



Title	信号蓄積管を用いた像修正処理装置に関する研究
Author(s)	森川, 良孝
Citation	大阪大学, 1981, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2808
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

信号蓄積管を用いた像修正 処理装置に関する研究

昭和 55 年

森川 良孝

信号蓄積管を用いた像修正 処理装置に関する研究

昭和 55 年

森川 良孝

内 容 梗 概

本論文は、電子顕微鏡から得られるぼけ像を準実時間（数秒）で修正処理する目的で行った、信号蓄積管を用いた像修正処理装置に関する研究をまとめたもので、本文は 8 章から構成されている。

第 1 章においては、像修正処理なかでも光電変換方式による像修正処理装置に関する研究の現状と問題点とについて述べ、本論文の位置づけを行なっている。

第 2 章においては、像修正操作が適切に設計された修正重みによる離散たみ込みに表現でき、この実現法として ISAP 法と IPAS 法があることを述べる。つぎにこれら 2 方法の光電変換方式による構成法について述べ、それぞれの単独方式では高度な像修正処理ができないことを示し、第 4 章で述べる併用方式の位置づけを行なう。

第 3 章においては、2 電子銃型信号蓄積管の動作を述べ、これを用いて IPAS 法を構成した場合の処理の限界を詳述する。つぎにこの問題点を補なう方法として 2 電子銃型信号蓄積管の転写効果を提案、説明する。この転写効果を利用して信号蓄積管を動作させた場合、画像の重ね合わせ可能量は、従来の動作にくらべて 5 ～ 6 倍となり、線形性、分解能ともに従来の動作のものと変わらないことを実験的に示す。

第 4 章においては、修正重み再分割 ISAP - IPAS 併用法を新しく提案し、この方式が処理像のコントラストからみて勝れていることを示す。またこの方式においては、修正重みの再分割の方法がコントラストに大きく影響を及ぼすため、最適な分割設計法も併せて示す。

第 5 章においては、上述の併用法を、2 電子銃型信号蓄積管を用いたテレビ方式で構成した像修正処理システムについて述べる。この処理システムは、処理の全過程をマイクロ・コンピュータで制御しているため、簡単な操作で会話的に処理ができるばかりでなく、走査型電子顕微鏡のような撮像装置には直接処理装置を接続できるという長所をもっている。最後に処理装置の重要な電気的特性に触れ、約 1 % 程度の処理精度のあることを確認する。

第 6 章においては，少ない個数で勝れた修正特性を有する，修正重みの設計について述べる。ぼけは回転対称的なものに限定して，三角格子点状に分布する修正重みの設計法を提案し，焦点外れぼけに適用して実際にその修正重みを求めている。

第 7 章においては，第 5 章でのべた修正処理装置によって，実際の焦点外れぼけ像を修正した結果について述べる。この結果より，第 4 章で行った議論と第 6 章で述べた設計法の正当性を確認している。最後に簡単な特徴抽出例を紹介し，本処理装置の有能性を示す。

第 8 章においては，前章までの研究を総括し，今後の課題について述べる。

目 次

第 1 章 序 論	1
第 2 章 像修正の原理と、光電変換処理の問題点	7
2 - 1 まえがき	7
2 - 2 像修正の原理	7
2 - 3 光電変換処理の問題点	11
2 - 4 むすび	15
第 3 章 2 電子銃型信号蓄積管の転写効果	16
3 - 1 まえがき	16
3 - 2 2 電子銃型信号蓄積管の動作	16
3 - 3 転写効果の原理	19
3 - 4 転写効果の実験とその効果の IPAS 処理への有効性	22
3 - 5 むすび	24
第 4 章 ISAP-IPAS 併用法と修正重み再分割	25
4 - 1 まえがき	25
4 - 2 ISAP-IPAS 併用法	25
4 - 3 修正重み再分割による ISAP-IPAS 併用法	31
4 - 3 - 1 1 次元ぼけ修正	31
4 - 3 - 2 2 次元ぼけ修正	36
4 - 4 むすび	41
第 5 章 処理システム	42
5 - 1 まえがき	42
5 - 2 処理システムの構成	42
5 - 3 処理装置の概要	45
5 - 3 - 1 ISAP 処理部	45
5 - 3 - 2 IPAS 処理部	47
5 - 4 処理装置の電気的特性	49
5 - 4 - 1 ISAP 処理部	49

5 - 4 - 2	IPAS 処理部	50
5 - 5	むすび	53
第 6 章	修正関数の設計	54
6 - 1	まえがき	54
6 - 2	設計原理	54
6 - 3	修正重みの設計例	60
6 - 4	むすび	63
第 7 章	修正処理例	64
7 - 1	まえがき	64
7 - 2	修正処理結果	64
7 - 3	特徴抽出処理例	67
7 - 4	むすび	69
第 8 章	結 論	70
	謝 辞	72
	文 献	73
	付 録	77

第1章 序 論

超高電圧電子顕微鏡は、その電子ビームがもつ試料に対する高透過性によって、生きたままの生体試料の観察を可能にする。この目的のためには、生体試料を真空より隔離するカプセルの使用が必要であり、またカプセル中に種々のガスとか液体を同時に封入することが必要となる。このため、電子ビームは試料以外の媒体によって散乱をうけ、その結果低コントラストでしかも鮮鋭度の悪いぼけた像しか得られないということになる⁽¹⁾。また、普通の電子顕微鏡においても、コヒーレントな電子ビーム照射により原子レベルの解像度をもつ像を得ようとする場合、電子レンズのもつ各種収差および焦点外れ効果が大きな障害となる^{(2), (31), (32)}。

以上のように、電子顕微鏡から得られる像には多かれ少なかれ劣化要因が含まれていることになる。表1は、電子顕微鏡像に要求される処理内容を大略まとめたものである⁽³¹⁾。a)は電子顕微鏡像をより鮮鋭化し原像に近い像を復元することを、b)は明暗のはっきりしない像を強調し、コントラストおよび信号対雑音比の改善された像を得ることを、c)は極めて速く動く対象物を記録すること⁽⁴⁾を、目的とする。照射損傷を受けやすい試料では、できるだけ照射時間を短くしたり、照射ビーム量を少なくして観察しなければならないが、その条件のために像のコントラストが不十分であったり、焦点合わせができなかったりする場合が多い。このような場合、電子顕微鏡オペレータの補助装置として上記のa)とb)の処理ができる装置を設置するのが有効である。さらにこの状況のもとでは、処理装置の精度はある程度犠牲にしても、処理装置における処理パラメータが容易に変更できる(オンライン制御)ようにして処理を短時間(数秒程度)で行ない、電子顕微鏡-処理装置を1体システムとしてこのシステムと会話的に観測を逐行していくのが望ましい。本研究は、以上の課題を達成するための像修正処理装置に関するものである。

ところで1960年代において、主として宇宙開発技術と関連して画像処理技術は大きく発展したが、60年代後半に至ってこの技術を上の目的のために活用する気運が電子顕微鏡研究者の間で高まってきた。この画像処理技術にお

ける処理手段には大別して、デジタル的方式とアナログ的方式がある。表 2 に

処 理 内 容	像 劣 化 の 原 因	画像処理技術の適用性
a) 主として分解能の向上 (像修正)	1) 焦点外れおよび種々の収差によるぼけ 2) 試料のドリフトによるぼけ 3) 雰囲気試料室によるぼけ(カプセル内の液体, 気体による電子ビームの散乱)	いずれの場合も点拡がり関数(P S F)がわかれば原理的には分解能の向上は可能
b) コントラスト改善および雑音除去 (像強調)	1) 染色不可能(とくに生体試料の場合) 2) 照射電流もしくは透過電流の不足 3) 著しいコントラスト差のある背景の存在	単純重ね合わせ等で比較的容易
c) 像記録に関するもの	極めて速く動く対象物(10^{-6} 秒以下) (双晶, 格子変態, ブラウン運動) など	ストロボ化等の手法を用いる方がよい。

表 1 電子顕微鏡像に要求される処理内容と画像処理技術の適用性

これら 2 方式の大まかな比較を示す。デジタル的処理^{(5) - (9)}は電子計算機による処理であるが、高精度でしかも融通性のある処理ができる反面、処理時間、費用の点で上に述べたような目的の電子顕微鏡像の処理に応用することは得策でない。アナログ的処理には、よく知られた光学的処理^{(10) - (13)}および像をアナログ的電気信号に変換してから処理を行う光電変換処理があげられるが、これらはいずれにしてもデジタル的処理とは逆に、処理時間、装置製作などの費用の点で勝れているが、処理内容に限られる点に難点がある。しかし、処理内容は表 1 a), b) に限り、先に述べたように処理の高速性を重視した場合には、アナログ的処理方式とくに光電変換処理方式が有利な処理手段といえる^{(14) - (16)}。

さて光電変換方式における像修正処理は、この処理操作を離散たたみ込みに

項 目 \ 処理方式	デジタル的 処 理	ア ナ ロ グ 的 処 理	
		光学的処理	光電変換処理
処理内容			
・線形－空間 不変処理	処理容易	処理容易	処理容易
・線形－空間 変動処理	処理可能	処理不可能	特殊な場合のみ 可能
・非線形処理	処理可能	困 難	同 上
処理の柔軟性 *	優れる	劣 る	やや劣る
処理時間	数 10 秒	瞬 時	数 秒
処理精度	高精度	やや劣る	やや劣る
経済性			
・低分解能 (200×200)	安 い	安 い	安 い
・高分解能 (500×500)	高 い	安 い	安 い
使用の手軽さ	やや劣る	劣 る	優れる

* 処理パラメータの変更が容易かどうかを意味する

表 2 デジタル的処理方式とアナログ的処理方式の比較

表現し、これを電氣的に実現する方式である。ぼけの程度が大きい場合には、この離散たたみ込みに必要な重み（修正重み列）の個数は多くなる。このように処理のために必要になる重みの個数が多い場合、この処理を高次の処理もしくは高度な処理と呼ぶ。これに対し、輪郭抽出のように重みの個数の少ない処理を、低次の処理もしくは簡単な処理と呼ぶ。離散たたみ込みの実現法としては 2 つの手法があるが、その 1 つは、複数個の開口によって被処理像を走査し、それぞれの開口から得られる画像信号に対応する重み付けを行い、さらにこれらの結果の和をとって画像信号（処理像に対応）を生成する方法である。この方法は Image - Serial and Aperture - Parallel（略して ISAP）法と呼ばれる。この方式を採用し、おもにファクシミリ技術を利用した装置が、Swindell⁽¹⁷⁾ および Honda⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾ らによって発表されているが、修正処理内容が簡

単なものであるか、もしくは装置の概念的な説明に終始している。その理由は、高度な処理のためには開口の個数を多く準備する必要があるのに対し、技術的にこれを実行するのが困難だからである。

第2の方法は Image - Parallel and Aperture - Serial (略して IPAS) 法と呼ばれる方法である。この方式では、被処理像を順次平行移動し、それぞれの移動した画像を重み付けながら累積することによって、像修正のための離散たたみ込みを実現する。したがってこの方式では、画像の累積を行う、重ね合わせ蓄積可能なアナログメモリーが必要となる。このメモリーとして、イメージ蓄積管を用いた装置が McGlamery⁽²⁰⁾ および Hawkins⁽²¹⁾⁽²²⁾ らにより、また撮像蓄積管を用いた装置が土屋⁽²³⁾ によって発表されている。これらの装置は、蓄積管が撮像という機構を合わせてもっているため、後に筆者が提案する信号蓄積管を用いた装置にくらべて、テレビカメラを必要としないという利点を有しているが、被処理像が前処理されることなく生の形で蓄積される一方、蓄積管自体のもつ制限要因(重み付け精度)のため離散たたみ込みの重みを多数個設けることが難しくなり、これまた高度な処理には限界がある。

以上述べた光電変換処理装置の欠点を避けるために、筆者は2電子銃型信号蓄積管を利用したテレビ方式による修正処理装置を試作した。この装置では、一般には別に入力装置としてテレビカメラを必要とするが、

