拡散法による3次元計算機ホログラムからの再生像の確認を行う。

7.2 3次元物体再生計算機ホログラムへの適用

本節では、誤差拡散法により断層タイプの3次元計算機ホログラムを合成する方法について述べる。

再生パターンその位置を図7.1に示す。文字パターン“九州”，“工大”はともに画素数128(H)×64(V)の大きさを有し、画素数128×128の範囲でお互いに重なり合わないよう配置している。作製される計算機ホログラムは画素数512×512で構成される。入力像の座標系を (x, y, z) ，フーリエ変換面の座標系を (u, v, z) と定義する。また、 x, y, u, v の離散座標をそれぞれ m, n, k, l とする。入力物体 $g(m, n, z)$ を次式により定義し計算機のメモリに格納する。

$$g(m, n, z) = \begin{cases} 1 \cdot \exp(j\phi_R) & \text{(黒い部分)} \\ 0 & \text{(それ以外)} \end{cases} \quad (7.1)$$

但し、 ϕ_R はランダム位相で0から 2π にわたって分布する一様乱数である。

この入力像を次式に従って離散フーリエ変換する。

$$G(k, l, z) = \frac{1}{\sqrt{N^2}} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} g(m, n, z) \exp \left\{ -j \frac{2\pi(mk + nl)}{N} \right\} \quad (7.2)$$

但し、 N は入力像平面における一辺当りの画素数であり、ここでは $N = 512$ である。3次元計算機ホログラムに記録する波面 $F(k, l)$ を次式により計算する。

$$F(k, l) = \sum_z \exp \left\{ \frac{\pi(f-z)L^2}{j\lambda f^2 N^2} \left(\left(k - \frac{N}{2} \right)^2 + \left(l - \frac{N}{2} \right)^2 \right) \right\} G(k, l, z) \quad (7.3)$$

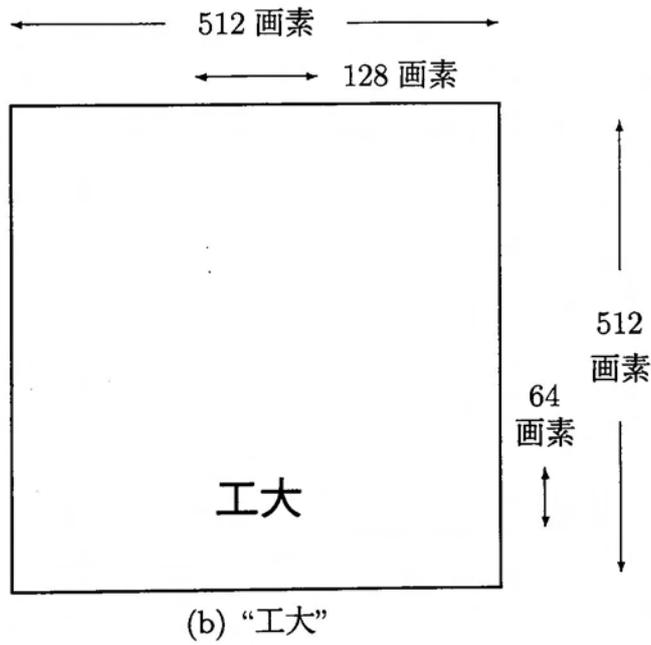
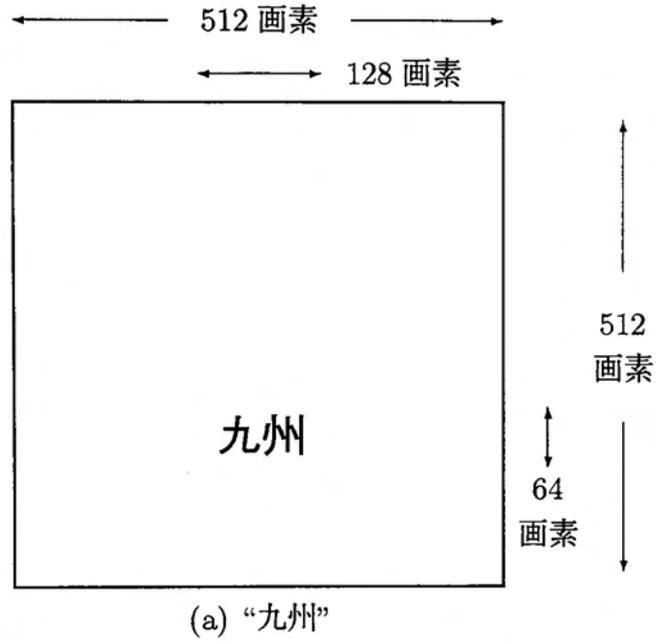


図 7.1: 再生パターンとその位置

但し、 f はレンズの焦点距離、 L はホログラムパターンの大きさ、 $G(k, l, z)$ は $g(m, n, z)$ の2次元フーリエ変換である。この $F(k, l)$ を次式に従って、複素数値における実部の絶対値の最大が1となるようにあらかじめスケーリングしておく。

$$F_s(k, l) = \frac{F(k, l)}{\max |\operatorname{Re}[F(k, l)]|} \quad (7.4)$$

このスケーリングされた値 $F_s(k, l)$ を2値に位相量子化する。

まず、 $(k, l) = (0, 0)$ のフーリエ変換値を、次式に従って2値に量子化し、量子化値 $F'(0, 0)$ を得る。

$$F'(k, l) = \begin{cases} \exp(j0) & (-\pi/2 \leq \arg[F(k, l)] \leq \pi/2) \\ \exp(j\pi) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (7.5)$$

このとき、次式に示す量子化誤差が発生する。

$$s(k, l) = F_s(k, l) - F'(k, l) \quad (7.6)$$

この量子化誤差 $s(0, 0)$ を図7.2に示すように四つの方向にそれぞれ $\beta(1, 0)$ 、 $\beta(1, 1)$ 、 $\beta(0, 1)$ 、 $\beta(-1, 1)$ なる拡散係数を乗じ、誤差拡散を行う。このプロセスを次式に示す。

$$F_s(k + k', l + l') = F_s(k + k', l + l') - \beta(k', l')s(k, l) \quad (7.7)$$

但し、 (k', l') の組合わせは、 $(1, 0)$ 、 $(1, 1)$ 、 $(0, 1)$ 、 $(-1, 1)$ の4通りであり、 (k, l) の定義されない領域への誤差拡散は行わないものとする。また、式(7.7)は、手続き型計算機言語にみられる形式のものであり、右辺の値を改めて左辺に代入することを意味する。

このアルゴリズムにより、2値に量子化した結果を白黒2値すなわち+1を白、-1を黒と表示することによって作製される。

7.3 計算機シミュレーション

計算機シミュレーションは、図 7.3 に示す光学系を用いることを想定し、計算機ホログラムのパターンをスキヤニングし、式 (6.8) に示した回折計算をすることによって行う [65]。但し、ホログラムからレンズまでの距離 d_1 はレンズの焦点距離 $f (=300\text{mm})$ を等しくするものとし、ホログラムの大きさは 10mm としている。なお、光源には He-Ne レーザを用いるものとする。

計算機シミュレーションによる再生像は、強度を 256 階調でモニタに表示した後、写真撮影することによって得る。

7.3.1 拡散係数に対する効果

ここでは、拡散係数に対する効果について論じる。誤差拡散法で用いた拡散係数は図 7.4 に示している。

図 7.5 に誤差拡散を適用しない場合の再生像を示す。いずれの面においても、雑音がパターンの周辺に強く現れているために、パターンがはっきりと現れていないことがわかる。

図 7.6~7.8 に誤差拡散法 [31], [39], [41] を適用した再生像を示す。拡散係数により拡散された雑音の発生位置が異なっているが、いずれの場合もパターンと雑音とを分離されている。このことにより、再生像は誤差拡散を適用しない場合と比較すると改善されていることがわかる。しかしながら、図 7.6 に示す Floyd-Steinberg の係数を用いた場合ならびに図 7.7 に示す Barnard の係数の変形を用いた場合は、文字パターン“工大”が再生される領域に拡散された雑音が接しているため、再生像の改善が不十分である。

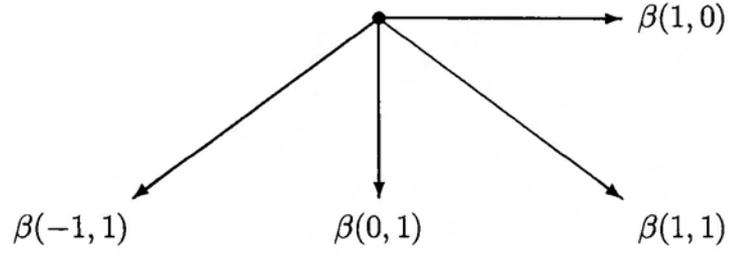


図 7.2: 2次元の誤差拡散の方向

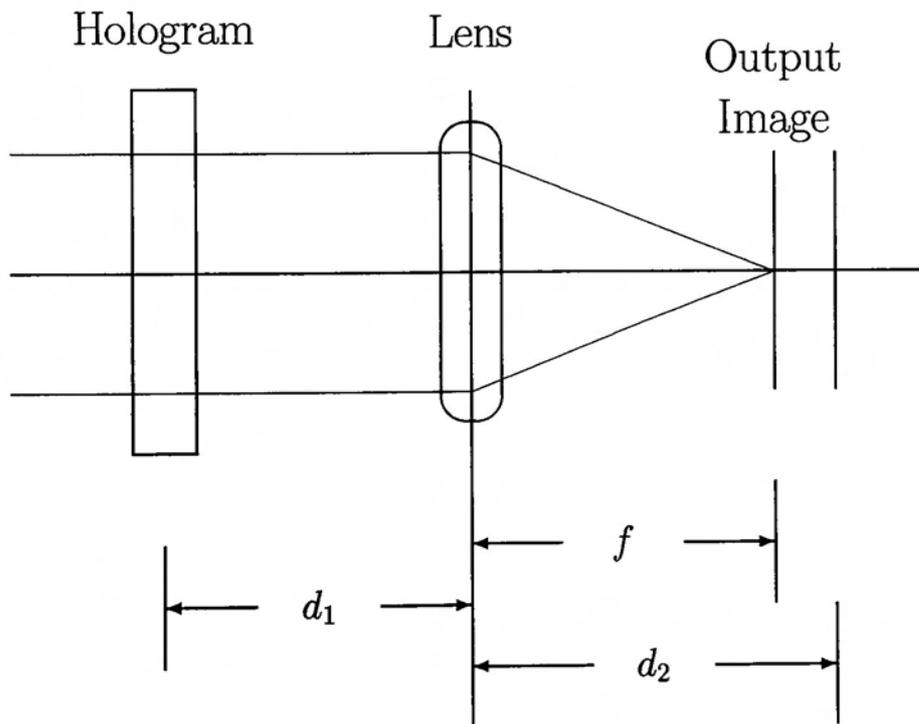
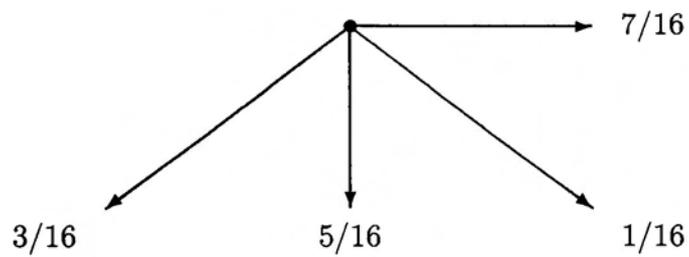
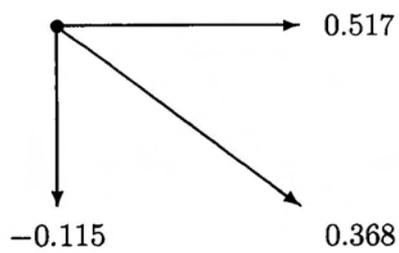


図 7.3: 光学系



(a) Floyd-Steinberg の係数

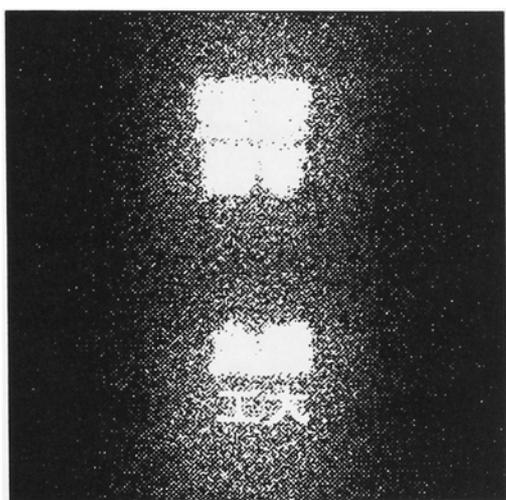


(b) Barnard の係数の変形

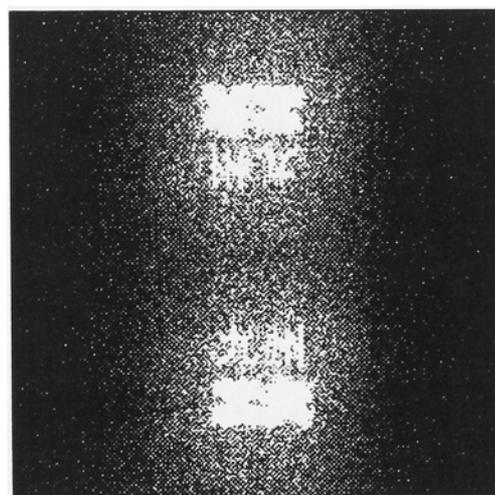


(c) Hauck-Bryngdahl の係数

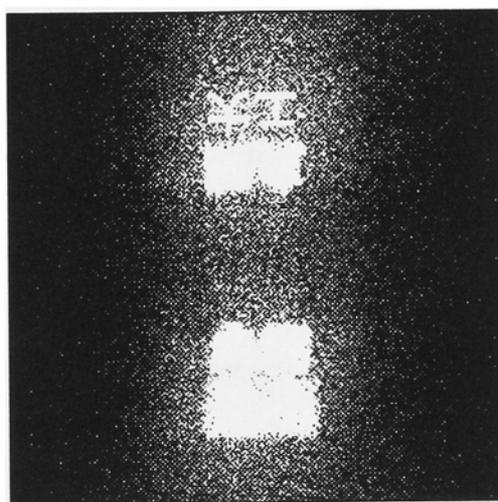
図 7.4: 拡散係数



(a) $d_2 = 310\text{mm}$

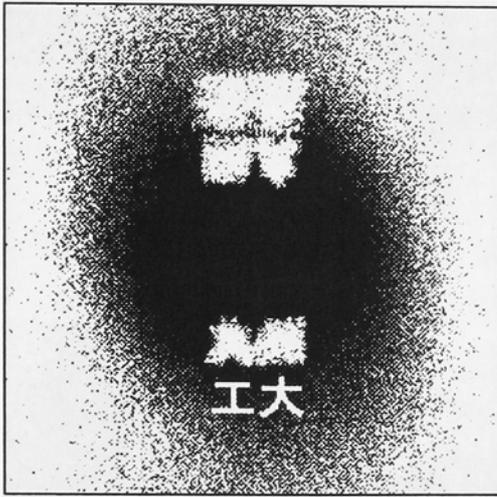


(b) $d_2 = 300\text{mm}$

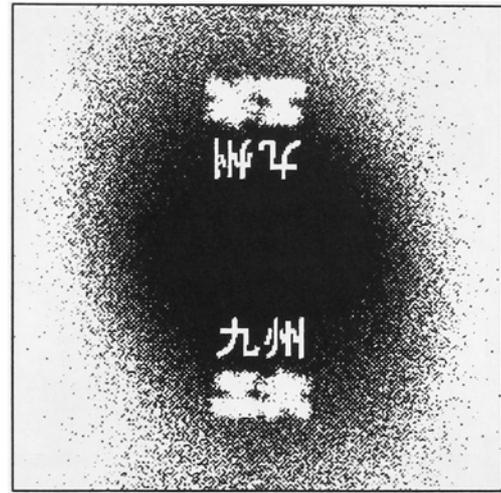


(c) $d_2 = 290\text{mm}$

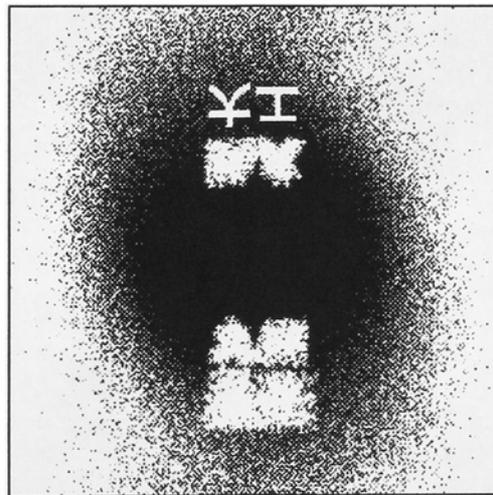
図 7.5: 再生像 (誤差拡散なし)



(a) $d_2 = 310\text{mm}$

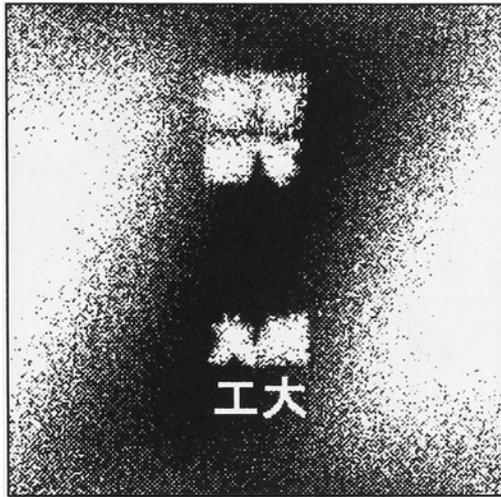


(b) $d_2 = 300\text{mm}$

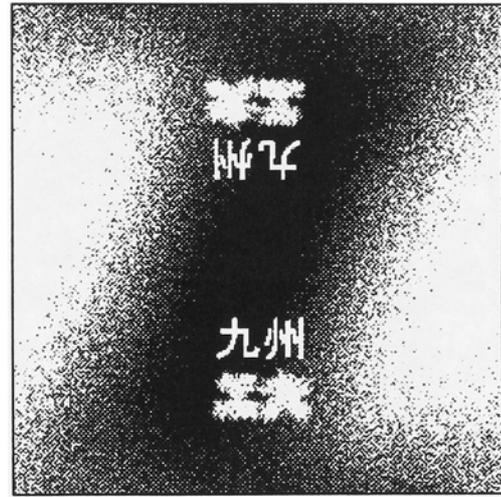


(c) $d_2 = 290\text{mm}$

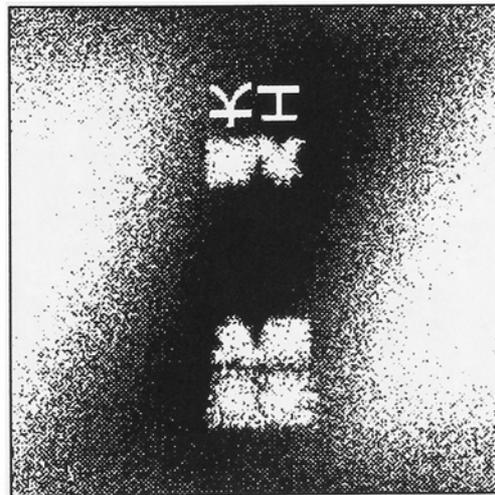
図 7.6: 再生像 (Floyd-Steinberg の係数)



(a) $d_2 = 310\text{mm}$

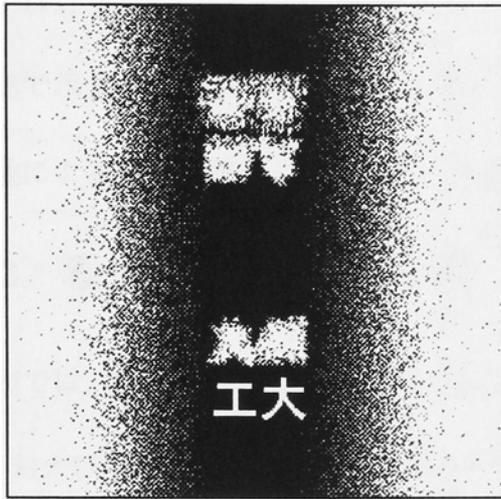


(b) $d_2 = 300\text{mm}$

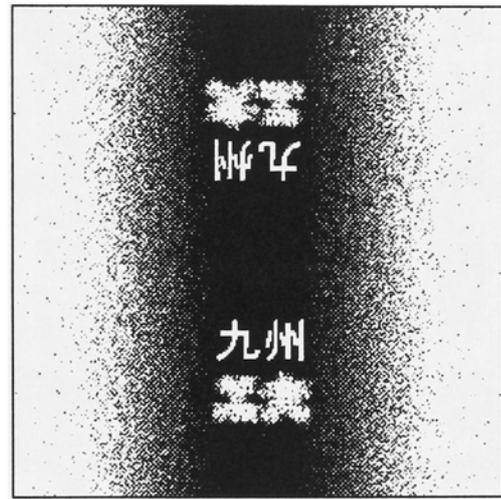


(c) $d_2 = 290\text{mm}$

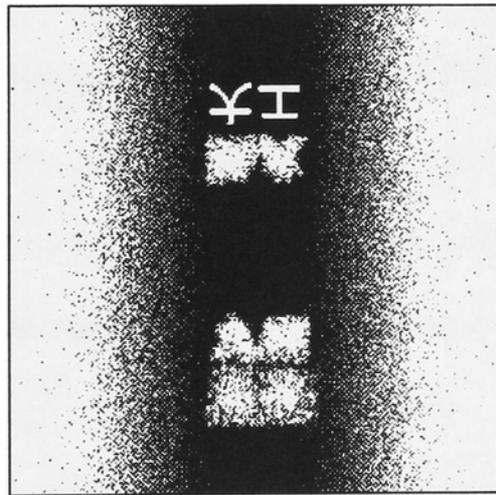
図 7.7: 再生像 (Barnard の係数の変形)



(a) $d_2 = 310\text{mm}$



(b) $d_2 = 300\text{mm}$



(c) $d_2 = 290\text{mm}$

図 7.8: 再生像 (Hauck-Bryngdahl の係数)

次に、再生像を比較する。再生像の比較は、再生像の評価領域をパターンが存在する $128(H) \times 64(V)$ 画素の領域に限定し、その領域における平均 2 乗誤差 (MSE) により定量的に行う。

表 7.1 に、式 (3.13) によって計算された平均 2 乗誤差を誤差拡散なしの場合の値で正規化した値で示す。この結果から平均 2 乗誤差が最も小さいという理由で、Hauck-Bryngdahl の係数による誤差拡散法が最も優れた再生像を与える拡散係数であるといえることができる。

7.3.2 種々の表示方式との比較

本節では、Hauck-Bryngdahl の係数による誤差拡散法の再生像と Brown-Lohmann の方法 [7] および尾上-金子の方法 [64] の再生像とを、ホログラムパターンを 512×512 画素で表示する条件のもとで比較する。

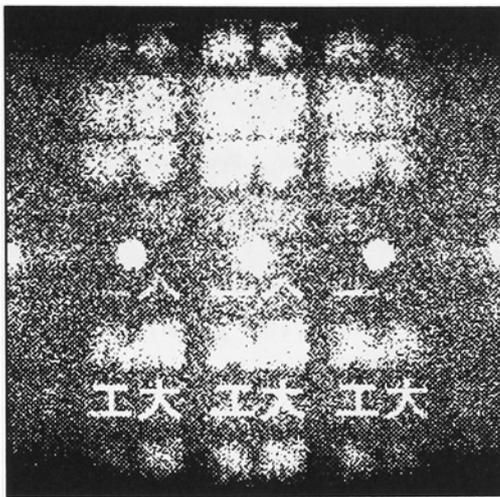
まず、Brown-Lohmann の方法による計算機ホログラム再生像を図 7.9 に示し、尾上-金子の方法による計算機ホログラム再生像を図 7.10 に示す。但し、Brown-Lohmann および尾上-金子の方法については 1 つのサンプル点が 4×4 画素で表示されるものとし、ホログラムパターンを 512×512 画素で表示するために入力像領域すなわちサンプル点数は $128(H) \times 64(V)$ 画素とする。

Brown-Lohmann の方法の再生像は、たとえ最もはっきりと再生されている 1 次の回折光による再生像といえども、誤差拡散法と比較して多くの雑音が発生していることから、再生像は良質ではないといえる。また、尾上-金子の方法の再生像も同様で、再生像は良質ではないといえる。