1) 通常の超高圧電子顕微鏡には I T V が準備されており、また走査型電子顕微鏡の場合には、画像信号が出力されるから、直接処理装置に接続できる。

2) 2電子銃型信号蓄積管を用いているから、常時処理過程が監視できる。

といった長所があり、また画像信号の前処理ができるため、ISAP法とIPAS法の2つの処理方式を併用することができ、本論文で詳しく論ずるようにそれぞれ単独方式の欠点を相補うことが可能になる。

併用方式は著者が新らしく提案するものであり、全体の修正重み列を重なり合わないブロックに分割し、このブロックの重み列に対してISAP法を適用し、それぞれのブロックで処理された像の和をとる(IPAS法で行う)方式と、重なり合うブロックを用意し、重複領域の重みを適当に再分割して上記の併用法を適用する方式がある。前者の方法をたんに併用法、後者の方法を修正

重み再分割併用法と呼ぶ。後者の方法では、修正重みの再分割を適当に設計すれば、蓄積管に重ね合わされていく情報のなかで不必要なものをより小さくでき、その分だけ高度な修正処理が可能となる。

ところで以上の方式に従って実際に像修正処理を行うには、結像系の P S F に応じて修正関数を決定する必要がある。Frieden⁽²⁴⁾は1次元ばけ修正の場合の離散たたみ込み法における修正関数をミニ・マックス法⁽²⁵⁾で決定し、インバース・フィルタ法より少ない重み個数で同程度の修正ができることを示した。しかしこの方法は、低い空間波数領域での復元特性を保証することができないという欠点があり、またミニ・マックス法は2次元ばけ修正の場合には拡張できない。そこで筆者は前者の欠点をその復元特性を保証するパラメータを導入することにより、また後者の欠点をミニ・マックス法の代りに最小2乗誤差法を導入することにより解決する。

第2章においては、像修正操作が適当に設計された修正重みによる離散たたみ込みに表現でき、この実現法として I S A P 法と I P A S 法があることを述べる。つぎにこれら2方法の光電変換方式による構成法について述べ、それぞれの単独方式では高度な修正処理ができないことを示し、第4章で述べる併用方式の位置づけを行う。

第3章においては、2電子銃型信号蓄積管の動作について述べ、これを用いて I P A S 法を構成した場合の処理の限界を詳述する。つぎにこの問題点を補なう方法として2電子銃型信号蓄積管の転写効果を提案、説明する。この効果を利用して蓄積管を動作させた場合、画像の重ね合わせ可能量は従来の動作にくらべて5～6倍となり、線形性、分解能ともに従来の動作でのものと変りないことを実験的に示す。

第4章においては、I S A P - I P A S 併用法および修正重み再分割併用法を新しく提案し、これらの方式の有利性を処理像のコントラストの面から検討する。後者の方法においては、重複領域内の重みの再分割の仕方が重要であるから、この設計法について詳述し、高度な修正処理にはこの方式が適していることを示す。

第5章においては、上述の併用法を、2電子銃型信号蓄積管を用いたテレビ

方式で構成した像修正処理システムについて述べる。この処理システムは処理の全過程をマイクロ・コンピュータで制御しているため、簡単な操作で会話的に処理ができるばかりでなく、走査型電子顕微鏡のような撮像装置には直接処理装置を接続できるという長所をもっている。最後に処理装置の重要な電気的特性に触れ、約 1 % 程度の処理精度のあることを確認する。

第 6 章においては、少ない個数で勝れた修正特性を有する、修正重みの設計について述べる。ぼけは回転対称なものに限定して、三角格子点状に分布する修正重みの設計法を提案し、焦点外れぼけに適用して実際にその修正重みを求める。

第 7 章においては、第 5 章で述べた修正処理装置によって、実際の焦点外れぼけ像を修正した結果について述べる。この結果から、第 4 章で行った議論と第 6 章で述べた設計法の正当性を確認する。最後に簡単な特徴抽出例を紹介し、本処理装置の有能性を示す。

第 8 章においては、前章までの研究を総括し、今後の課題について述べる。

第2章 像修正の原理と光電変換処理の問題点

(31) - (38), (40), (41), (43)

2.1 まえがき

本章では、まず像修正の原理、すなわち ① 線形かつ空間不変な結像系によってぼけた像は適切に設計された修正関数とのたたみ込みによって修正できること、および ② このたたみ込みの構成法として I S A P 法と I P A S 法があること、を述べる(2.2)。次に、これら2つの構成法をそれぞれ光電変換処理システムとして実現した場合の限界について述べ、筆者の構成法の位置づけを行う(2.3)。

2.2 像修正の原理

画像とは、感覚的にいえば、その明るさや色が空間の点から点へと変化するような平面物体である。この変化の様子は、数学的には、2つの空間変数の関数として表現することができる。色を表現する場合には、関数はベクトル値をとるものとみなさなければならないが、本論文では白黒画像のみを取扱う。このような画像は、それぞれの点で画像の明るさ (brightness) を値としてもつ実数値関数 $f(x, y)$ で表現される。

さて、画像を画像に写像する系 S を考え、その系における入力画像に対する操作を θ としよう。任意の2つの画像 $f(x, y)$, $g(x, y)$ に対して

$$\theta [af(x, y) + bg(x, y)] = a\theta [f(x, y)] + b\theta [g(x, y)] \quad (2.1)$$

を満すとき、系 S もしくは操作 θ は線形と呼ばれる。ここで a , b は任意の実数値である。

画像に対する線形操作の解析において、点光源の概念は非常に有用なものである。点光源は、数学的には輝点部の全光量 (明るさの積分) を1にしたままで輝点部の面積を限りなく小さくした極限の2次元関数として定義され、通常 $\delta(x, y)$ で表現される。このデルタ関数 $\delta(x, y)$ の性質として、任意の画

像 $f(x, y)$ に対して,

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\alpha, \beta) \delta(x - \alpha, y - \beta) d\alpha d\beta \quad (2 \cdot 2)$$

が成立する。この式は、点 (α, β) にある点光源に $f(\alpha, \beta)$ なる重みづけをして、すべての (α, β) に対して和を求めれば $f(x, y)$ になることを示している。つまり、任意の画像は点光源の和で表わせることになる。つぎに、式 $(2 \cdot 2)$ の両辺に操作 θ を施すと,

$$\begin{aligned} \theta[f(x, y)] &= \theta\left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\alpha, \beta) \delta(x - \alpha, y - \beta) d\alpha d\beta\right] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\alpha, \beta) h(x, y; \alpha, \beta) d\alpha d\beta \end{aligned} \quad (2 \cdot 3)$$

$$h(x, y; \alpha, \beta) = \theta[\delta(x - \alpha, y - \beta)] \quad (2 \cdot 4)$$

となる。式 $(2 \cdot 3)$ の第 2 番目の等式は式 $(2 \cdot 1)$ の線形性から得られる。 $h(x, y; \alpha, \beta)$ は点 (α, β) にある点光源の操作 θ による画像であり、通常、考えている系 S もしくは操作 θ の点拡がり関数 (point-spread function: 略して PSF) と呼ばれている。^{注)} もし,

$$h(x, y; \alpha, \beta) = h(x - \alpha, y - \beta) \quad (2 \cdot 5)$$

と表わせる場合、系 S もしくは操作 θ は空間不変 (space invariant) と呼ばれる。

電子レンズや光学レンズによる球面収差、色収差を含んだ結像系においても以上の線形性と空間不変性が成立している。また結像系に多重散乱過程が含まれている場合や、結像系が一定の速度で運動している場合 (いわゆるブレ写真) の出力画像もこの 2 つの性質が満たされている。したがって以下では、対象とする画像は線形かつ空間不変な結像系によって得られたものとする。そうすると、原像を $o(x, y)$ 、結像系の PSF を $h(x, y)$ とすれば、出力画像つまり

注) PSF が線状の拡がりをもつときは線拡がり関数 (line-spread function 略して LSF) と呼ばれる。

われわれが手にする画像 $i(x, y)$ は、式 (2・3) - (2・5) より、

$$i(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} o(\alpha, \beta) h(x-\alpha, y-\beta) d\alpha d\beta \quad (2 \cdot 6)$$

なる $o(x, y)$ と $h(x, y)$ のたたみ込み積分で表わされることになる。通常 P S F : $h(x, y)$ は空間的に広がった関数であるため、この画像はぼけたものとなる。われわれの目的は、この P S F が前もってわかっているものとして、ぼけ画像 $i(x, y)$ から原像 $o(x, y)$ により近い画像 $\hat{o}(x, y)$ を求めることであるが、この目的をぼけ画像 $i(x, y)$ に線形かつ空間不変な修正操作 C を施すことによって達成することにする。つまり修正操作 C の P S F を $w(x, y)$ として、

$$\hat{o}(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} i(\alpha, \beta) w(x-\alpha, y-\beta) d\alpha d\beta \quad (2 \cdot 7)$$

あるいは、

$$\hat{o}(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w(\alpha, \beta) i(x-\alpha, y-\beta) d\alpha d\beta \quad (2 \cdot 8)$$

によって $\hat{o}(x, y)$ を得ることとする。この操作を行う系を修正処理系と呼ぶ。結像系と修正処理系を合わせた全体の P S F を $h_{net}(x, y)$ とすれば、式 (2・6)、(2・7) より、

$$\hat{o}(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} o(\alpha, \beta) h_{net}(x-\alpha, y-\beta) d\alpha d\beta \quad (2 \cdot 9)$$

$$h_{net}(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(\alpha, \beta) w(x-\alpha, y-\beta) d\alpha d\beta \quad (2 \cdot 10)$$

となることがわかる。式 (2・2) と式 (2・9) を比較すればわかるように、もし $h_{net}(x, y)$ がデルタ関数となるように修正処理系の P S F : $w(x, y)$ を決めることができれば、式 (2・7) の操作によって原像が完全に復元されることになる。しかし実際には、 $h_{net}(x, y)$ がある意味で最もデルタ関数に近似するように、修正処理系の P S F : $w(x, y)$ を設計せざるを

得ない。以下では、この $w(x, y)$ は画像修正のために用いる関数であるから、これを修正関数と呼ぶ。

ところで、種々のぼけに応じて修正関数 $w(x, y)$ を連続関数のままで変化させうる処理系をつくることは困難である。そこで $w(x, y)$ としては、

$$w(x, y) = \sum_{j=0}^{J-1} w_j \delta(x - x_j, y - y_j) \quad (2 \cdot 11)$$

のような有限個の離散点においてのみ値を有する関数を用いることにして、 w_j および (x_j, y_j) を種々のぼけに応じて設計し変化させる。 w_j を以下では修正重みと呼ぶ。式(2・11)の修正関数を用いた場合、式(2・7)は

$$\hat{o}(x, y) = \sum_{j=0}^{J-1} w_j i(x - x_j, y - y_j) \quad (2 \cdot 12)$$

となり、離散たたみ込みで表現されることになる。この式は次のように2通りに解釈することができる。その第1は、ぼけ像 $i(x, y)$ を x 方向、 y 方向にそれぞれ x_j, y_j 移動し、その移動に応じた重み w_j によってぼけ像を重み付け、順次重ね合わせば、 $\hat{o}(x, y)$ が得られるという解釈である(図2・1(a)参照)。この解釈に基づいて式(2・12)の操作を装置として構成する方法は、時間的に像が並列の形で、重み(開口)が直列の形で処理されているから、

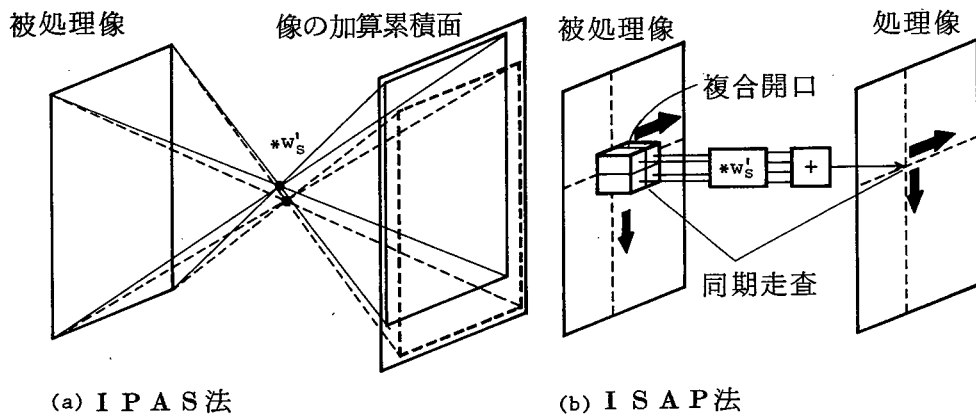


図2・1 離散たたみ込み(2・12)の構成法

Image - Parallel and Aperture - Serial 法, 略して IPAS 法と呼ばれている。その第 2 は, 修正像 $\hat{o}(x, y)$ の点 (x, y) の明るさは, その点から x 方向, y 方向にそれぞれ x_j, y_j 離れた点のぼけ像の明るさ $i(x - x_j, y - y_j)$ に重み w_j を掛け, すべての j に関する和をとれば, 得られるという解釈である。この場合全修正像を得るためには, 上の操作をぼけ像面全体に対して行うこと, つまり走査を行う必要がある (図 2・1 (b) 参照)。この解釈に基づく式 (2・12) の構成法は, 時間的に像が直列の形で, 重みが並列の形で処理されているから, Image - Serial and Aperture - Parallel 法, 略して ISAP 法と呼ばれている。

2・3 光電変換処理の問題点

処理したい画像の明るさの分布を電気信号に変換し, その信号に電氣的な形で処理を施し, 処理された電気信号を再び光の明るさに変換して処理像を得る処理方式を光電変換処理という。この処理方式は, 電氣的に処理内容を制御できるため, 処理装置のオンライン動作が可能となる長所がある。上述の IPAS 法および ISAP 法をこの処理方式で構成すると次のようになる。

まず IPAS 法を考えよう。このときの像の重ね合せには撮像蓄積管を用いる。図 2・2 にこの管の構造を示す。光電面に結像した被処理像は, 光電

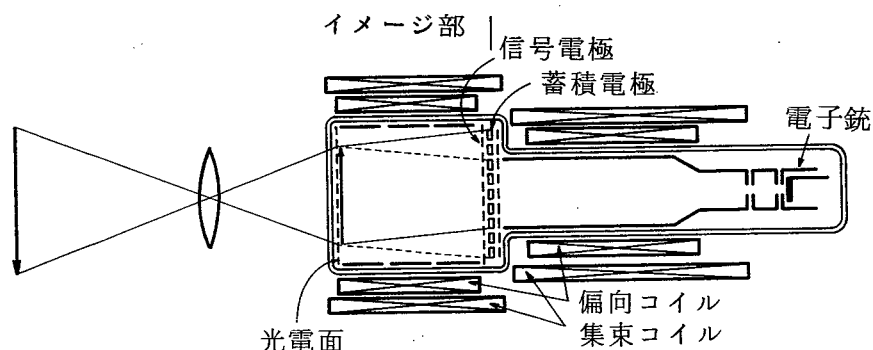


図 2・2 撮像蓄積管の構造図と IPAS 法

面の光電効果によって各点の明るさに比例した電子数をターゲットに向かって放出する。この画像の電子ビームは、イメージ部の加速電極と収束コイルによって構成される電子レンズによって、ターゲットに結像する。ターゲットは、第3章で述べる信号蓄積管と同様な構造となっており、電荷パターンの形で像が蓄積される。イメージ部に水平、垂直偏向コイルを設け、それぞれに式(2・12)の x_j , y_j に比例する電流を流せば、図2・1(a)の画像移動が実現できる。画像の重みづけは次のようにして行う。まず、信号電極を光電面電極電位に対し十分低い電位にしておけば、光電面から放出される光電子は、ターゲットに到達しない。したがって信号電極電位を制御することによって、画像ビームの開閉が可能であり、長時間開状態にしておけば 大きい重み付けが、また短時間の場合には小さい重み付けができることになる。正、負の重みの区別は、蓄積電極電位を光電面に対してそれぞれ 300 V, 15 V として、第3章で述べる高速度、低速度書込みによって行うことができる。以上より、撮像蓄積管を用いることによって図2・1(a)のIPAS法が構成できる。

一方ISAP法は以下のように構成できる。まず(1)光電変換素子を図2・1(b)のように上下左右に規則正しく配列した複合開口を準備し、それぞれの開口から得られる電気信号にアナログ乗算器によって対応した重みづけを行い、それらの和をとった電気信号を光の強度に変換する出力部を準備する。そこで(2)被処理像をドラム上に巻きつけ、出力用に感光紙を巻きつけたドラムをもう一つ用意し、この2つのドラムを同期して回転させると同時に上記の複合開口と出力部をドラムの軸方向に同期走査する。このISAP法の構成法は、ファクシミリによるものである。

さて以上のような離散たたみ込みの構成法においては、技術的および経済的な面からみると、以下に述べるような問題点がある。まず最初に、撮像蓄積管を用いてIPAS法を実現する場合を考えてみよう。IPAS法では図2・1(a)に示すように、像が何枚も重ね合わされていくから、撮像蓄積管のターゲット絶縁物の表面電位は像が重ね合わせられるにつれて変化していくことになる。負の重み付けられた像を書込むとき、つまり低速度書込みにおいては、第3章で述べるように、実際にターゲット絶縁物表面に書かれる電荷パターンの強さ

は、その表面電位つまり一次電子のエネルギーに強く依存する。したがって負の重み付けが正確に行われなければならず、既に重ね合わされたターゲット絶縁物上の像パターンに依存した重み付けとなるために、処理系の空間不変性が満されなくなる。以上の理由から、撮像蓄積管を用いた I P A S 法は、輪郭強調等の簡単な処理はできても、全体の重みの数が多いような処理つまり大きい焦点外れ像の処理は不可能であることがわかる。次にファクシミリ方式による I S A P 法を考えよう。この場合にも図 2・1(b)からわかるように、簡単な処理の場合には開口数が少なく実現も技術的に容易であるが、複雑な処理の場合には開口を多く設けなければならず、①多くの開口を規則正しく並べる必要があること、②開口部の光電変換利得をすべての開口について一定にする必要があること、③それぞれの開口から得られる電気信号に対して重み付けを行う乗算器の特性を合わす必要があること、を満す必要がある。しかしながら、アナログ処理装置において、これら 3 つの条件を満すように多数個の開口の校正を行うことは困難であり、したがって重みの個数の多い高度な処理をこの構成法によって行うことは不可能であると結論づけられる。

ところで、像復元もしくは像修正を必要とするような画像を取扱う分野（X線テレビ像、超音波診断像等の医用画像、走査型電子顕微鏡像）においては、画像は既に走査によって電気信号に変えられている。上述の 2 つの構成法による処理装置をこのような場合に適用するには、撮像蓄積管を用いたものの場合には、ブラウン管面上に写し出された像を入力する必要があるのに対し、ファクシミリを利用したものの場合には、写真に変換して入力する必要がある。このような処理装置の入力形式の条件は、前者の装置ではブラウン管（被処理像）→光→撮像蓄積管、後者の装置ではブラウン管（被処理像）→光→印画紙（撮影）の形の画像の変換が行われていることになり、実際に入力するまでの伝達特性が問題となって、処理結果を劣化させることになる。このことから、被処理像のテレビ信号をそのままの形で入力して処理する方式が望ましいといえる。このテレビ方式による、上記 2 つの方式の構成は以下ようになる。まず I P A S 法は、撮像蓄積管の代りに第 3 章で述

べる信号蓄積管を用いる。この場合画像は、テレビ信号で変調された電子ビーム走査によってターゲット絶縁物表面に順次累積されることになる。また重み付けは乗算器で、画像の移動は、たとえば偏向コイルにバイアス電流を流して実現する。他方 I S A P 法は以下のように構成できる。テレビ信号は、像を 1 開口で走査したものであるから、時間軸を空間軸とみなしてよい。したがって、時間軸に沿って開口を並べることで、つまり遅延線を複数個用いることによって、複合開口と等価な状態を実現することができる。

これらテレビ方式による 2 つの構成法においても、それぞれ先に述べた撮像蓄積管を用いた I P A S 法とファクシミリを利用した I S A P 法の構成法と類似の問題点がある。まず信号蓄積管を用いた前者については、撮像蓄積管の場合と異って、テレビ信号の極性を反転させれば負に重み付けられた像を高速度書込みによって書込むことができ、離散たたみ込みの精度を向上させうる。しかしすべての重みの書込みを高速度走査で行うため、ターゲット絶縁物表面に蓄えられていく電荷パターンは正の大きな量となり、最後には読み出せなくなる。しかし 2 電子銃型信号蓄積管の場合には、第 3 章で述べる転写効果によって、この読み出せなくなった電荷パターンを読み出すことができ、ある程度の重みの個数を有する処理が可能となる。ところで蓄積管を累積装置として用いた場合、いま一つ注意しなければならないのは、書込み時のビーム・シェーディングである。この主要因は、書込みビームがターゲットに到達するときのターゲット面と成す角度が、ターゲットの周辺に近づくにつれて 90° からずれてくることによる。単に 1 フレームだけの書込みにおいては、信号成分に対しこの量は 60 dB 以下に抑えられているが、離散たたみ込みの場合には、重ね合わせ量に比例してビーム・シェーディングが顕著になっていく。したがって信号蓄積管を用いて I P A S 法を構成する場合、その限界があることがわかる。

遅延線を用いた I S A P 法の構成においては、高度な処理のためには、非常に多くの水平、垂直遅延線を装備する必要がある。しかし現在のところ垂直遅延線は、信号蓄積管に匹敵する程に高価であり、多数備えることは経済的に得策ではない。また遅延線を多段接続することによって信号の減衰あるいは反射等が生じ、これらの補償を十分行うことは容易でない。

以上よりIPAS法およびISAP法をそれぞれ単独で構成した場合、処理に限界があることがわかる。本来これら2つの方法は、式(2・12)の解釈に基づいて命名された方法であり、これらを分離する必然性はまったくないのである。したがってIPAS法とISAP法の互の欠点を相補う形で処理装置を構成する方法が考えられる。この方法については、第4章において説明する。

2・4 む す び

本章では像復元もしくは像修正の原理について述べ、その構成法の問題点について言及した。まず、線形かつ空間不変な結像系から得られるぼけ像は、そのぼけに応じた修正重みとの離散たたみ込みによって修正できることを示し、このたたみ込みの実現法としてIPAS法とISAP法があることを述べた。これら2つの方法の光電変換方式による構成法を述べ、処理に限界のあることを示した。使用の手軽さから議論した場合、光電変換方式のなかでもテレビ方式が勝れているが、この方式の場合にも、IPAS、ISAP単独法の構成では処理に限界があることがわかった。この解決法として、IPAS法に関しては2電子銃型の転写効果がある程度利用でき、また両者の併用によって高度な処理ができる可能性を示した。

第3章 2電子銃型信号蓄積管の転写効果⁽⁸⁹⁾

3・1 ま え が き

I P A S 法に従って、蓄積管のターゲット絶縁物面上で像の重ね合わせを行う場合、重み付けの精度を保証するためには、書込みは高速度走査で行う必要がある。しかしこの書込み法では、重ね合わせが進行するにつれて、ターゲット絶縁物表面電位は上昇して、最後には読み出せなくなる。しかし2電子銃型信号蓄積管の場合には、ビームに晒されるターゲット絶縁物の面が2つあるため、1電子銃型信号蓄積管とは事情が異なり、この読み出し不可能な電荷パターンを読み出すことができる。この効果を転写効果と呼ぶが、転写効果を用いた動作の場合、ターゲット絶縁物の蓄積最大電荷量は従来の動作に比較して5～6倍となる。