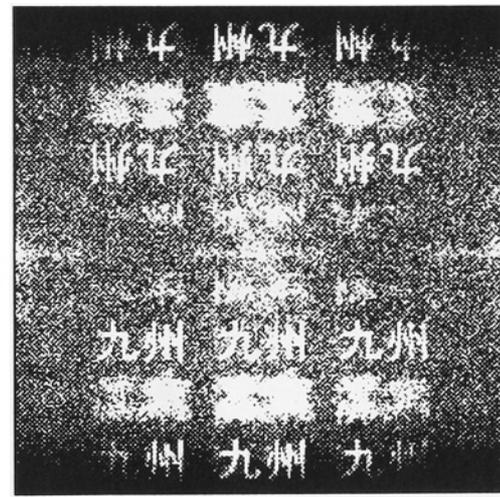
次に、三つの表示方式に対する再生像を比較する。再生像の比較は、再生像の評価領域

表 7.1: 拡散係数に対する再生像の比較 (MSE)

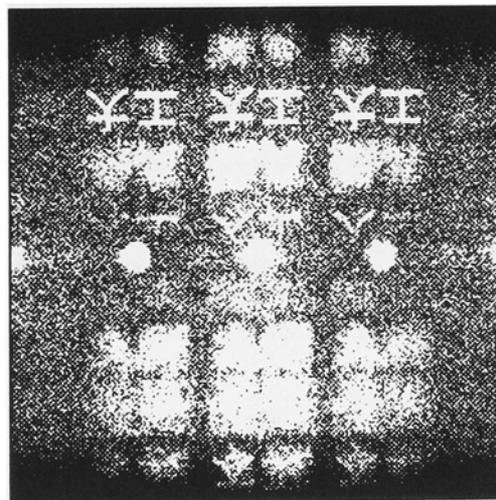
拡散係数	“九州”	“工大”
誤差拡散なし	1.00	1.00
Floyd–Steinberg の係数	0.46	1.01
Barnard の係数の変形	0.75	0.97
Hauck–Bryngdahl の係数	0.42	0.42



(a) $d_2 = 310\text{mm}$

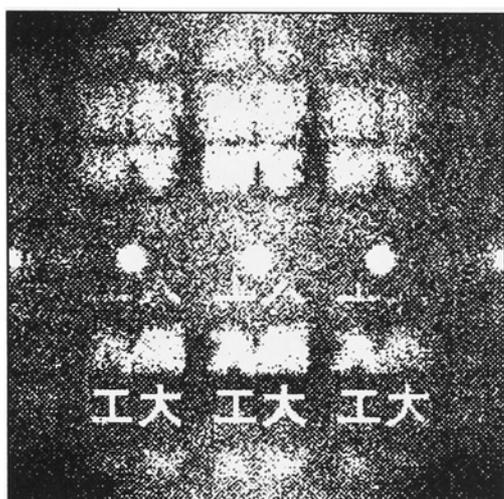


(b) $d_2 = 300\text{mm}$

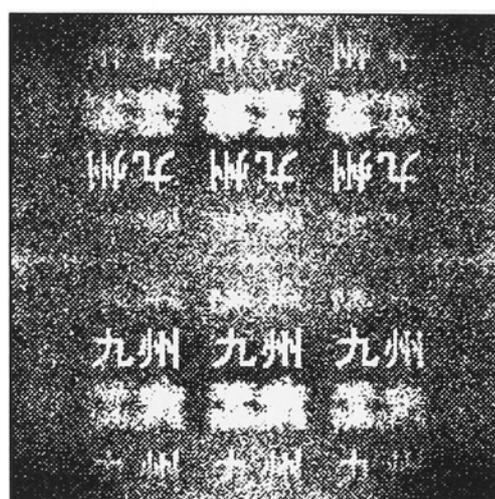


(c) $d_2 = 290\text{mm}$

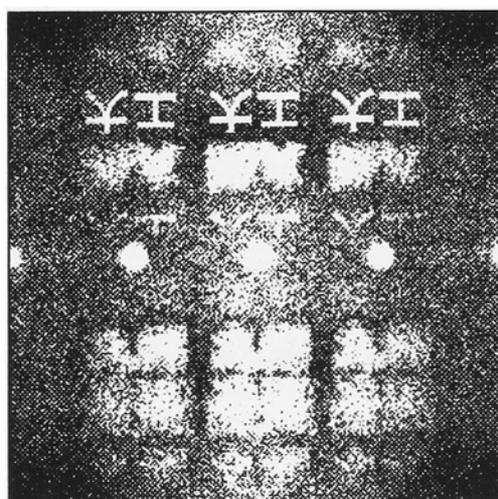
図 7.9: 再生像 (Brown–Lohmann の方法)



(a) $d_2 = 310\text{mm}$



(b) $d_2 = 300\text{mm}$



(c) $d_2 = 290\text{mm}$

図 7.10: 再生像 (尾上-金子の方法)

を1次回折光の領域においてパターンの存在する128(H) × 64(V)画素の領域に限定し、その領域における平均2乗誤差(MSE)により定量的に行う。

表7.2に、式(3.13)によって計算された平均2乗誤差を誤差拡散なしの場合の値で正規化した値で示す。この結果から平均2乗誤差が最も小さいという理由で、誤差拡散法が優れた再生像を与える表示方式であるということが出来る。

7.4 光学再生実験

本節では、計算機シミュレーションと同様な光学的な再生像を得られることを光学実験によって確認する。

光学再生実験に用いるホログラムは、ホログラムパターンを、グラフィックディスプレイに表示し、そのハードコピーを写真フィルム(富士写真フィルム製ミニコピーフィルム)に縮写して作製する。光学再生像は、図7.3に示すように、ホログラムにビームエキスパンダを用いて拡げられたHe-Neレーザ(632.8nm)を照射し、焦点距離 f のフーリエ変換レンズを用いて焦点面においてはフーリエ変換、それ以外の面においてはフレネル変換し、再生像面に結像させ、40万画素CCDカメラ(東京電子工業製SC3330S)を用いて撮像し、ビデオプリンタ(富士写真工機製FTI-500)に印画する。

図7.5に対応した光学再生像すなわち誤差拡散法を適用しない場合の光学再生像を図7.11に、また、図7.8に対応した光学再生像すなわちHauck-Bryngdahlの係数による誤差拡散法を適用した場合の光学再生像を図7.12にそれぞれ示す。但し、 d_1 はレンズの焦点距離 f と等しくしている。

これらの結果より、シミュレーションによる再生像と光学再生像とはよく一致している
わかる。

7.5 結 言

本章では、3次元物体再生計算機プログラムに誤差拡散法を適用し、再生像の改善について検討した。

まず、誤差拡散の有無に対する効果を検討し、誤差拡散法はパターンと雑音とを分離することにより、再生像の改善ができることが明らかとなった。

次に、拡散係数に対する効果について検討し、Hauck-Bryngdahl の係数による誤差拡散法は、他の拡散係数と比較して、平均2乗誤差がより小さいため、優れた再生像を得ることのできる拡散係数であることが明らかとなった。

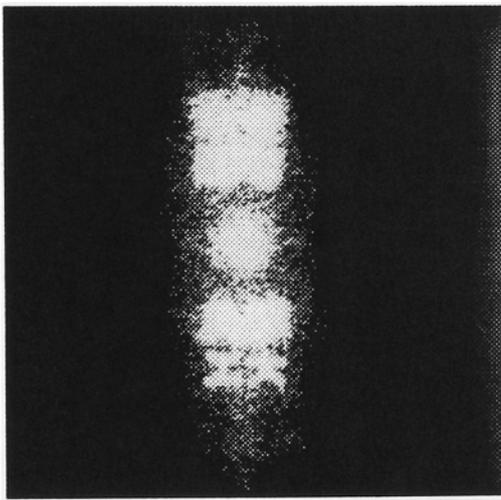
また、誤差拡散法の再生像と他の表示方式すなわち Brown-Lohmann の方法 [7] の再生像および尾上-金子の方法 [64] の再生像とを、 512×512 画素でプログラムパターンを構成する条件のもとで比較した。その結果、誤差拡散法の再生像は、他の表示方式と比較して、平均2乗誤差がより小さいため、優れた再生像を得ることのできる表示方式であることが明らかとなった。

更に、光学実験を行い、計算機シミュレーションによる再生像は光学再生像とよく一致することを確認した。以上のことから、誤差拡散法は、再生像におけるパターンと雑音とを分離することにより、他の表示方式と比較して、優れた再生像を得ることのできる方式であることが明らかとなった。

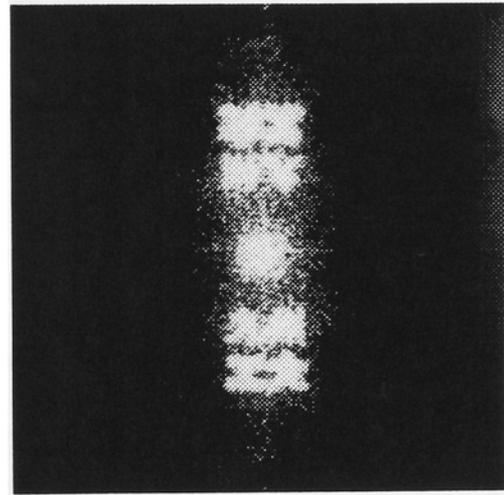
表 7.2: 表示方式による再生像の比較

表示方式	“九州”	“工大”
Brown-Lohmann の方法	2.02	1.81
尾上-金子の方法	1.45	1.46
誤差拡散法	0.42	0.42

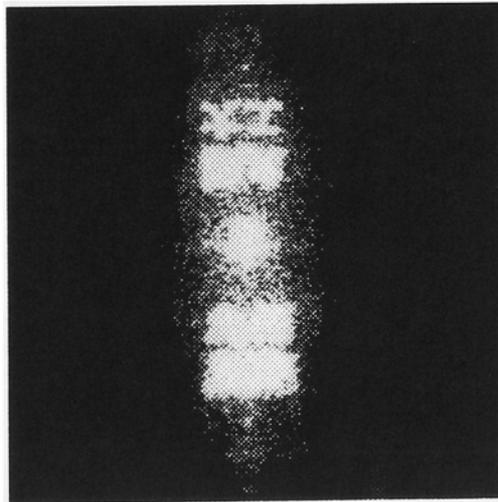
(誤差拡散法：Hauck-Bryngdahl の係数)



(a) $d_2 = 310\text{mm}$

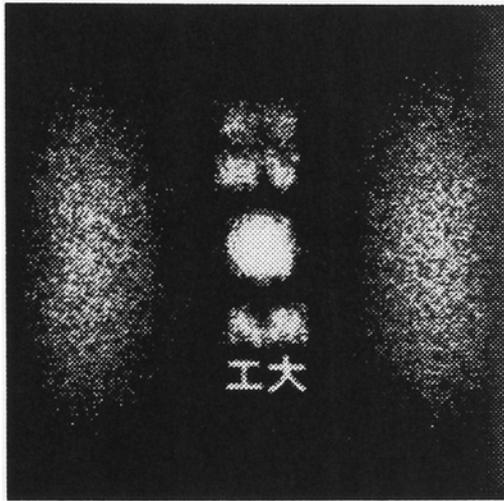


(b) $d_2 = 300\text{mm}$

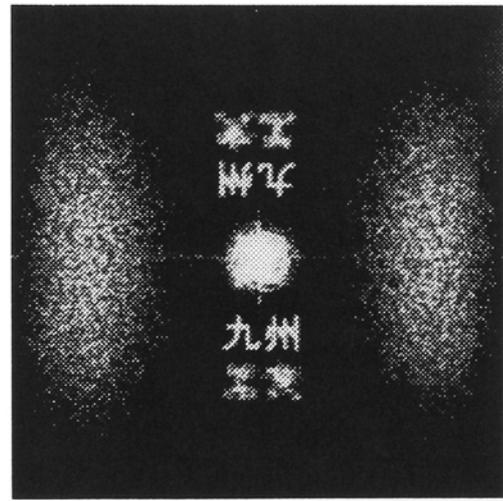


(c) $d_2 = 290\text{mm}$

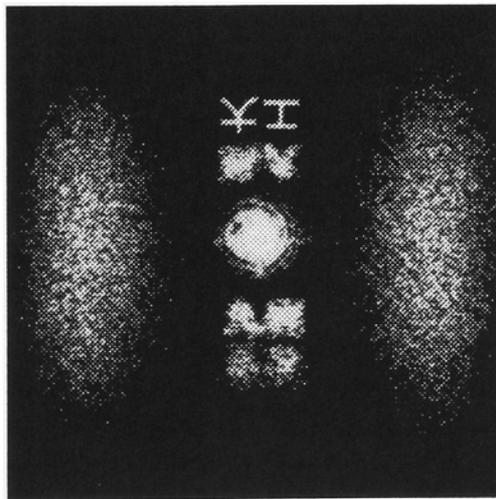
図 7.11: 光学再生像 (誤差拡散なし)