まず最初に3・2において、2電子銃型信号蓄積管の構造とその通常の動作について述べ、3・3においてこの管の転写効果の原理について述べる。最後に3・4において転写効果の実験結果について述べ、I P A S 法を構成するのにこの効果が有効なことを示す。

3・2 2電子銃型信号蓄積管の動作

種々の蓄積管は、絶縁物表面を加速された電子(1次電子)でたたくと、表面から2次電子が放出され、表面に1次電子数に応じた電荷パターンが蓄積される性質を利用したものである⁽⁸⁶⁾。図3・1は、筆者が用いた2電子銃型信号蓄積管に用いられているターゲット絶縁物材料(有機ポリイミド⁽⁸⁷⁾)の2次電子放出比 δ (=2次電子数/1次電子数)を1次電子エネルギー(=絶縁物表面-陰極間電圧)の関数として実測したものである。ここで縦軸は $\delta-1$ の相対値である。図3・1において、1次電子のエネルギーが54 eV以下では $\delta < 1$ でしかも δ の絶縁物表面電位の依存性が強いのに対し、88 eV以上では $\delta > 1$ で一定であることがわかる(このような2次電子放出特性の特徴は、撮像蓄積管のターゲット絶縁物の場合にもあてはまる)。 $\delta < 1$ の領域で絶縁物表面を電子ビーム走査することは低速度走査、逆に $\delta > 1$ の領域の場合は高速度走

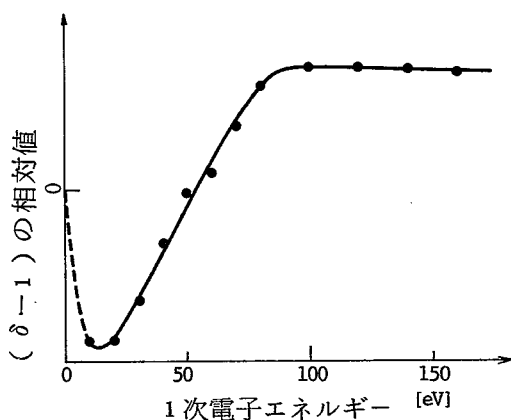


図 3・1 絶縁物（有機ポリイミド）の2次電子放出特性

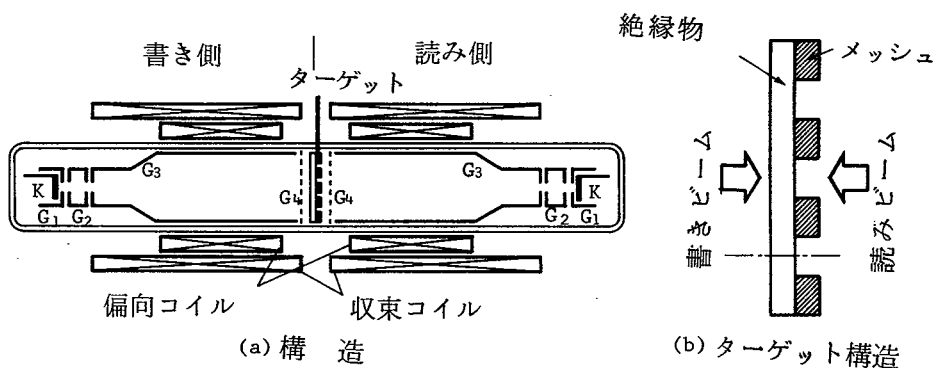


図 3・2 2電子銃形信号蓄積管の構造とターゲット構造

査と呼ばれる。

2次電子放出特性に起因する重要な性質として、絶縁物表面電位の平衡がある。まず、絶縁物表面を十分な密度を有するビームで低速度走査すれば、 $\delta < 1$ のため表面には負電荷が蓄えられて、表面電位が陰極電位まで下降すると1次電子が絶縁物表面に入射しなくなり平衡する。一方、高速度走査の場合には、 $\delta > 1$ であるから表面電位が上昇するが、2次電子捕集電極電位より上昇すると、表面に向かって減速電界が生じ2次電子が再び絶縁物表面に引き戻される。

このことから、高速度走査における絶縁物表面の平衡電位は、2次電子捕集電極の少し上であることがわかる。

2電子銃型信号蓄積管は、走査方式の異なるテレビ信号のインターフェース用に開発された記憶素子であるが、上述の性質を有する絶縁物薄膜の裏に金属メッシュ（信号電極）を蒸着した図3・2(b)のようなターゲットを中央に配し、これを2つの電子銃で挟んだ同図(a)に示す構造となっている。左側書き込み電子銃の第1格子G1と陰極K間にテレビ信号を加えて密度変調した電子ビームをテレビ信号に同期して偏向すれば、ターゲット絶縁物書き側表面にテレビ信号に応じた電荷パターンが書き込まれる。この電荷パターンは、①このパターンに応じた書き側絶縁物表面電位が右側読み出し電子銃の陰極に対して負で、さらに②信号電極電位がこの陰極電位より正の場合に、読み側の無変調ビーム走査によって信号電極から外部に読み出すことができる。この読み出し条件は、絶縁物表面を格子とみたとすると、3極管の格子制御効果と同じである。したがって電荷パターンがあっても、表面電位が読み側陰極電位より大になると格子制御効果が失われて読み出し不可能となる。

さて実際の動作では、上の読み出し条件を満たすように、

(i) 消去操作 (Erasing)

書き側第4電極G4（実際は細いメッシュ状を成していて、2次電子捕集電極の役割りをする）と信号電極を同電位として書き側から無変調ビームで高速度走査すれば、絶縁物表面上の電荷は放電され、その電位は一樣に信号電極電位より少し上昇したところにおちつく。

(ii) 準備操作 (Presetting)

書き側G4の電位を信号電極電位より十分大きな電位とし、書き側を無変調ビームで低速度走査する。この場合、表面電位は書き側陰極電位に一樣に平衡するから、この操作により表面は信号電極より低い電位になる。

の2つの操作を併用して、図3・3のように書き込みが実行される。高速度書き込みにおいては、準備操作によって絶縁物表面電位を下げておいてから、その状態を基準にして正電荷パターンが書き込まれていくことになる。したがっ

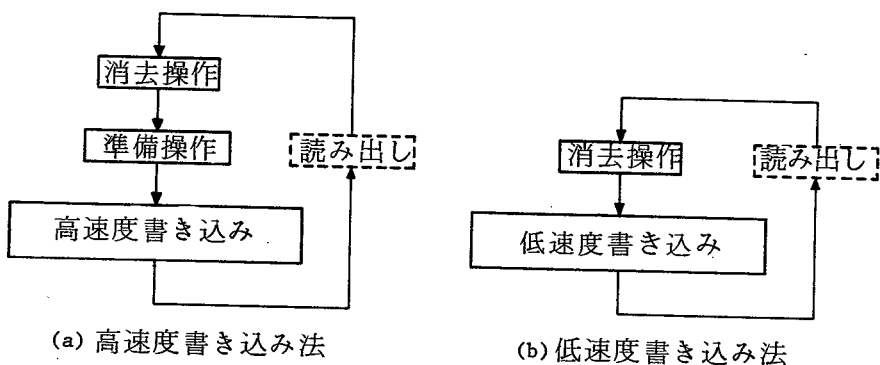


図 3・3 2 電子銃型信号蓄積管の書き込み操作の手順

て準備操作で低下させた以上に絶縁物表面電位が書き込みによって上昇した場合には読み出し不可能となる。他方低速度書き込みにおいては、消去操作後、絶縁物表面には負電荷の形で電荷パターンが書き込まれるから読み出し条件が常時満されていることになる。しかしこの場合も、書き込みを続行すると絶縁物表面電位は書き側陰極電位に平衡する。以上から高速度書き込みおよび低速度書き込みのどちらにおいても、書き込み量に制限があることがわかる。

ところで第 6 章で述べるように、像修正の重みは一般に正負ほぼ等量であるから、撮像蓄積管を用いた構成法と同様に、正の重みによる書き込みは高速度走査を、負の重みの場合には低速度走査を用いてこの制限を回避する方法が考えられる。しかし図 3・1 から明らかなように低速度走査においては、絶縁物表面電位に δ が大きく依存するため、負の重みによる正確な重み付けができな
いばかりでなく、処理系の空間不変性まで失われてしまうことになる。

結局 IPAS 法を 2 電子銃型信号蓄積管を用いて構成する場合、処理系を精度よく動作させるためには、管への書き込みは高速度走査によらなければならないことになるが、できるだけ書き込み量を稼ぐ方策が必要となる。

3・3 転写効果の原理

高速度走査によって多数枚の画像を累積書き込みした場合、最後には読み出

し条件を満たさなくなり、ターゲット絶縁物上に累積されている電荷パターンが読み出せなくなる。しかし2電子銃型蓄積管の場合、累積された絶縁物表面上の電荷パターンは、裏側からの読みビーム走査によって破壊されるわけではない。この格子制御効果の失った電荷パターンを適当な操作によって読み出すことを以下で考える。

この操作を探すために、いま一度高速書き込みでの画像の累積していく過程のターゲット絶縁物薄膜断面の電位分布について考察してみよう。話を簡単にするため、図3・2(b)の一点鎖線で示す断面を考え、薄膜両表面間の容量はそれらと信号電極間に形成される容量に比べて十分大であると仮定し、また電位は信号電極電位を基準にして考える。書き込み過多の場合、後でわかるように、読み側の表面にも電荷が書き込まれるから、まず最初に以下の両面消去操作を行う。書き側、読み側の第4電極G4(2次電子捕集電極)を0 voltにし、書き側、読み側を同時に高速度走査する。そうすると薄膜両面の電荷はそれぞれのビームによって放電され、両表面は小さな正電位で平衡する(図3・4(a)参照)。消去操作以外のときには、読み側陰極電位は $-E_r = -5 \sim -8 \text{ volt}$ に設定されたままで、ビーム走査が行われているため、消去後読み側表面に電子が入射し、読み側表面電位は次第に降下して読み側陰極電位 $-E_r$

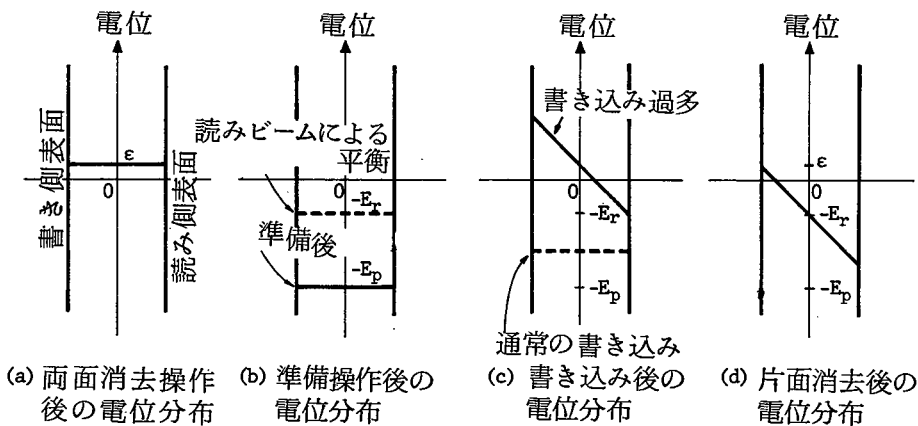


図3・4 高速度書き込みにおけるターゲット絶縁物薄膜の断面の電位分布(信号電極電位を基準とする)