(a) $d_2 = 310\text{mm}$



(b) $d_2 = 300\text{mm}$



(c) $d_2 = 290\text{mm}$

図 7.12: 光学再生像 (誤差拡散法)

第 8 章

結 論

本論文では、2 値に位相量子化した計算機ホログラムに対して誤差拡散法を適用し、像再生についての検討を行った。

誤差拡散法を、2 値に位相量子化した計算機ホログラムに対して適用すると、少ない画素数で、また 1 回の処理によってホログラムを作製することが可能となり、しかも良質な再生像となることが期待できるが、このときに問題となってくる点は以下の通りであった：

1. 2 値に位相量子化した計算機ホログラムへの誤差拡散法の有効性
2. 誤差拡散法の走査に対する影響
3. 誤差拡散法のアルゴリズムにおけるしきい値の影響
4. 計算機ホログラムの最終的な作製目的のひとつである 3 次元像再生への拡張

以上に示した問題点に対して、本論文で得られた結果を以下に示す。

第 1 の問題について、誤差拡散法を 2 値に位相量子化した計算機ホログラムに適用し、この再生像改善に対する有効性について検討した。第 3 章では、ラスト走査による誤差拡

散法を2値に位相量子化した計算機プログラムに適用した場合における再生像改善に対する有効性についてを計算機シミュレーションにより検討し、他の表示方式と比較して優れた再生像であることを示した。以下に第3章で得られた結果を要約する。

1. 種々の拡散係数すなわち Floyd–Steinberg の係数 [31], Barnard の係数 [41], Broja–Eschbach–Bryngdahl の係数 [42] および Hauck–Bryngdahl の第2の係数 [39] に対する効果を検討した結果、平均2乗誤差が小さいことから、1方向の拡散係数すなわち Hauck–Bryngdahl の第2の係数 [39] が再生像の改善として優れた効果を与えることが明らかとなった。
2. Hauck–Bryngdahl の第2の係数 [39] による誤差拡散法の再生像と他の表示方式すなわち Brown–Lohmann の方法 [7], Lee の方法 [14] および繰返し法の再生像 [25] とを、 128×128 画素でホログラムパターンを構成する条件のもとで比較した結果、誤差拡散法の再生像は、他の表示方式と比較して、平均2乗誤差がより小さいため、優れた再生像を与えることのできる表示方式であることが明らかとなった。
3. 光学再生実験により、計算機シミュレーションによる再生像は光学再生像とよく一致することを確認した。

以上のことから、再生像において物体が拡散された雑音に接しない範囲で、誤差拡散法は他の表示方式と比較して、優れた再生像を与えることのできる方式であることが明らかとなった。

第2の問題について、誤差拡散法の走査としてラスタ走査以外の走査を用いた場合につ

いても誤差拡散法の効果について検討した。そのなかで、第4章では、ペアノ走査による誤差拡散法を適用した場合の再生像を、計算機シミュレーションにより検討し、ラスタ走査と比較して優れた再生像を得ることができることを示した。以下に、第4章で得られた結果を要約する。

1. 拡散係数に対する誤差拡散の効果を検討した結果、平均2乗誤差が最も小さいという理由により、図4.7(c)に示した4方向の誤差拡散法が優れた再生像を与える拡散係数であることが明らかとなった。
2. ペアノ走査による誤差拡散法を適用した場合の再生像と、ラスタ走査による誤差拡散法を適用した場合の再生像とを同一物体を用いるという条件の下で比較した結果、ペアノ走査による誤差拡散法はラスタ走査による誤差拡散法と比較して、再生像における雑音の発生する領域が小さく、像が明るく、平均2乗誤差が小さいことから、優れた再生像を与えることが明らかとなった。

以上のことから、ペアノ走査による誤差拡散法が2値に位相量子化した計算機プログラムの再生像を改善するために有効であることが明らかとなった。なお、それ以外の走査例えば往復走査、らせん走査、モルトン走査については第3の問題を検討する際に併せて検討した。

第3の問題について、しきい値が入力データによって異なるエッジ強調誤差拡散法を適用した場合について検討した。第5章で、エッジ強調誤差拡散法の有効性をハーフトーン処理ならびに計算機プログラムの観点から検討し、計算機プログラムに対するエッジ強調

誤差拡散法が走査をペアノ走査とした場合において顕著な効果を有することを示した。以下に、第5章で得られた結果を要約する。

まず、ハーフトーン処理に対する結果を要約する。

1. ラスタ走査を適用した場合は像のエッジが強調されるが、階調濃度の変化の少ない領域では規則的な縞模様が発生することが明らかとなった。
2. ペアノ走査を適用した場合はペアノ走査の特徴を損なうことなく像のエッジやコントラストが強調されることが明らかとなった。

次に、計算機ホログラムに対する結果を要約する。

1. エッジ強調誤差拡散法における走査すなわちラスタ走査、往復走査、らせん走査、モルソン走査、ペアノ走査について検討した結果、平均2乗誤差が小さくなるという理由により、ペアノ走査が優れた再生像を与える走査であることが明らかとなった。
2. エッジ強調誤差拡散法における強調係数については、強調係数を大きくするに従って再生像を改善することができることが明らかとなった。

以上のことより、エッジ強調誤差拡散法は、走査をペアノ走査とした場合において計算機ホログラムの再生像改善に顕著な効果を示すことが明らかとなった。

第4の問題について、断層タイプの3次元物体再生計算機ホログラムに対して誤差拡散法を拡張した。第6章で3次元物体を再生する計算機ホログラムを数値シミュレーションによって再生する方法について述べ、第7章で3次元物体を再生する断層タイプの計算機

ホログラムに誤差拡散法を拡張できることを示した。まず、第6章で得られた結果を以下に要約する。

1. 計算機ホログラムからの再生像を回折理論により解析し、計算機シミュレーションは離散フーリエ変換を用いた計算によって可能となることを明らかにした。
2. Brown-Lohmannの方法による計算機ホログラムを合成し、計算機シミュレーションと光学実験とを行った。計算機シミュレーションによる再生像は光学再生像とよく一致することが明らかとなった。
3. 像再生シミュレーションを用いた再生像の検討の一例として、デトア位相法による計算機ホログラムの表示方式についての比較を行った結果、2次元物体を再生する計算機ホログラムの場合と同様な傾向が現れることが明らかとなった。

以上のことから、計算機ホログラムの3次元像再生シミュレーションが実行できることが明らかとなった。次に、第7章で得られた結果を以下に要約する。

1. 誤差拡散の有無に対する効果を検討し、誤差拡散法は物体と雑音とを分離することにより、再生像の改善ができることを示した。
2. 拡散係数に対する効果について検討し、Hauck-Bryngdahlの係数による誤差拡散法が、他の拡散係数と比較して、平均2乗誤差がより小さいため、優れた再生像を得ることのできる拡散係数であることを明らかにした。
3. 誤差拡散法の再生像と他の表示方式すなわちBrown-Lohmannの方法[7]の再生像および尾上-金子の方法[64]の再生像とを、 512×512 画素でホログラムパターンを構成

する条件のもとで比較した結果、誤差拡散法の再生像が、他の表示方式と比較して、平均2乗誤差がより小さいため、優れた再生像を得ることのできる表示方式であることを明らかにした。

4. 光学実験を行い、計算機シミュレーションによる再生像は光学再生像とよく一致することを確認した。

以上のことから、誤差拡散法は、再生像にける物体と雑音とをすることにより、他の表示方式と比較して、優れた再生像を得ることのできる方式であることが明らかとなった。

以上4つの問題に対する結果より、誤差拡散法の2値に位相量子化した計算機ホログラムに対する有効性を明かすことができた。この結果は、3次元像再生をより簡便に実行することを目指す上で、計算機ホログラムの合成法の立場より有用な一指針を与えるものと考えられる。

3次元像再生を目的とした計算機ホログラフィを、今後実用化へ推進してゆく上で、以下の問題点が残されている：

1. 3次元画像の立体視

3次元画像が立体的にどの程度の大きさで再生され、観測可能範囲はどの程度の大きさとなるかということを検討することが必要となる。また、断層タイプの計算機ホログラムにあっては再生物体が光軸方向に広がりをもつが、物体を重なりあうように配置した場合においても、優れた再生像を得ることができる方法を構築する必要があると考えられる。

2. 光学系の特性を考慮した再生像の改善

光学再生を行う際の光学系が再生像にどのような悪影響を及ぼしているのかを検討し、これらの要因を考慮した再生像の改善を行ってゆくことが必要となる。例えば、光学系を用いて回折計算を行い、CCD カメラから得た再生像を評価し、再生像を良質ならしめる方向に計算機プログラムを合成してゆく方法が考えられる。

以上の問題点を解決することにより、計算機プログラムが、3次元像再生のための表示デバイスとして実用に供することができるようになると考えられる。最終的には、“現実感を与える”3次元イメージングシステムの構築を考えている。

参 考 文 献

- [1] 大越孝敬：“三次元画像工学”，朝倉書店 (1991).
- [2] Norling J. A. : “The stereo scopic art”, J. SMPTE, **60**, 3, pp. 286–308 (1953).
- [3] Gabor D. : “A new microscopic principle”, Nature, **161**, pp. 777–779 (1948).
- [4] Gabor D. : “Microscopy by reconstructed wave-fronts”, Proc. Phys. Soc., A194, pp. 454–487 (1949).
- [5] Leith E. N. and Upatniks J. : “Reconstructed wavefronts and communication theory”, J. Opt. Soc. Am., **52**, 10, pp. 1123–1130 (1962).
- [6] Leith E. N. and Upatniks J. : “Wavefront reconstruction with continuous-tone objects”, J. Opt. Soc. Am., **53**, pp. 1377–1381 (1963).
- [7] Brown B. R. and Lohmann A. W. : “Complex spatial filtering with binary masks”, Appl. Opt., **5**, 6, pp. 967–969 (1966).
- [8] Burch J. J. : “A computer algorithm for the synthesis of optical frequency filters”, Proc. IEEE (Coressp.), **55**, 4, pp. 599–601 (1966).

- [9] Huang T. S. and Prasad B. : “Consideration on the generation and processing of holograms by digital computers”, MIT/RLE Quar. Prog. Rep., 81, pp. 199–205 (1966).
- [10] Lohmann A. W. and D. P. Paris : “Binary Frounhofer holograms, generated by computer”, Appl. Opt., 6, 10, pp. 1739–1748 (1967).
- [11] 佐藤甲癸 : “液晶表示デバイスを用いたキノフォームによるカラー立体動画像表示”, テレビ学誌, 48, 10, pp. 1261–1266(1994).
- [12] Huang T. S. : “Digital holography”, Proc. IEEE, 59, 9, pp. 1335–1346 (1971).
- [13] McGovern A. J. and Wyant J. C. : “Computer generated holograms for testing optical elements”, Appl. Opt., 10, 3, pp. 619–624 (1971).
- [14] Lee W. H. : “Sampled Fourier-transform hologram generated by computer”, Appl. Opt., 9, 3, pp. 639–643 (1970).
- [15] Ichioka Y., Izumi M. and Suzuki T. : “Halftone plotter and its applications to digital optical information processing”, Appl. Opt., 10, 2, pp. 2461–2471 (1971).
- [16] Bruckhardt C. B. : “A simplification of Lee’s method of generating holograms by computer”, Appl. Opt., 9, 8, p. 1949 (1970).
- [17] Brown B. R. and Lohmann A. W. : “Computer generated binary holograms”, IBM J. Res. & Develop., 13, pp. 160–168 (1969).

- [18] Weissbach S., Wyrowski F. and Bryngdahl O. : "Digital phase holograms: coding and quantization with an error diffusion concept", *Opt. Commun.*, **72**, pp. 37–41 (1989).
- [19] Barnes T. H., Matsumoto K., Eiju T., Matsuda K. and Ooyama N. : "The application of phase only filters to optical interconnections and pattern recognition", *J. Mod. Opt.*, **37**, 11, pp. 1849–1863 (1990).
- [20] Lesem L. B., Hirsch P. M. and Jordan. Jr. J. A. : "The Kinoform: A new wavefront reconstruction device", *IBM J. Res. Develop.*, **13**, 3, pp. 150–155 (1969).
- [21] Barnes T. H., Matsuda K. and Ooyama N. : "Reduction of false correlations with binary phase only filters", *Appl. Opt.*, **27**, 18, pp. 3785–3790 (1988).
- [22] Mok F., Diep J. Liu H. K. and Psaltis D. : "Real-time computer generated hologram by means of liquid crystal television.", *Opt. Lett.*, **11**, 11, pp. 748–750 (Nov. 1986).
- [23] Honer J. L. and Leger J. R. : "Pattern recognition with binary phase only filters", *Appl. Opt.*, **24**, pp. 609–611(1985).
- [24] Fineup J. R. : "Iterative method applied to image reconstruction and to computer-generated holograms", *Opt. Eng.*, **19**, pp. 297–305 (1980),
- [25] Nagashima K. : "Improvement of images reconstructed from computer-generated holograms using an iterative method", *Opt. Laser Technol.*, **18**, 6, pp. 157–162 (1986).

- [26] Wyrowski F. and Bryngdahl O. : “Iterative Fourier-transform algorithm applied to computer holography”, *J. Opt. Soc. Am.*, **A5**, 7, pp. 1058–1065 (1988).
- [27] Wyrowski F. : “Iterative quantization of digital amplitude holograms”, *Appl. Opt.*, **28**, 18, pp. 3864–3870 (1989).
- [28] 田中賢一, 下村輝夫 : “繰返し法による計算機ホログラム再生像の収束性”, *信学論 (C-I)*, **J77-C-I**, 4, pp.149–152 (1994-04) .
- [29] 田中賢一, 下村輝夫 : “繰返し法と誤差拡散法との併用による 2 値に位相量子化した計算機ホログラム再生像の改善”, *信学論 (C-I)*, **J78-C-I**, 2, pp.112–115 (1995-02) .
- [30] Gerchberg R. W. and Saxton W. O. : “A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures”, *Optik*, **35**, 2, pp. 237–246 (1972).
- [31] Floyd R. W. and Steinberg L. : “An adaptive algorithm for spatial grayscale”, *Proc. Soc. Inf. Disp.*, **17**, pp. 75–77 (1976).
- [32] Bayer B. E. : “An optimum method for two level rendition of continuous-tone pictures”, *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Conf. Rec.*, pp. (26-11)–(26-15) (1973).
- [33] 長嶋祐二, 長嶋秀世, 寺内美奈, 豊田誠, “完全方陣のディザ行列への適用に関する検討”, *信学論 (D-II)*, **J73-D-II**, 5, pp. 747–755 (1990).
- [34] Jarvis J. A., Jurdice C. N. and W. H. Ninke : “A survey of technics for the display of continuous-tone pictures of bilevel displays”, *Comput. Graphics & Image Process.*,

- 5, pp. 13–40 (1976).
- [35] 小野文孝：“中心周波数設定法による中間調画像の2値表示方式”，信学論 (D-II), **J68-D**, 4, pp. 868–693 (1985).
- [36] 小野文孝：“ディザ法”，画電学誌, **10**, 5, pp. 388–397 (1981).
- [37] Allebach J. P. and Liu B. : “Anarysis of halftone dot profile and aliasing in the discrete binary representation of images”, J. Opt. Soc. Am., **67**, 9, pp. 1147–1154 (1977).
- [38] 小寺宏曄：“ハーフトーンのデジタル化”，テレビ学誌, **40**, 4, pp. 317–322 (1986).
- [39] Hauck R. and Bryngdahl O. : “Computer-generated holograms with pulse-density modulation”, J. Opt. Soc. Am., **A1**, pp.5–10 (1984).
- [40] Eschbach R. : “Comparison of error diffusion methods for computer-generated holograms”, Appl. Opt., **30**, 26, pp.3702–3710 (1991).
- [41] Barnard E. : “Optimal error diffusion for computer-generated holograms”, J. Opt. Soc. Am., **A5**, pp. 1803–1817 (1988).
- [42] Broja M., Eschbach R. and Bryngdahl O. : “Stability of active binarization processes”, Opt. Comunn., **60**, pp. 353–358 (1988).
- [43] 広瀬不二夫, 加藤一夫, 服部 肇：“計算機ホログラムの再生像シミュレーションと最低量子化条件”，信学論 (C), **J62-C**, 8, pp. 558–565 (1979).

- [44] Oppenheim A. V. and Lim L. S. : “The importance of phase signal”, Proc. IEEE, **69**, 5, pp. 529–541 (1981).
- [45] 田中賢一, 下村輝夫 : “誤差拡散法による 2 値に位相量子化した計算機ホログラムの再生像の改善”, 信学論 (C-I), **J77-C-I**, 3, pp. 101–112 (1994–03).
- [46] Tanaka K., Sakamoto Y., Yang S. and Shimomura T. : “New optical reconstruction with Computer-generated holograms by error diffusion method using Peano curve”, Proc. AM-LCD, pp.244–247 (1994).
- [47] Peano G. : “Sur une courbe qui remplit toute une aire plane”, Math. Ann., **36**, pp. 157–160 (1890).
- [48] Stevens R. J., Lehar A. F. and Preston F. H. : “Manipulation and presentation of multidimensional image data using Peano scan”, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., **PAMI-5**, pp.520–526 (1983).
- [49] Kamata S., Eason R. O. and Kawaguchi E. : “An implementation of Hilbert scanning algorithm and its application to data compression”, Trans. IEICE Informations and Systems, **E76-D**, 4, pp. 420–428 (1993).
- [50] Yang K. M., Wu L. and Mills M. : “Fractal based image coding scheme using Peano scan”, ISCAS, pp.2301–2304 (1988).
- [51] Witten I. H. and Neal R. M. : “Using Peano curves for bilevel display of continuous-

- tone images”, *IEEE CG&A*, **2**, 3, pp.47–52 (Mar. 1982).
- [52] Linnamainaa S. : “New efficient representations of photographic images with restricted number of gray levels”, *Proc. 9th ICPR*, pp. 143–145 (1988).
- [53] 永江孝規, 安居院猛, 長橋 宏 : “Peano 走査の一般化とハーフトーン処理への応用”, *テレビ学技報*, **16**, 9, pp. 25–30 (1992).
- [54] 田中賢一, 下村輝夫 : “ペアノ曲線を用いた誤差拡散法による計算機ホログラム”, *信学論 (C-I)*, **J77-C-I**, 8, pp.437–445 (1994-08).
- [55] Tanaka K. and Shimomura T. : “Computer-generated holograms by error diffusion method using Peano curve”, *Electronics and Communications in Japan*, **78**, 3, pp.1–11 (1995).
- [56] Hilbert D. : “Ueber die stetige Abbildung einer Linie auf ein Flächenstück”, *Math. Ann.*, **38**, pp. 459–460 (1891).
- [57] 鎌田清一郎, Perez A., 河口英二 : “2, 3 次元空間におけるヒルベルト曲線の一計算法”, *信学論 (D-II)*, **J74-D-II**, 9, pp. 1217–1226 (1991-09).
- [58] Eschbach R. and Knox K. T. : “Error diffusion algorithm with edge enhancement”, *J. Opt. Soc. Am.* **A8**, 8, pp. 1844–1850 (Aug.1991).
- [59] 田中賢一, 下村輝夫 : “ペアノ走査によるハーフトーン処理におけるエッジ強調アルゴリズムの適用”, *信学論 (D-II)*, **J78-D-II**, 3, pp. 445–452 (1995-03).

- [60] 田中賢一, 下村輝夫: “ピアノ走査による計算機ホログラムにおけるエッジ強調アルゴリズムの適用”, 信学論 (C-I), **J78-C-I**, 12, pp. 697-699 (1995-12).
- [61] Samet H. : “The design and analysis of spatial data structures”, Addison-Wesley Publishing Company INC.(1990).
- [62] King M. C., Noll A. M. and Berry D. H. : “A new approach to computer-generated holography”, Appl. Opt., **9**, 2, pp. 471-475 (1970).
- [63] Yatagai T. : “Stereoscopic approach to 3-D display using computer-generated holograms”, Appl. Opt., **15**, 11, pp. 2722-2729 (1976).
- [64] 尾上守夫, 金子正秀: “計算機ホログラムからの3次元再生像の性質”, 信学論 (C) , **J62-C**, pp. 771-776 (1979).
- [65] 田中賢一, 下村輝夫: “計算機ホログラムからの3次元像再生シミュレーション”, 光学, **24**, 12, pp. 739-744 (1995-12).
- [66] 尾上守夫, 金子正秀: “純バイナリー計算機ホログラム”, 信学論 (C) , **J62-C**, pp. 78-85 (1979).
- [67] Cathey W. T. : “Optical information processing and holography”, p. 398, John Wiley & Sons. Inc. (1974).

謝 辞

本研究を遂行するにあたり，研究の機会を与え，終始懇切な御指導を賜った九州工業大学工学部 下村 輝夫 教授に心から深く感謝致します。また，本論文をまとめるに際して貴重な御教示と御鞭撻を賜った九州工業大学 工学部 太田 諦二 教授，大隈 彰道 教授，河川 英二 教授，小林 敏弘 教授に深く感謝致します。

著者の大学院博士後期課程における修学に際し，研究奨励金の援助を賜った財団法人テレコム先端技術研究センターに深い感謝の意を表します。

最後に，実験に協力をされた電子工学教室表示デバイス研究室の大学院生，学部学生の諸氏に感謝致します。

A

付 録

A.1 ラスタ走査を用いた場合の再生像について

ここでは、3.3.1の議論から Hauck-Bryngdahl の第 2 の係数 [39] によるラスタ走査に関して、(1) 入力物体を伸縮させた場合、(2) 入力物体の形状を変えた場合、(3) 入力物体の位置を変えた場合について誤差拡散の効果について検討する。但し、Hauck-Bryngdahl の第 1 の係数 [39] については、前述のように Hauck-Bryngdahl の第 2 の係数 [39] と拡散方向が異なるだけで本質的には同じ方法であり、同様な結果を類推できると考えられるため、この方法については議論を省略する。

まず、入力物体に正方形パターンを用い、物体を伸縮させた場合の再生像を図 A.1 に示す。いずれの場合も、拡散された雑音は斜め方向に分布し、物体周辺の雑音は低減されている。入力物体の寸法が小さい場合は、拡散された雑音と接触することなく物体がはっきりと再生されている。しかし、入力物体の寸法が大きくなると、物体の端部が拡散された雑音と接触している。従って、入力物体の伸縮に対する誤差拡散の効果は、雑音に接しないような大きさを有する物体に対して一般的であることがわかる。また、雑音に接しない

ような入力物体の大きさはたかだか画素数 16×16 程度である。換言すれば、雑音に接しない入力物体の大きさが、対角線方向でみると拡散された雑音の発生する周期の $1/4$ 寸法を有する物体までであるといえる。

次に、入力物体の面積を一定とし、物体の縦横比を変えた場合の再生像を図 A.2 に示す。この場合も、雑音は斜め方向に分布し、物体周辺における雑音は低減されているが、物体の長辺が長くなると拡散された雑音に再生される物体が接触することがわかる。このため、前述のように長辺の寸法が 16 画素を超えないようにすることが望ましい。

更に、入力物体の位置を変えた場合の再生像を図 A.3 に示す。この再生像における雑音の分布は他の再生結果と同様である。物体の位置が雑音と接しない領域すなわち物体の重心が右下りの対角線上に位置する領域に関しては誤差拡散法の効果があるといえるが、物体の位置が雑音と接する場合は物体がはっきり再生されていない。このことから、入力物体は再生像において雑音の少ない領域に位置すれば、誤差拡散の効果に一般性があることがわかる。また、再生像において物体が 2 つ重なり合わないようにするために、入力物体を中央に位置させないようにすることも条件として必要である。

以上の結果から、ラスタ走査による誤差拡散法に対しては、再生像における拡散された雑音に接しない範囲で入力物体の一般性を有していることがわかる。また、入力物体の大きさの上限は、入力像領域に対して寸法比で約 $1/8$ であることがわかる。なお、物体の形状を変えた場合例えば文字パターンなどは、正方形パターンの一部であるため、同様の効果が類推される。