に平衡する。書き側のビームはしゃ断されているため、書き側表面電位も強い

容量効果によって $-E_r$ となる。(図 3・4(b) 破線参照)。

両面消去操作後しばらくして、書き側陰極を $-E_p = -15 \sim -40 \text{ volt}$ とし、書き側表面を低速度無変調ビーム走査すれば、書き側表面はその陰極電位 $-E_p$ に平衡する。書き側表面が平衡電位に向って降下し始めると同時に、強い容量効果によって読み側表面も下り始め、読み側陰極電位より低下するから、もはや読み側ビームはその表面に入射しなくなる。したがって、書き側表面がその平衡電位に達したときには、読み側表面も同様の電位となる(図 3・4(b) 実線参照)。この操作がさきに述べた準備操作である。この後、前節で述べた高速度書き込みを実行すれば、変調の強さに応じて書き側表面電位は上昇し、同時に容量効果によって読み側表面電位も図 3・4(c)破線のように上昇する。この状態では、

$$\text{絶縁物表面電位} < \text{読み側陰極電位} (-E_r) < \text{信号電極電位} (0)$$

と読み出し条件を満たしているため、普通この状態で書き込みを止める。

さらに高速度書き込みを続けると、両表面は読み側陰極電位 $-E_r$ より上昇しようとする。しかし読み側では低速度走査が行われているから、読み側表面が容量効果で少しでも正電位にもちあげられると、そこに電子が入射し読み側陰極電位に引き戻される。つまり平衡状態が常に保たれるため、読み側表面電位は $-E_r$ に固定されることになる。もちろん書き側表面はそのまま上昇し続ける。図 3・4(c)実線はこの場合の電位分布を示したもののだが、書き側表面に累積された正電荷を中和する形で、読み側表面に情報を荷った負電荷が蓄積されていることになる。

もちろんこのままでは、蓄積電荷が格子制御効果をもっていないことになるから、読み出しは不可能である。読み側表面の電荷は負であるから、書き側表面の正電荷を放電してしまえば、読み側の電荷は格子制御効果をとるもどすことになる。そこで書き側に対してだけ消去操作を行うと、書き側表面電位は降下して信号電極電位より少し高い電位におちつく。強い容量効果によって読み側表面も書き側表面電位が降下した分だけ読み側陰極電位 $-E_r$ より下った電

位となり、読み側表面だけに残っている負電荷パターンはこの格子制御効果により読み出し可能になる（図 3・4 (d) 参照）。累積されたパターンが正電荷であるのに対し、この逆符号の、転写された負電荷パターンが読み出されるから、この現象を転写効果と呼ぶ。いうまでもないが、転写効果を利用した場合には、読み出される電流は、普通の高速度書き込みの場合のそれと極性が反転しているから、読み出し増幅器に反転機能をもたせておく必要がある。

累積過多の場合、以上に述べたように読み側表面にも電荷が蓄積されていることになるから、蓄積像を消すためには最初に述べた両面消去操作が必要なのである。

3・4 転写効果の実験とその効果の I P A S 処理への有効性

以上の原理の説明では、ターゲット絶縁物薄膜表面間の容量が極めて大きいと仮定した。しかし実際には、とくに薄膜の読み側に蒸着したメッシュ状の信号電極と表面間の容量も大きいため、書き側表面上の電荷がそのまま逆符号で読み側表面に転写されるわけではない。図 3・5 の実線は、両面消去操作後、一定の無変調ビームで高速度書き込みを行い、さらに読み側表面に転写させたときに読み側表面が読み出せる読み側陰極電位の最高値を測定したものである。横軸は書き込んだフレーム数であり、多く書き込めば書き込む程、転写された場合の読み側表面電位が低下し、したがってこの表面を読み出すためにはより低い読み側陰極電位が必要となることを示している。また、同図破線は、準備操作を $E_p = 40 \text{ volt}$ で行った後、転写効果の場合と同量のビーム量で高速度書き込みを行い、これを読み出すことのできる読み側陰極電位の最高値の測定例である。この場合には、多く書き込むと表面電位が上昇するから、それを読み出すには必要な読み側陰極電位は負の小さなものでよいことになる。

以上の 2 つの場合の測定結果を比較するとつぎのことがわかる。

(1) 通常の高速度書き込みに対し、転写効果を用いた場合勾配が逆符号であり、反転像として読み出される。

(2) 両者の場合の勾配の絶対値は、転写効果を用いた場合の方が小さい。本節の最初で述べたように、この事実は、転写される電荷量が、絶縁物両表面間の容

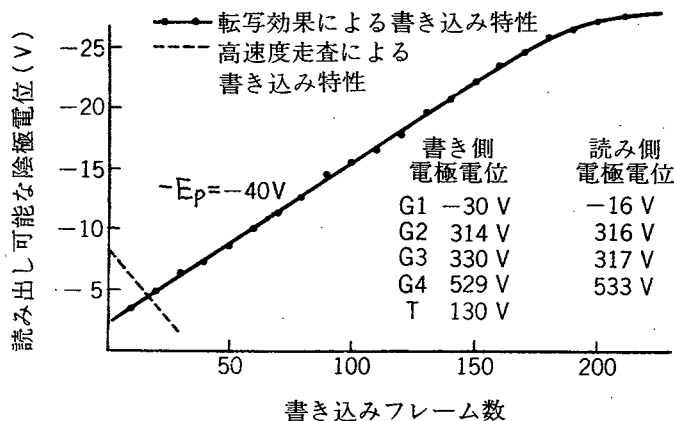


図 3・5 転写特性

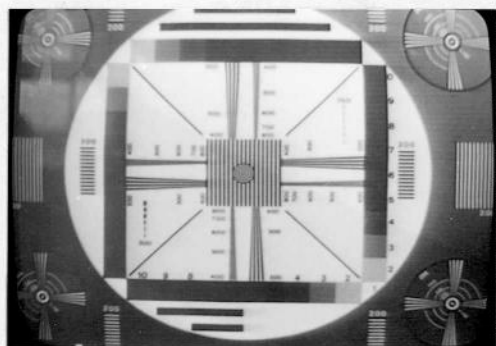
量及びそれらと信号電極の間に形成されている容量に依存し、書き側表面電荷の一部が転写されることを示している。

(3) 転写効果を用いた場合、通常の高速度書き込みと同様、線形性が満されており、さらに書き込み量は普通の高速度書き込みに比べて 5～6 倍程度になる。

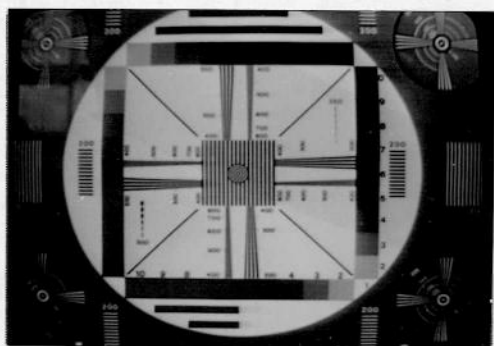
ところで、電荷パターンが転写される場合、近傍の画素へも転写される可能性（つまり蓄積像の分解能の劣化）が考えられるが、絶縁物膜が非常に薄い場合にはこの可能性を無視することができる。図 3・6 (a)に通常の高速度書き込みによるテストパターンの蓄積像を、同図(b)にこれを蓄積転写した像を示す。もちろん、後者の場合には反転信号を読んでいる。分解能においては、両者の間ではほとんど差異が認められないが、ビームによると思われるシェーディングが後者の周辺部に若干表われている。

2 電子銃型信号蓄積管を用いて IPAS 法を構成する場合、処理系の空間不変性、重み付けの精度を保証するためには高速度書き込みにたよらざるをえないということを前節で示した。しかしこの場合、重ね合わせが進むにつれて絶縁物表面電位が上昇し、最後に読み出せなくなる。しかし、このような状況のもとで、転写効果を用いればそれを読み出すことができ、線形性分解能にも問題がないとい

うことになる。



(a) 高速度書き込み



(b) 転写効果

図 3・6 蓄積像の比較

3・5 む す び

本章では、2電子銃型信号蓄積管には転写効果が存在し、IPAS法をこの管を用いて構成する場合、転写効果が有効に利用できることを示した。

処理系の空間不変性、線形線、さらに重み付けの精度を保証するためには、像の重ね合わせは高速度走査によらなければならないが、表面電位の上昇のため、普通はすぐ読み出せなくなる。このような場合でも転写効果を用いることによって処理像を反転像として読み出すことができ、重ね合わせ量は普通の動作に比べて5～6倍とれ、線形性、空間分解能とも十分満足な特性が得られた。

第4章 ISAP-IPAS 併用法と修正重み再分割

(40), (43), (44)

4・1 まえがき

テレビ方式を採用した最大の理由は、既存の撮像装置に容易に接続できるということにあったが、実は信号蓄積管を用いてIPAS処理する前に何らかの前処理ができることにもある。先の章で述べた通り、信号蓄積管を用いたIPAS法は、その書き込み量に制限があるため十分なコントラストのある処理像が得られないのが最大の難点である。そこで前処理にISAP法を採用することによってできるかぎり不必要な絶縁物表面電位の上昇を抑えようというのが本章で述べる方法の考え方である。

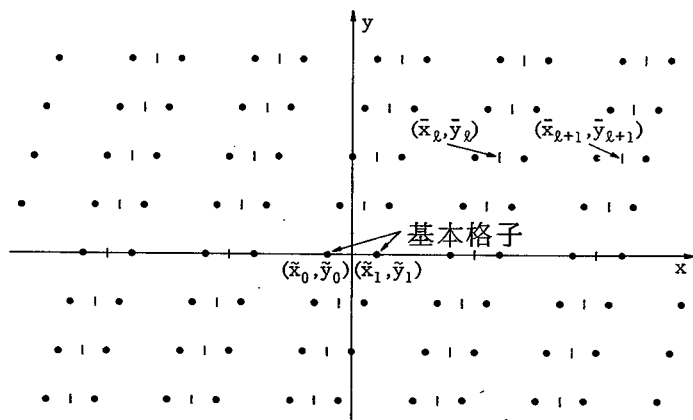
まず最初に4・2においてISAP-IPAS併用法によってかなりのコントラスト改善ができることを1次元処理を例にとり示す。次に4・3において、さらにそれぞれの修正重みを適切に分割（修正重み再分割）し、この分割された重みを用いて併用方式を適用すれば、処理像の十分なコントラスト改善ができることを示す。

4・2 ISAP-IPAS併用法

ISAP法およびIPAS法なる実現法は式(2・12)の解釈に基づいて考えられたものであり、これら両者を分離して考える必要はまったくない。そこで式(2・12)から再度話を始めることにする。一般に修正重みの座標 (x_j, y_j) は、後の例でもわかるように、有限領域に限られた平面格子を形成する場合が多い。ここで平面格子とは、図4・1に示すようにある基本格子の周期化である。基本格子の座標を $(\tilde{x}_k, \tilde{y}_k)$ ($k = 0, 1, \dots, K-1$)；また基本格子が平行移動する座標を番号付けて $(\bar{x}_l, \bar{y}_l)$ ($l = 0, 1, \dots, L-1$)としよう。もとの修正重みの座標の添字 j はこの平面格子の添字 k, l に1対1に対応するから、 j を2つの添字 k, l に書き換えると式(2・12)は、

$$\bigwedge_0(x, y) = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{K-1} w_{l,k} \quad i(x - \tilde{x}_k - \bar{x}_l, y - \tilde{y}_k - \bar{y}_l) \quad (4 \cdot 1)$$

となる。ただし $J=KL$ である。さらにこの式を2つの式に分けて書けば、



$$K = 2$$

図4・1 平面格子と基本格子（平面格子は平行移動された基本格子の集合で表現できる）

$$\hat{o}(x, y) = \sum_{l=0}^{L-1} i_l(x - \bar{x}_l, y - \bar{y}_l) \quad (4 \cdot 2 a)$$

$$i_l(x, y) = \sum_{k=0}^{K-1} w_{l,k} i(x - \tilde{x}_k, y - \tilde{y}_k) \quad (4 \cdot 2 b)$$