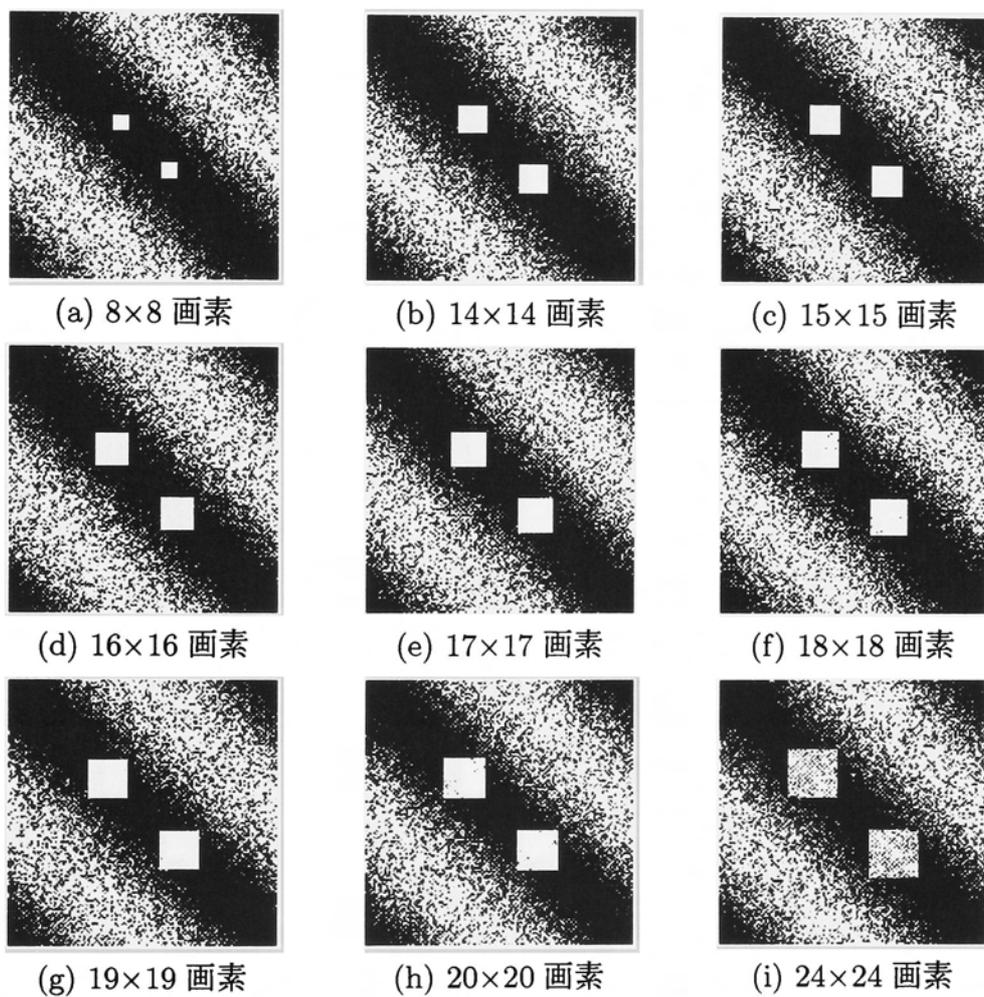


図 A.1: 再生像 (物体が正方形で大きさを変えた場合)

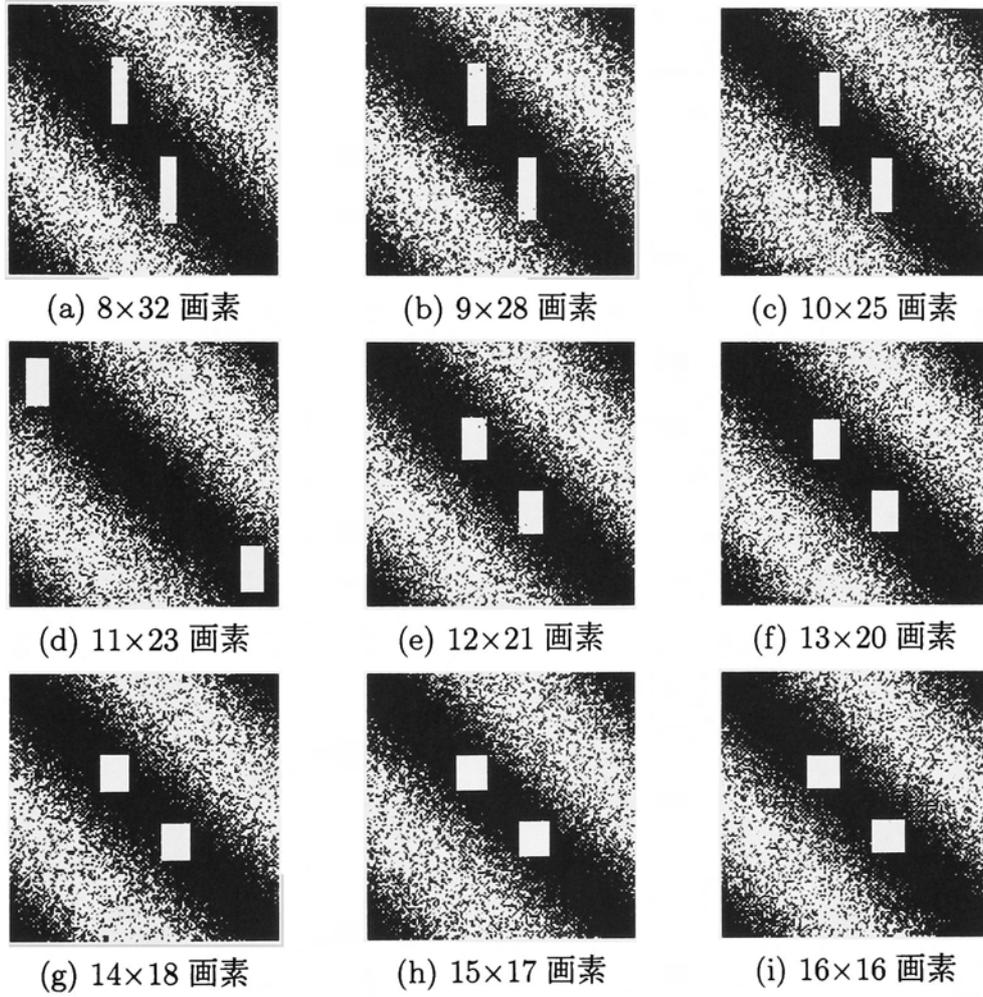


図 A.2: 再生像 (物体の縦横比を変えた場合)

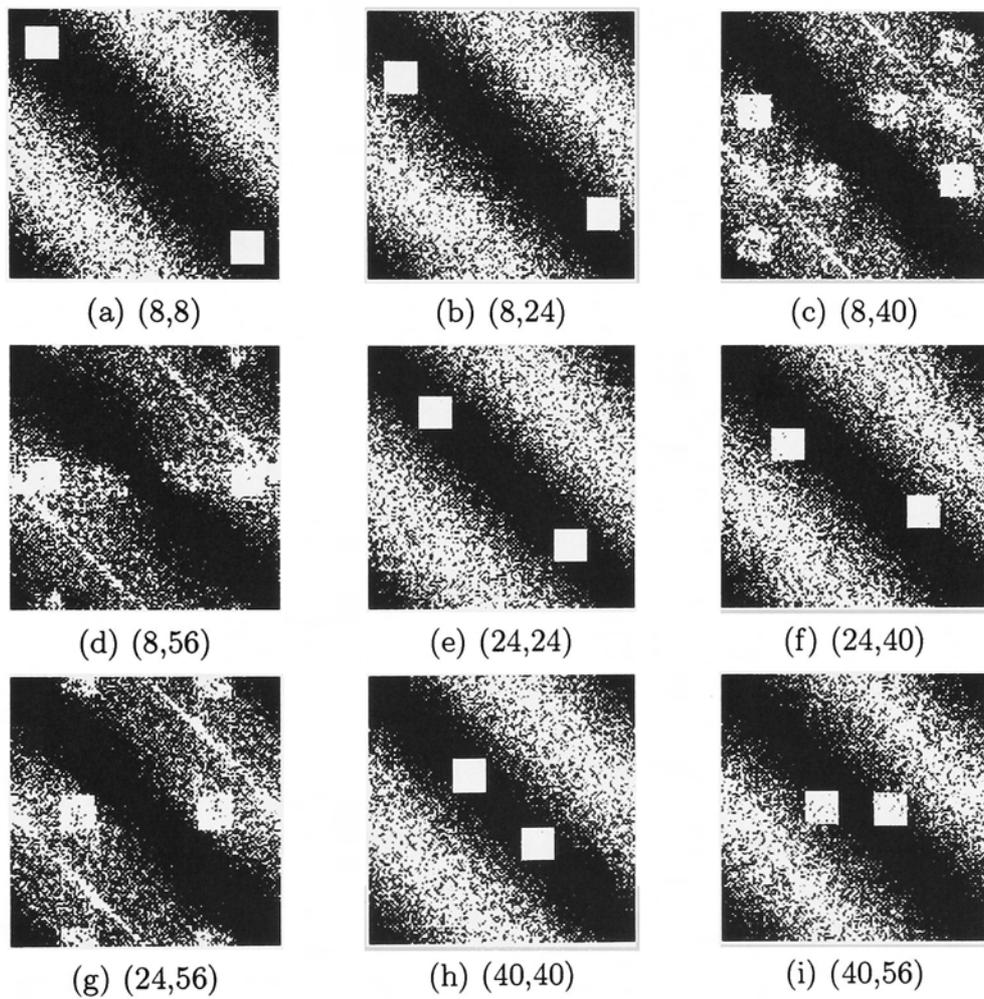


図 A.3: 再生像 (物体の位置を変えた場合: 座標は物体の左上の座標)

A.2 ペアノ走査を用いた場合の再生像について

ここでは、4.4.1の議論から図 4.7に示した拡散係数によるペアノ走査の再生像に関して、(1) 入力物体を伸縮させた場合、(2) 入力物体の形状を変えた場合、(3) 入力物体の位置を変えた場合について誤差拡散の効果について検討する。

まず、入力物体に正方形パターンを用い、物体を伸縮させた場合の再生像を図 A.4に示す。いずれの場合も、拡散された雑音は斜め方向に分布し、物体周辺の雑音は低減されている。入力物体の寸法が小さい場合は、拡散された雑音と接触することなく物体がはっきりと再生されている。しかし、入力物体の寸法が大きくなると、物体の端部が拡散された雑音と接触している。従って、入力物体の伸縮に対するペアノ走査による誤差拡散法の効果は、雑音に接しないような大きさを有する物体に対して一般的であることがわかる。また、雑音に接しないような入力物体の大きさはたかだか画素数 16×16 程度であるといえる。

次に、入力物体の面積を一定とし、物体の縦横比を変えた場合の再生像を図 A.5に示す。雑音の分布は、他の再生像と同様であり、物体周辺における雑音は低減されている。物体の縦横比が変化しても、物体の位置が外側であるため、拡散された雑音に物体が接触していない。このため、物体が外側に位置していれば、面積が一定で縦横比が変化してもペアノ走査による誤差拡散法の効果があるといえる。

更に、入力物体の位置を変えた場合の再生像を図 A.6に示す。この再生像における雑音の分布は他の再生結果と同様である。物体の位置が雑音と接しない領域すなわち物体が外側に再生される領域に関してはペアノ走査による誤差拡散法の効果があるといえる。しかし、物体の位置が雑音と接する場合すなわち物体の位置が中央になる場合は物体がはっきり

り再生されていない。このことから、入力物体は再生像において雑音の少ない領域に位置すれば、ペアノ走査による誤差拡散法の効果に一般性があることがわかる。

以上の結果から、ペアノ走査による誤差拡散法に対しては、再生像における拡散された雑音に接しない範囲で入力物体の一般性を有していることがわかる。また、入力物体の大きさの上限は、構成されるホログラムの領域に対して寸法比で約 $1/8$ であることがわかる。なお、物体の形状を変えた場合例えば文字パターンなどは、正方形パターンの一部であるため、同様の効果が類推される。

A.3 エッジ強調誤差拡散法を用いた場合の再生像について

ここでは、5.4におけるペアノ走査によるエッジ強調誤差拡散法 [60] に関して、(1) 入力物体を伸縮させた場合、(2) 入力物体の形状を変えた場合、(3) 入力物体の位置を変えた場合について誤差拡散の効果について検討する。

まず、入力物体に正方形パターンを用い、物体を伸縮させた場合の再生像を図 A.7 に示す。いずれの場合も、拡散された雑音は斜め方向に分布し、物体周辺の雑音は低減されている。入力物体の寸法が小さい場合は、拡散された雑音と接触することなく物体がはっきりと再生されている。しかし、入力物体の寸法が大きくなると、物体の端部が拡散された雑音と接触し、物体の明るさが減少している。従って、入力物体の伸縮に対するエッジ強調誤差拡散法の効果は、雑音に接しないような大きさを有する物体に対して一般的であることがわかる。また、雑音に接しないような入力物体の大きさはたかだか画素数 20×20 程度であるといえる。