と表現できる。ここで式(4・2b)の演算はISAP法で実現する。したがって添字kは、図4・1に示すような基本格子の形に配列されたK個の開孔（もしくは遅延線のタップ）の番号と考えればよい。つぎに式(4・2a)の演算は、ISAP法で得られた $i_l(x, y)$ なる画像を移動させて重ね合わせること、すなわちIPAS法で実現する。

つぎにこの併用方式によって処理像のコントラストが改善できることを一般の場合について示そう。まずはじめに、信号蓄積管の書き込み特性は、第1格子 G_1 のカットオフ電圧を0レベルとして $\gamma=1$ に調節されており、またターゲット表面電位上昇を極力抑えるため、入力信号はその最低レベルを0レベルにそろえて書き込むものと仮定する。併用方式では、まずISAP処理した後の信号の最低レベルを0レベルにそろえて書き込み、これを順次IPAS法に

従ってターゲット絶縁物上で重ね合わすことになる。したがって I S A P 処理後の書き込み信号レベルは、式 (4 ・ 2) に基づいて考えれば、I S A P 処理後の信号 $i_1 (x, y)$ からその最低値を差し引いたもの、すなわち

$$i_1 (x, y) - \text{Min}_{x, y} \{ i_1 (x, y) \}$$

$$= \sum_{k=0}^{K-1} w_{1, k} i (x - \tilde{x}_k, y - \tilde{y}_k) - \text{Min}_{x, y} \left\{ \sum_{k=0}^{K-1} w_{1, k} i (x - \tilde{x}_k, y - \tilde{y}_k) \right\}$$

となり、I P A S 法による重ね合わせは、たんにこれを x 方向に $\bar{x}_1$, y 方向に $\bar{y}_1$ 移動し、1 に関する和をとればよいから、併用方式による処理像のターゲット表面上におけるレベル $\hat{0}_{\text{HYBR}} (x, y)$ は書き込み前の電位を 0 レベルとしてつぎのようになる。

$$\hat{0}_{\text{HYBR}} (x, y)$$

$$= \sum_{l=0}^{L-1} \left[\sum_{k=0}^{K-1} w_{1, k} i (x - \tilde{x}_k - \bar{x}_1, y - \tilde{y}_k - \bar{y}_1) \right.$$

$$\left. - \text{Min}_{x, y} \left\{ \sum_{k=0}^{K-1} w_{1, k} i (x - \tilde{x}_k, y - \tilde{y}_k) \right\} \right]$$

$$= \hat{0} (x, y) + \sum_{l=0}^{L-1} \text{Max}_{x, y} \left\{ - \sum_{k=0}^{K-1} w_{1, k} i (x - \tilde{x}_k, y - \tilde{y}_k) \right\}$$

(4 ・ 3)

一方、I P A S 法単独方式では、たんに $w_{1, k} i (x, y)$ の最低値を 0 レベルにそろえ、 x 方向に $\tilde{x}_k + \bar{x}_1$, y 方向に $\tilde{y}_k + \bar{y}_1$ 移動しながらターゲット表面に書き込んで $k, 1$ に関する和をとることになるから、この方式の処理像のレベル $\hat{0}_{\text{IPAS}} (x, y)$ は、

$$\hat{0}_{\text{IPAS}} (x, y)$$

$$= \bigwedge_0 (x, y) + \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{K-1} \text{Max}_{x, y} \{ -w_{l,k} i(x, y) \} \quad (4.4)$$

上の2式の右辺第1項はともに処理像そのものであるが、情報を含まない第2項に関しては、関数の最大値の性質より一般につきの不等式が成立する。

$$\begin{aligned} & \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{K-1} \text{Max}_{x, y} \{ -w_{l,k} i(x, y) \} \\ &= \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{K-1} \text{Max}_{x, y} \{ -w_{l,k} i(x - \tilde{x}_k, y - \tilde{y}_k) \} \\ &\geq \sum_{l=0}^{L-1} \text{Max}_{x, y} \left\{ - \sum_{k=0}^{K-1} w_{l,k} i(x - \tilde{x}_k, y - \tilde{y}_k) \right\} \end{aligned} \quad (4.5)$$

上式で、一般には不等号が成立する。したがって、被処理像の入力振幅を等しくとれば、処理像のバックグラウンドレベルは併用方式の方が小といえる。書き込み量は、高速度書き込みにおいては制限されるから、上のバックグラウンドレベルが小さいほど実際には入力信号振幅もしくは書き込み量を大きくでき、高コントラストの処理像が得られることになる。

ところで、修正重み $\{w_j\}$ のなかには正負の重みがほぼ等量で混在しているため、隣接する正負の重みを選んで $\{w_{l,0}, w_{l,1}, \dots, w_{l,K-1}\}$ なる重みでISAP法を適用すれば、開口数の少ない場合でも、IPAS法単独方式に較べて併用方式のバックグラウンドレベルを相当小さくでき、したがって高コントラストの処理像を得ることが可能となる。

ここで、以上の事柄を1次元レクト型ぼけ像修正を例にとって、より具体的に示そう。いま簡単のため、原像はその強度分布が図4・2実線で示すような幅Xの帯とする。図4・3(a)は1次元レクト型ぼけのLSFであるが、上の原像がこのような $2d$ ($2d > X$ と仮定する)のぼけ幅をもつ光学系を通れば、原像と図4・3(a)のLSFのたたみ込み積分をとって、その出力像の強度分布は図4・2の一点鎖線のような台形となる。図4・3(b)はこのぼけに対する修正関数を示したものであるが⁽¹⁹⁾、これは Δd だけ離れて相接する正負の重みの

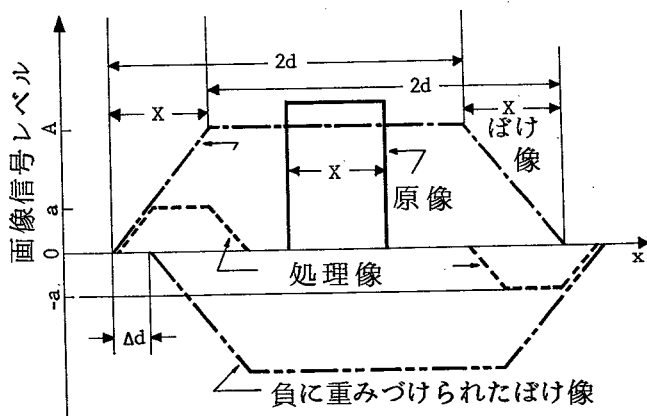
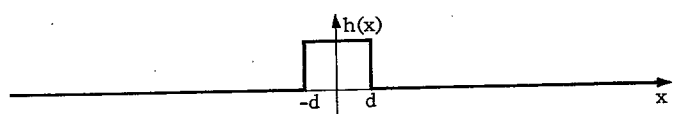
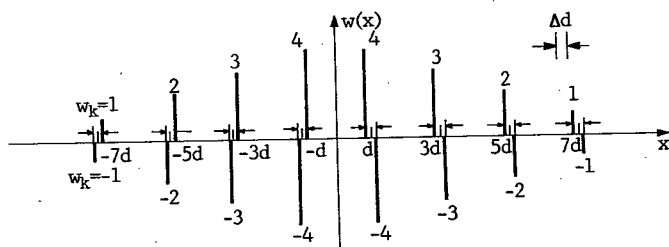


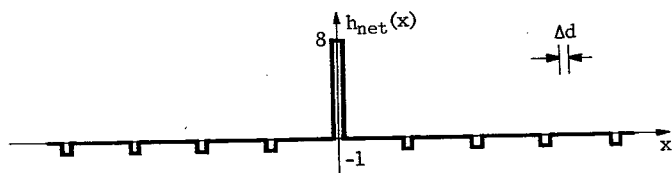
図 4・2 1次元レクト型ぼけの微分演算子による処理の説明
($X < 2d$ の場合)



(a) レクト型 L S F



(b) 修正関数



(c) 全体の L S F

図 4・3 1次元レクト型ぼけ修正法の説明

組 (微分演算子) から構成されている。

さて、この被処理像を I P A S 法単独方式で処理する場合、上述の台形の底辺を 0 レベルにとれば、負の単位重みの掛った画像は図 4・2 の 2 点鎖線のようになり、式 (4・4) における $\text{Max}_{x,y} \{ -w_{l,k} i(x,y) \}$ は $w_{l,k} >$

0 のときは 0, $w_{l,k} < 0$ のときは、台形の高さを A とすれば、 $-w_{l,k} A$ となる。したがって式 (4・4) 右辺第 2 項は、図 4・3 (b) の重みを参照して $-2 \cdot \{ (-1) + (-2) + (-3) + (-4) \} \cdot A = 20 A$ となる。

つぎに併用方式を考えよう。図 4・3 (b) からわかるようにこの修正関数の最小の基本格子は $(\pm \Delta d / 2, 0)$ である。そしてこの基本格子にある修正重みは微分演算子を構成している。図 4・2 の一点鎖線のぼけ像に単位微分演算子による I S A P 処理を施せば、同図の Δd だけ離れた一点鎖線と二点鎖線の正負ぼけ像を加え合せて、同図破線で示す処理像が得られ、その最低値はこれを参照して、 $-a = -A \Delta d / X$ となる。したがって、図 4・3 (b) の処理関数を参照して式 (4・3) 右辺第 2 項を計算すれば、 $-2 \cdot \{ (-1) + (-2) + (-3) + (-4) \} \cdot a = 20 a$ となる。

ところで、図 4・3 (c) に示した処理後の L S F からわかるように、処理像の解像度は Δd によって決まる。いま原像の幅 X 内に微細構造が存在しており、この構造を解像するために、 Δd を $\Delta d \ll X$ に選ぶとすれば、 $A \gg a$ となり、式 (4・3) 右辺第 2 項は式 (4・4) 右辺第 2 項に較べて充分小さくなる。いまの場合、両式右辺第 1 項 (図 4・2 の一点鎖線のぼけ像と図 4・3 (b) の修正関数とのたたみ込みを計算して $8 a$ となる) はそれぞれの第 2 項に較べて小さいので、書き込み量の限界はほぼこれら第 2 項によって決まり、したがってこの限界は、この特別な場合の併用方式では I P A S 法単独方式に較べて A/a 倍程度と充分大きくなり、処理後のコントラストも同じ比率だけ向上する。

一般的にいて開口数が多いほど、ターゲット表面電位の不必要な上昇を招く I P A S 処理の比重が少なくてすみ、高コントラストの処理像が得られることは、以上の例から容易に想像できる。

第 5 章で述べる実際の装置では、I S A P 処理に必要な開口は遅延線により構成しており、とくに 2 次元ぼけの場合垂直遅延線を多数準備するのは高価なものにつく。そこで、相当の効果が期待できる両方式の併用方式をとり、開口

としては、横方向 2 ライン分の複合開口つまり垂直遅延線 1 つと複数個の安価な水平遅延線によって構成し、次節で述べる修正重み再分割を適用するのが有利である。

4・3 修正重み再分割による ISAP-IPAS 併用法

前節の併用処理の例は、処理関数が微分演算子から構成されていて、ISAP 処理された信号には直流成分がなくなるという性質をもつものであった。ところで一般の修正関数は、このような性質を満たすとは限らない。しかし、修正重みを適当に分割することによって、この性質を満たすようにすることができる。以下では、まず 4・3・1 において 2 次微分処理を例にとって修正重み再分割併用法を説明し、つぎに一般の 1 次元修正処理においてこの方法が処理像のコントラスト改善に有効であることを示す。さらに 4・3・2 で 1 次元の場合の方法を 2 次元の場合に拡張する。

4・3・1 1次元ぼけ修正

2 次微分処理は、画像のエッジを抽出したり、またエッジ抽出した後にもとの画像を加算することによって簡単な像修正をする場合に用いられる。さて先の例と同様に原像は y 方向の帯とし、それが幅 d にわたってレクト型にぼけた図 4・4 (a) のような被処理像を考えることにする。2 次微分処理の場合の修正関数は図 4・4 (b) 最上段に示すものであるが、IPAS 法単独方式では、(b) の中央に示すようなパターンで順次重ね合わされることになるから、最終的な絶縁物上のパターンは (b) 最下段のようになり、バックグラウンドレベルは 1 である。

前節に述べた ISAP-IPAS 併用方式では、図 4・4 (c) 最上段に示すように、左から順に 2 つの重みを取りだして ISAP 処理しながら重ね合わすことになるから、(c) 中央のようにパターンが重ね合わされることになる。したがってこの併用方式による最終的な絶縁物上のパターンは (c) 最下段のようになり、バックグラウンドレベルは $(1 + \Delta/d)/2$ となる。この例の場合、最初の ISAP 処理において、ペアーを構成した重みの和が $1/2$ であるため、直流成分が書き込まれていることに注意する必要がある。

そこで、図4・4(d)の最上段に示すように、中央の重みを等しく2分し、左側の $-1/2$ なる重みと中央の分割した重みでペアを構成し、残りの中央の重みと右側の $-1/2$ なる重みとでもう一つのペアを構成する。これら2つのペアに対してそれぞれISAP法を適用し、重ね合わせると、前者のペアでは(d)中央のようなパターンが書き込まれ、後者のペアでも同様のパターンが書き込まれることになるから、最終的には(d)最下段のパターンが絶縁物表面上にできあがることになる。このときのバックグラウンドレベルは Δ/d となる。このようにもとの修正重みを再分割して併用法を適用する方式を、修正重み再分割によるISAP-IPAS併用法(略して修正重み再分割併用法)と呼ぶ。

一般にこの2次微分処理においては、抽出したエッジをより細くしたいという要求から $\Delta \ll d$ と選ばれるのが普通である。したがって単なる併用法のバックグラウンドレベルがIPAS単独方式のそれに比べて約 $1/2$ になるのに対し、修正重み再分割併用法のそれは充分小さくなることになり、その分だけ処理像のコントラストが強調されることになる。以上の事柄を一般の1次元修正の場合について、以下で考察することにしよう。

図4・5は1次元ガウス型ぼけを修正処理するための修正関数である。修正関数を求める方法については第6章で述べるが、この例では正負の重みが交互に位置し、また全重みの和は小さな正の値である。このうち前者の事実については、つぎのように考えればうなづけることである。まず、理想的な修正関数は、結像系のPSFのフーリエ変換(光学的伝達関数: optical transfer function ;略してOTFと呼ばれる)の逆数^{注1)}を逆フーリエ変換する^{注2)}ことによって連続関数として求めることができる。つぎにこの連続関数を適当な領域に制限し、これを目的の修正したい空間周波数をナイキスト周波数として標本化する。このようにすれば、図4・5と類似の修正関数が得られる。一

注1) OTFが0になる空間周波数では逆数が存在しない。このような場合にはその空間周波数でOTFを充分小さな値で置き換える。

注2) 逆フーリエ変換が存在しない場合には、目的の修正したい空間周波数で帯域制限を行って逆フーリエ変換する。

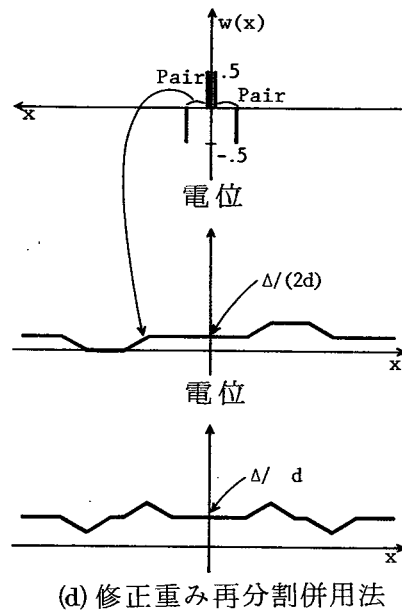
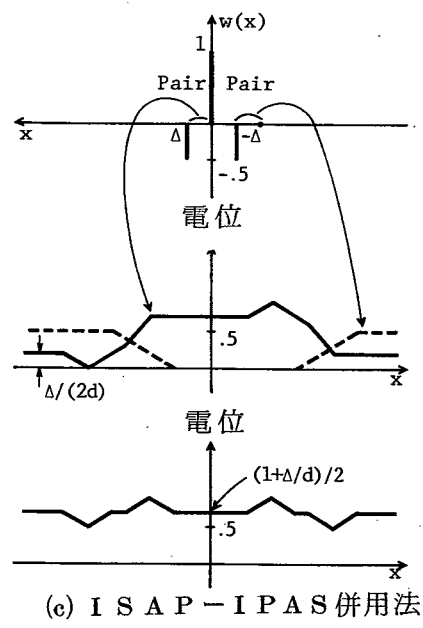
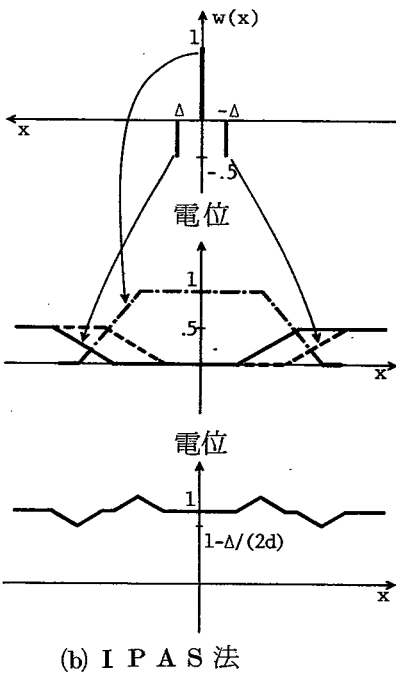
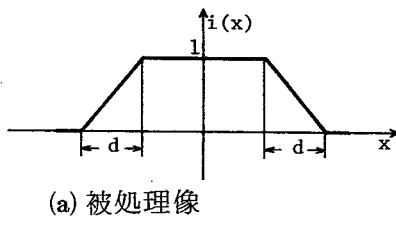


図 4・4 2 次微分処理の各方式による相異

般に、ぼけ像を修正する処理は高域空間周波数強調フィルタを施すことと等価であるから、修正関数の最高空間周波数つまりナイキスト周波数成分が最も大きな振幅をもつことになる。いいかえれば、修正関数の正負の重みはかならず交互に配置されることになる。つぎに修正重みの和が小さな正值をとるという事実は、処理の前後を通じて大まかな構造が反転してはならないということから理解できる。

このように考えると、一般の高域空間周波数強調型の修正関数において、図 4・5 のように

(i) 修正重みは、 Δ 間隔で配置されるとして、交互にその符号を変えるように位置している。

(ii) 修正重み全体の和は小さな正值をとる。

と仮定してよい。1次元処理の場合、操作の手順は、式(4・2)と類似の

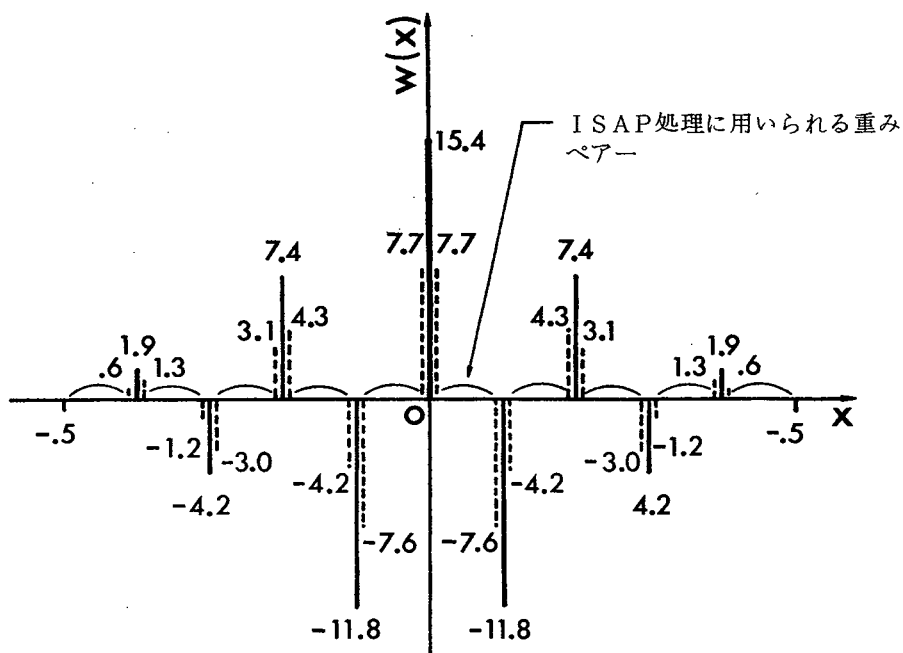


図 4・5 ガウス型ぼけ修正のための修正関数

$$\hat{o}(x, y) = \sum_{l=0}^{L-1} i_l(x - \bar{x}_l, y) \quad (4 \cdot 6 a)$$

$$i_1(x, y) = \sum_{k=0}^1 w_{1,k}^* i(x - \tilde{x}_k, y) \quad (4 \cdot 6b)$$

となる。上式の式(4・2)との相違点は、併用方式において($\tilde{x}_k, \bar{x}_1$)
 $\leftrightarrow x_j$ と1対1に対応させずに、 $\tilde{x}_0 = -\Delta/2$, $\tilde{x}_1 = \Delta/2$, また $\bar{x}_1$ を小さい方から順序づけて、

$$\bar{x}_1 \in A \subset \{ \dots, -\frac{5\Delta}{2}, -\frac{3\Delta}{2}, -\frac{\Delta}{2}, \frac{\Delta}{2}, \frac{3\Delta}{2}, \frac{5\Delta}{2}, \dots \}$$

とし、2つの $\{\tilde{x}_k, \bar{x}_1\}$ が1つの x_j (Δ の整数倍に等しい)に対応することを許していることである。このとき $w_{1,k}^*$ ともともとの修正重み w_j との間には、 $L = J - 1$ のもとでつぎの関係が成立している。

$$\left\{ \begin{array}{l} w_0 = w_{0,0}^*, \quad w_1 = w_{0,1}^* + w_{1,0}^*, \quad w_2 = w_{1,1}^* + w_{2,0}^* \\ \dots, \quad w_j = w_{j-1,1}^* + w_{j,0}^*, \quad \dots \\ w_{J-2} = w_{J-3,1}^* + w_{J-2,0}^*, \quad w_{J-1} = w_{J-2,1}^* \end{array} \right. \quad (4 \cdot 7)$$

さて、式(4・6b)はISAP法で行うから、本節の最初の例からわかるように、 $i_1(x, y)$ に表われる直流成分をできるだけ小さくなるよう、式(4・7)だけでは決まらない $w_{1,k}^*$ を決めればよい。そこで、仮定(ii)の修正重みの和 w をすべての重みのペアー $w_{1,0}^*$, $w_{1,1}^*$ に割り振って

$$w_{1,0}^* + w_{1,1}^* = \frac{w}{J-1}, \quad l = 0, 1, 2, \dots, J-2 \quad (4 \cdot 8)$$

とすれば、式(4・7)と(4・8)を $w_{1,k}^*$ について解くことができる。この場合、仮定(i)によって、 $w_j \rightarrow w_{j-1,1}^* + w_{j,0}^*$ の分解は、かならずこれら3つの重みの符号が同じになるようにすることができる。以上の手順を実際にガウス型ばけ修正の修正関数に適用すると、図4・5の破線のようになる。

以上のような $K = 2$ の場合の修正重み再分割併用法では、被処理像の微分像を重ね合わせることになるから、バックグラウンドレベルの上限値は、 Δ と微分演算子の強さの和および被処理像の微係数の最大値に比例すると考えれば、

$$[UBBL]_{DW-HYB} = \left| \sum_{w_k < 0} w_k \right| \cdot \text{Max}_{x, y} \left\{ \left| \frac{\partial}{\partial x} i(x, y) \right| \right\} \Delta \quad (4 \cdot 9)$$