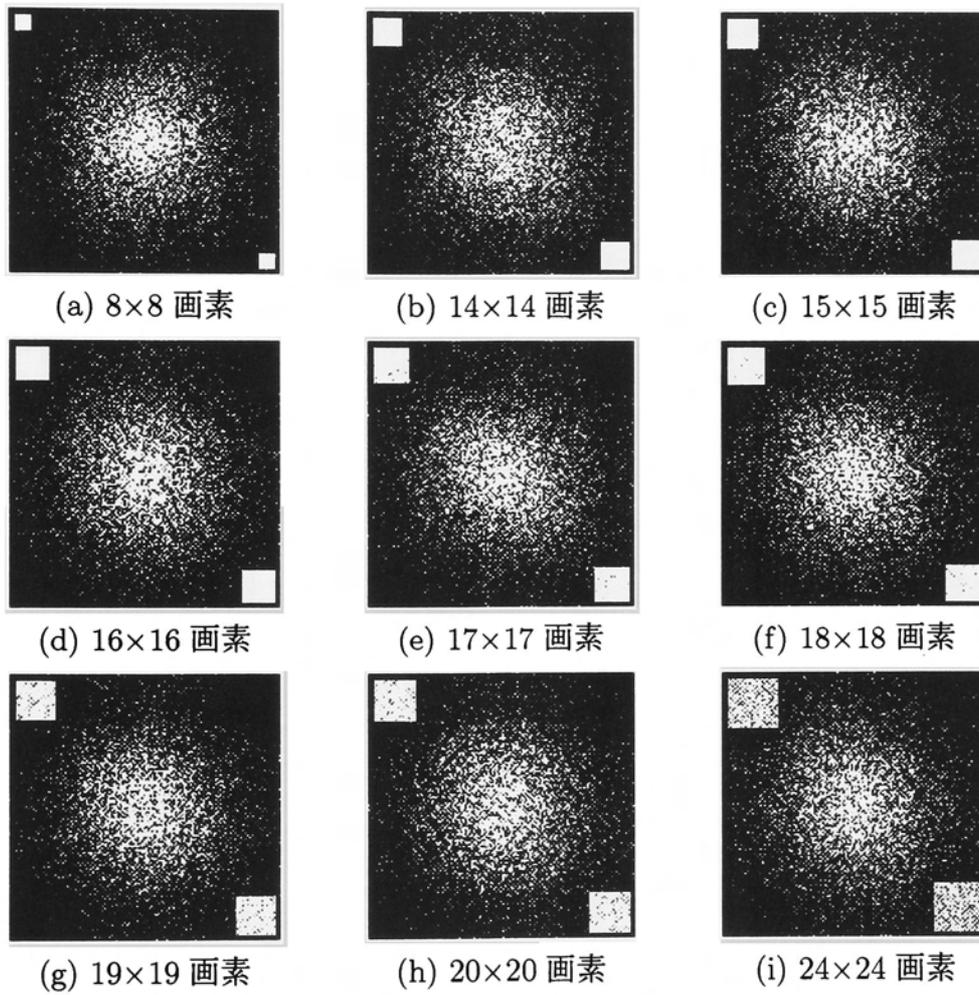


図 A.4: 再生像 (物体が正方形で大きさを変えた場合)

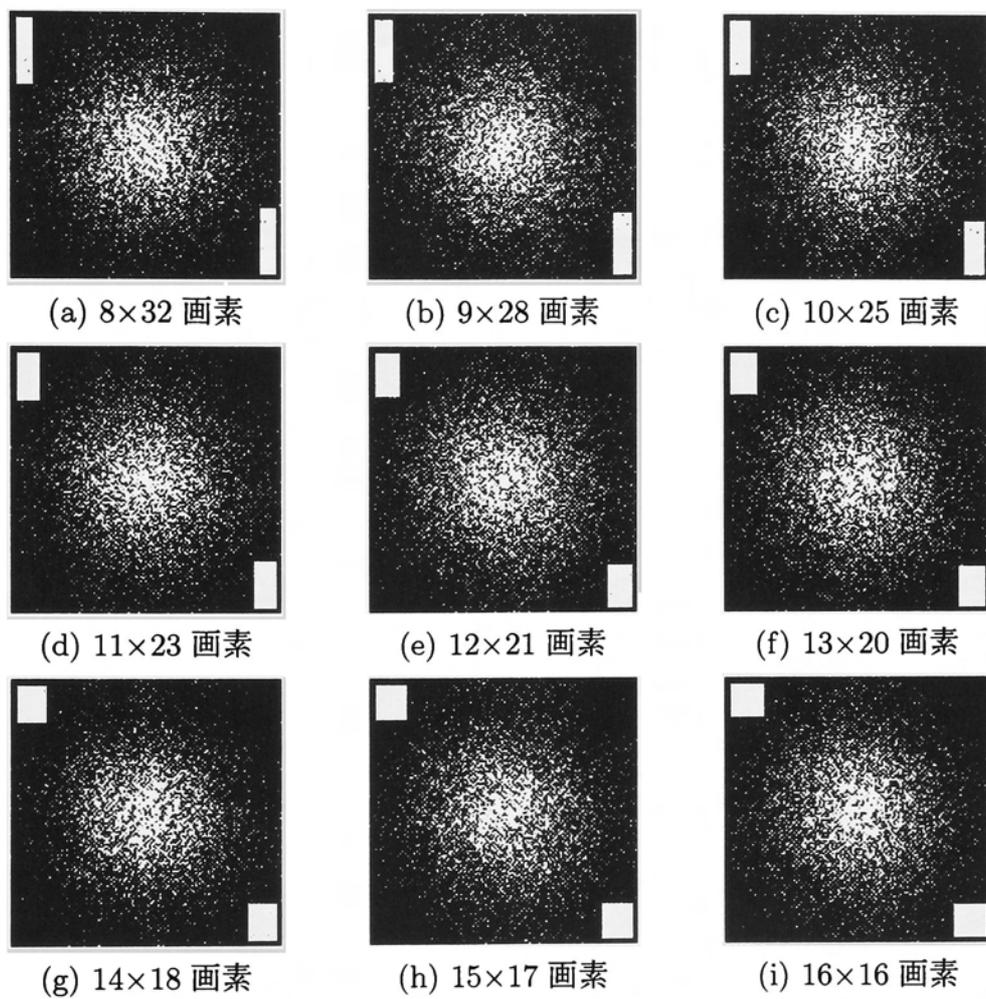


図 A.5: 再生像 (物体の縦横比を変えた場合)

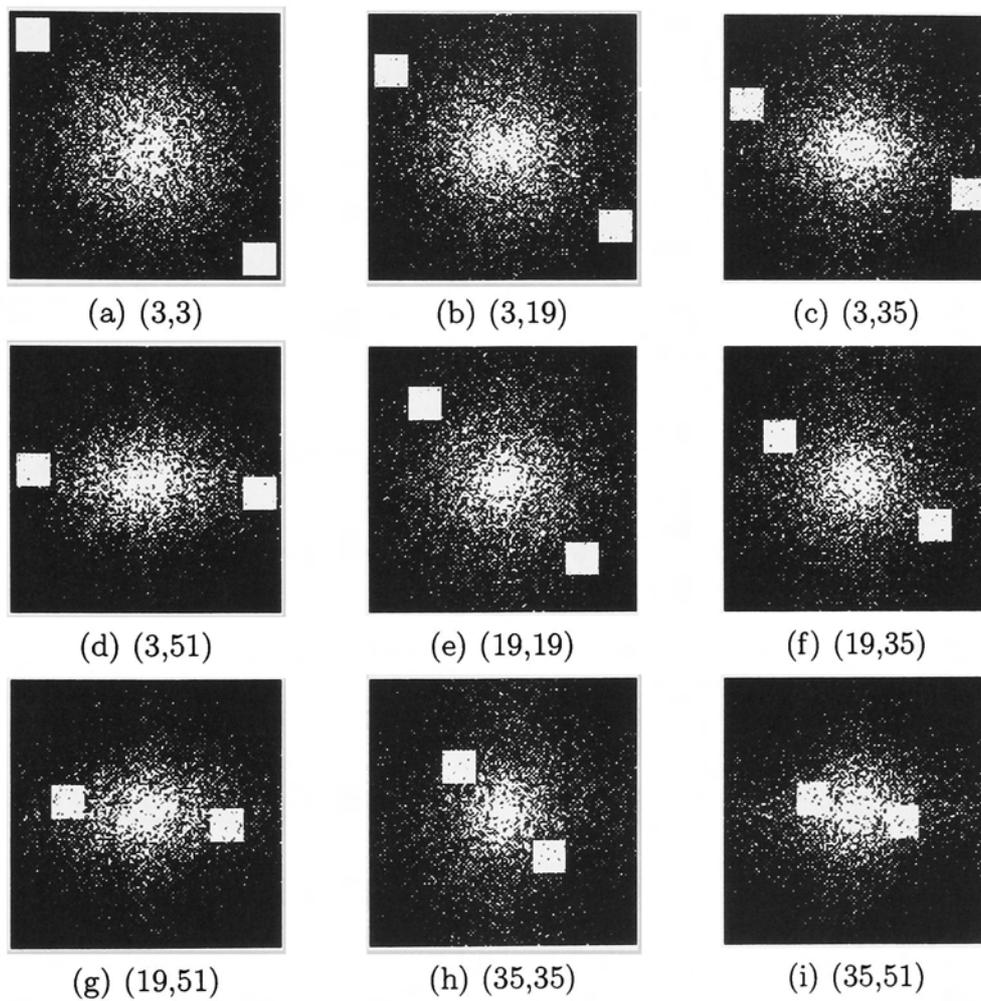


図 A.6: 再生像 (物体の位置を変えた場合: 座標は物体の左上の座標)

次に、入力物体の面積を一定とし、物体の縦横比を変えた場合の再生像を図 A.8に示す。雑音の分布は、他の再生像と同様であり、物体周辺における雑音は低減されている。物体の縦横比が変化しても、物体の位置が外側であるため、拡散された雑音に物体が接触していない。このため、物体が外側に位置していれば、面積が一定で縦横比が変化してもエッジ強調誤差拡散法の効果があるといえる。

更に、入力物体の位置を変えた場合の再生像を図 A.9に示す。この再生像における雑音の分布は他の再生結果と同様である。物体の位置が雑音と接しない領域すなわち物体が外側に再生される場合に関してはエッジ強調誤差拡散法の効果があるといえる。しかし、物体の位置が雑音と接する場合すなわち物体の位置が中央になると物体がはっきり再生されていない。このことから、入力物体は再生像において雑音の少ない領域に位置すれば、エッジ強調誤差拡散法の効果に一般性があることがわかる。

以上の結果から、ピアノ走査によるエッジ強調誤差拡散法に対しては、再生像における拡散された雑音に接しない範囲で入力物体の一般性を有していることがわかる。また、入力物体の大きさの上限は、構成されるホログラムの領域に対して寸法比で約 1/6 であることがわかる。なお、物体の形状を変えた場合例えば文字パターンなどは、正方形パターンの一部であるため、同様の効果が類推される。

A.4 Hauck-Bryngdahl の第 1 の係数の再生像

図 A.10に Hauck-Bryngdahl の第 1 の係数 [39] を適用した計算機ホログラムの再生像を示す。誤差の拡散係数が右方向だけであるため、拡散された雑音は左右の端部に縦方向に強く

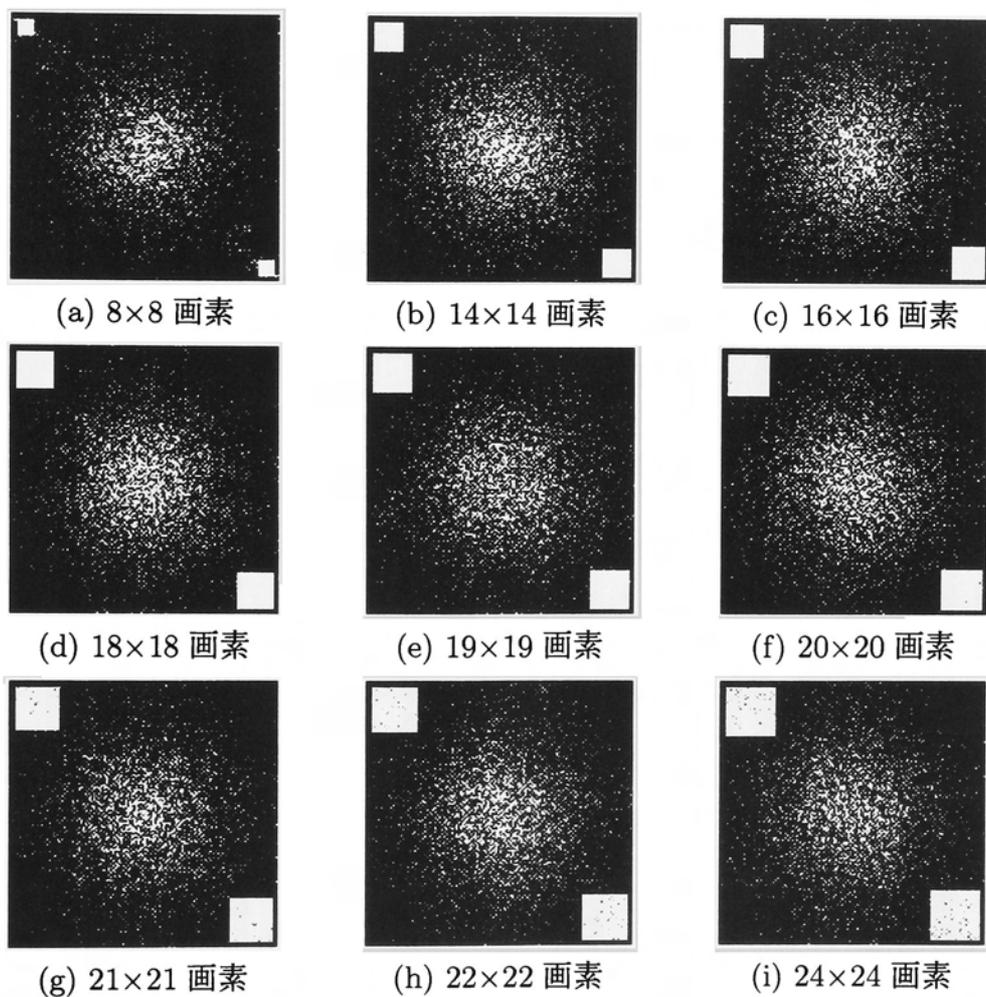


図 A.7: 再生像 (物体が正方形で大きさを変えた場合)

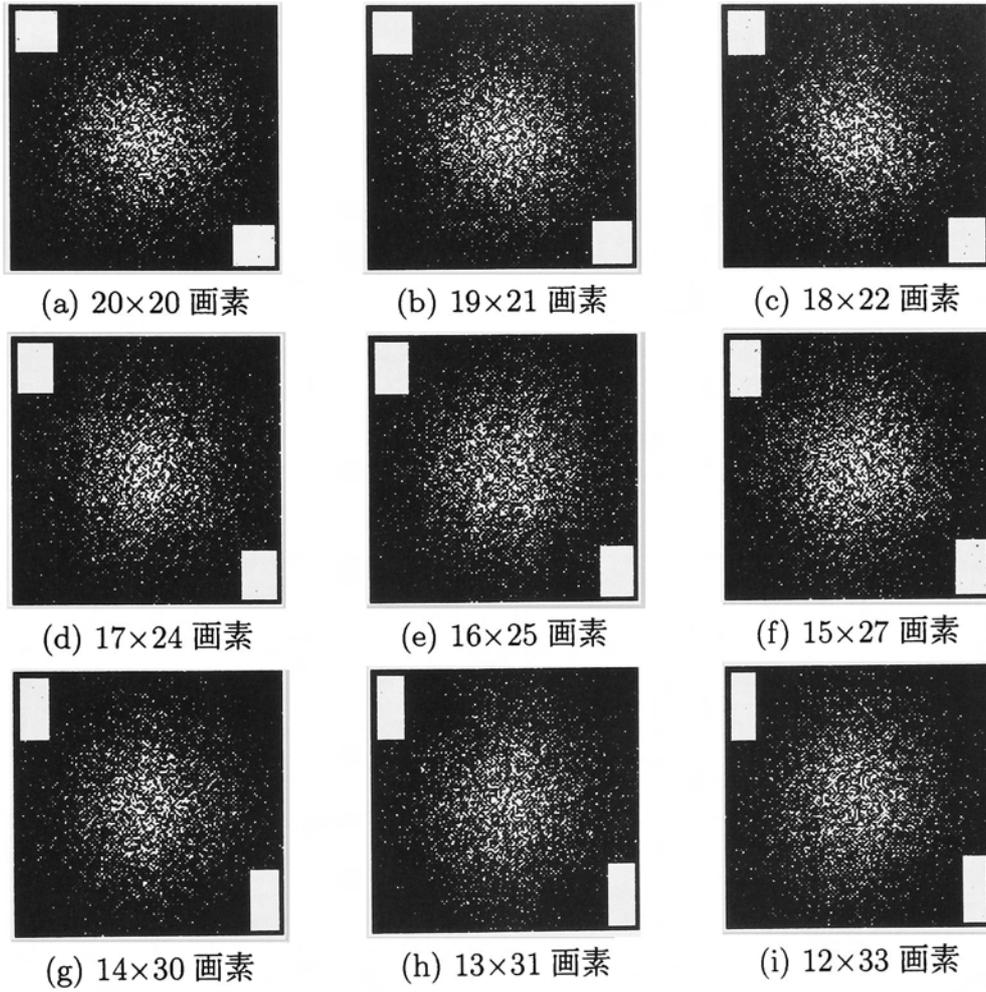


図 A.8: 再生像 (物体の縦横比を変えた場合)

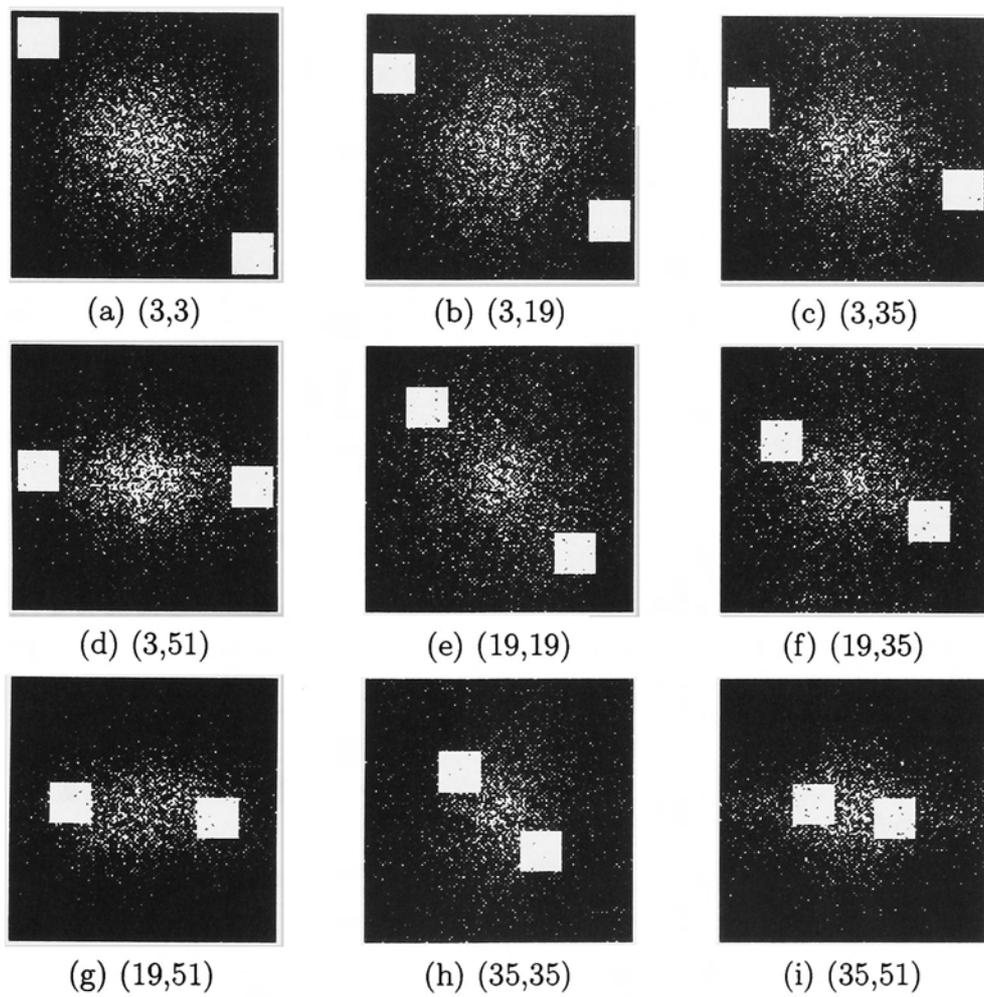


図 A.9: 再生像 (物体の位置を変えた場合: 座標は物体の左上の座標)

現れている。図 3.8 に示した Hauck-Bryngdahl の第 2 の係数 [39] と同様、物体周辺の雑音は低減され、物体がはっきり再生されていることがわかる。この再生像より Hauck-Bryngdahl の第 1 の係数と Hauck-Bryngdahl の第 2 の係数とは拡散の方向が異なるだけで、1 方向の拡散係数であることから、本質的には同じ方法であると考えることができる。

A.5 Brown-Lohmann の方法と尾上-金子の方法について

Brown-Lohmann の方法による計算機プログラムならびに尾上-金子の方法による計算機プログラムは、いずれも図 A.11 に示すような構造のセルからなるプログラムである。セルの開口の位置 P は複素数値の位相角に応じて変調し、開口の大きさ V は複素数値の振幅（絶対値）により変調する。ここでは、ひとつの複素数値を（ひとつのセルを） 4×4 画素で表示するものとする。Brown-Lohmann の方法と尾上-金子の方法との相異点は、開口の大きさ V のとりかたと、開口の位置 P のとりかたの 2 つである。まず、開口の大きさについてみると、Brown-Lohmann の方法は開口が上下対称となるよう振幅量子化数が 3 となるが、尾上-金子の方法は任意に選べるため振幅量子化数は 5 となる。次に、開口の位置についてみると、Brown-Lohmann の方法は方形幅 c を一定（ここでは 2 画素）としているのに対して、尾上-金子の方法は方形幅 c を一定としていない（位相角によって 2 画素あるいは 1 画素）ため、位相方向の量子化数が Brown-Lohmann の方法の場合の 2 倍（ここでは 8）となる。従って、複素平面上で表示し得る点は Brown-Lohmann の方法が 9 点であるのに対して、尾上-金子の方法は 33 点となる。

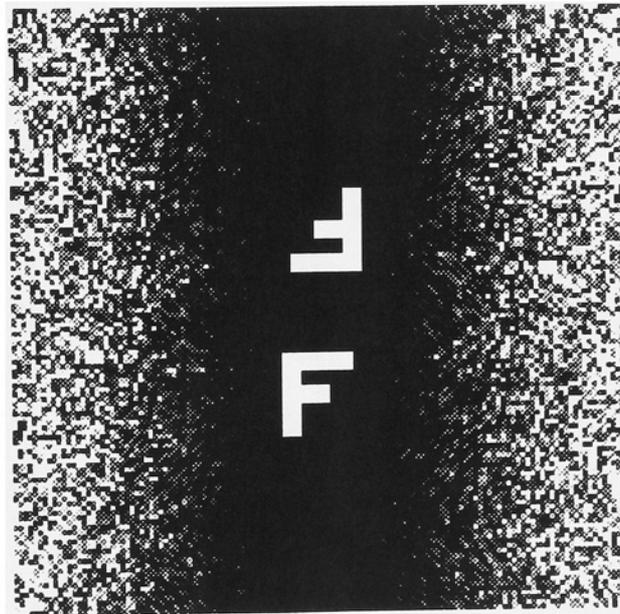


図 A.10: 再生像 (Hauck-Bryngdahl の第 1 の係数)

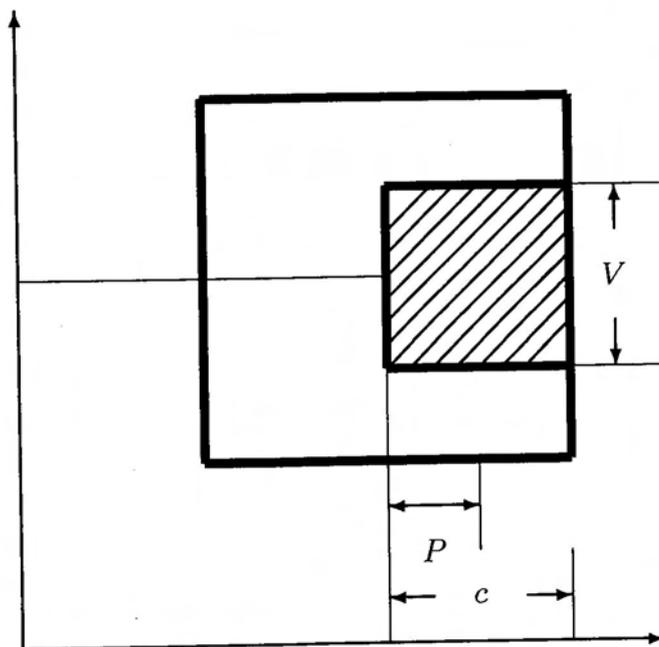


図 A.11: 計算機プログラムのセルの構造