となる。ただし、 $UBBL$ 、 $DW-HYB$ はそれぞれ Upper Bound of Background Level, Devided Weight-Hybrid を意味し、 $\sum_{w_k < 0}$ はも

もとの修正重みの負値だけにわたる和である（この正確な導出は付録に示す）。

一方 $IPAS$ 法では、付録に示すように

$$[UBBL]_{IPAS} = \left| \sum_{w_k < 0} w_k \right| \cdot \text{Max}_{x, y} \{ i(x, y) \} \quad (4 \cdot 10)$$

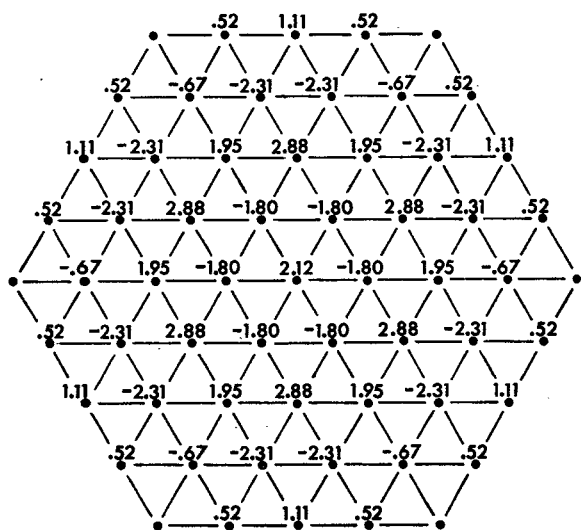
となる。 $i(x, y)$ はぼけ像の強度分布であるから、なめらかな 2 次元関数である。したがってこの情況のもとでは、 Δ を十分小さく選ぶと、

$$\text{Max}_{x, y} \left\{ \left| \frac{\partial}{\partial x} i(x, y) \right| \right\} \Delta \ll \text{Max}_{x, y} \{ i(x, y) \}$$

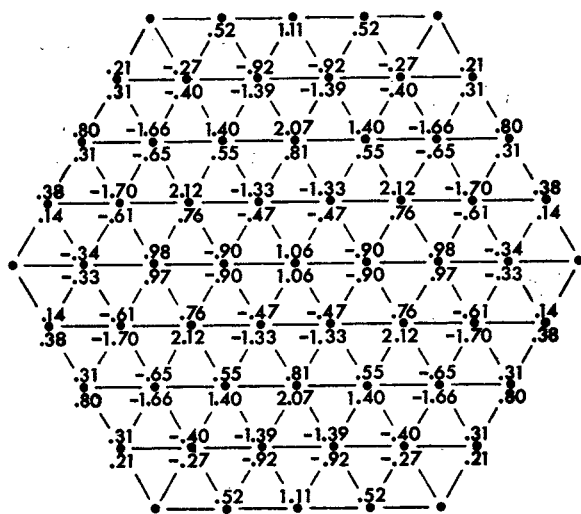
とすることができる。上の不等式および式 (4・9) と (4・10) を参照すれば、1 次元ぼけ修正においては、修正重み再分割併用法は $IPAS$ 単独方式に比較してバックグラウンドレベルつまり不必要な表面電位を相当に抑えることができ、高コントラストの処理像が得られると結論できる。

4・3・2 2次元ぼけ修正

ここでは前節の 1 次元の場合の議論を、回転対称的ぼけによって劣化した像の修正の場合に拡張しよう。重みの配置は図 4・6 に示すような三角格子点とする。三角格子を選んだ理由は以下の通りである。回転対称的ぼけを修正する理想的な修正関数は当然 2 次元の連続関数になる。この連続関数は空間周波数領域でも回転対象関数であるが、必要な空間周波数で円状に帯域制限されている。



(a) 焦点外れ修正のための修正重み列



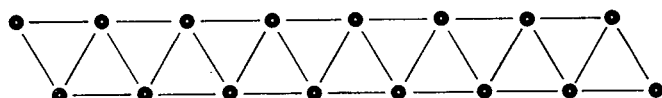
(b) (a)を再分割したもの

図 4・6 焦点外れぼけ修正のための修正重みとその再分割

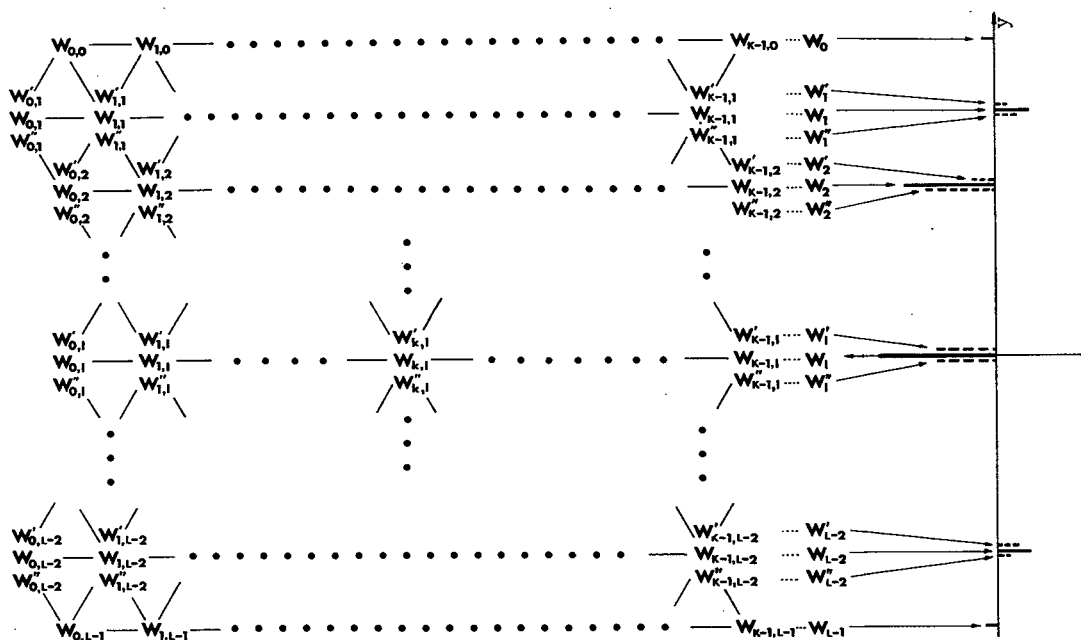
このような円状に帯域制限された 2 次元信号を標本化する場合、標本化する個数は、四角格子よりも三角格子による方が 13.4% 有利である⁽⁴⁶⁾。つまり、限られた個数の修正重みによって像修正を行う場合、三角格子点に修正重みを配置するのが有利なことになる。焦点外れ像を修正するための修正重みの値を図 4・6 (a) に示す (この設計法については第 6 章で述べる)。

さてこの修正重みの再分割を説明するために、図 4・6 (a) の六角形外の三角格子点に 0 なる重みを付け加え、一般的に図 4・7 (b) に示すように修正重みが配置されているとしよう。数式で表現すると、修正関数は、

$$w(x, y) = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{K-1} w_{k,l} \delta \left(x - X - \frac{1 + (-1)^{l+1}}{4} \Delta l - k \Delta l, \right. \\ \left. y - Y - l \frac{\sqrt{3}}{2} \Delta l \right)$$



(a) I S A P 処理部に実装されている複号開口



(b) 修正重み再分割の方法の説明

図 4 ・ 7 複合開口と，再分割の方法の説明

となる。ただし、 X 、 Y は修正関数の中心が図 4 ・ 7 (b)の中心になるように定めたシフト量、 $\Delta.l$ は三角格子の格子間隔である。 4 ・ 2の最後に述べたように、併用方式においては、垂直遅延線 1つと複数個の水平遅延線を用いて図 4 ・ 7 (a)に示すような複号開口を用いる。したがって図 4 ・ 7 (b)に示すように、最上段と最下段のラインを除くライン上の修正重みを $w_{k,l} = w'_{k,l} + w''_{k,l}$ と分割し、この分割された重みを用いて順次 I S A P 処理しながら I P A S 法に従って重ね合わすことになる。この場合の分割法を以下に説明しよう。

まず、 x 方向に添った修正重みの和を求めよう。

$$w_1 = \sum_{k=0}^{K-1} w_{k,1} \quad (l = 0, 1, 2, \dots, L-1) \quad (4 \cdot 12)$$

この w_1 は、もともとの修正重みを y 軸に写影したもので、図 4・7(b) 右端実線に示すように、ちょうど 1 次元の場合の修正重みに対応する。この、いわば写影重みは、ばけを y 軸方向に写影した 1 次元ばけを修正することができ、一般に前節の仮定(i), (ii)を満す。そこで前節の方法にならって、つぎのように写影重みを分割する。

$$w'_1 = \frac{w}{L-1} - w''_{1-1} \quad (l = 1, 2, \dots, L-2) \quad (4 \cdot 13a)$$

$$w''_1 = w_1 - w'_1 \quad (l = 1, 2, \dots, L-2) \quad (4 \cdot 13b)$$

$$w''_0 = w_0, \quad w'_{L-1} = w_{L-1} \quad (4 \cdot 13c)$$

ただし、 $w = \sum_{l=0}^{L-1} w_l = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{K-1} w_{k,l}$ で小さな正值をとる。こうすること

によって、写影重みは図 4・7(b)右端の破線のように分割できる。

各ライン上にあるもともとの修正重みの分割のしかたの一つは、上記の写影重みを分割した比でそれぞれを分割する方法である。つまり

$$w''_{k,0} = w_{k,0} \quad (4 \cdot 14a)$$

$$w'_{k,1} = w_{k,1} \frac{w'_1}{w_1}, \quad w''_{k,1} = w_{k,1} \frac{w''_1}{w_1} \quad (l = 1, 2, \dots, L-2) \quad (4 \cdot 14b)$$

$$w'_{k,L-1} = w_{k,L-1} \quad (4 \cdot 14c)$$

とする。この手順に従って図 4・6(a)の修正重みを分割した結果を、同図(b)に示す。

以上のように修正重みを分割して、ISAP処理はまず $\{w''_{k,0}\}$ と

$\{w'_{k,1}\}$ によって行い、順次 $\{w''_{k,1}\}$ と $\{w'_{k,2}\}$, と行っ

ていく。この場合、I S A P処理される重みの和が非常に小さな正值 $w / (L - 1)$ となっている。1次元の場合、ペア構成において、ペアの重みの和が小さな正数であり、そのためこれらのペアによるI S A P処理像が蓄積管に書き込まれたときのバックグラウンドレベルの上限値が被処理像の微係数によって表現できたことを思いおこせば、上述のI S A P処理の重み構成がこの1次元のペア構成と非常に似かよっていることがわかる。実際、I S A P処理する重みの集りをさらに重み分割することによって、この重みの集りを図4・5破線のような正と負の重みのペアの集りとして表現できる。このように考えると、2次元の場合の修正重み再分割併用方式では、バックグラウンドレベルの上限値はつぎのように表わすことができる（付録 参照）。

$$[UBBL] = \left| \sum_{w_{k,l} < 0} w_{k,l} \right| \cdot \max_{x,y} \{ |\text{gradi}(x,y)| \} \Delta l \quad (4 \cdot 15)$$

もっとも、I S A P処理は再構成された複数個の重みによって行われているから、再構成された重みをさらに再分割して導出した上式は、実際は見積りすぎといえる。したがって実際の処理においては、式(4・15)よりもはるかに小さいバックグラウンドレベルになっていると考えられる。

最後に、修正重み再分割法を定式化するとつぎのようになる。

$$\hat{\Delta}_0(x, y) = \sum_{n=0}^{N-1} i_n \left(x - X - \frac{1 + (-1)^{n+1}}{4} \Delta l, y - Y - n \frac{\sqrt{3}}{2} \Delta l \right) \quad (4 \cdot 16 a)$$

$$i_n(x, y) = \sum_{m=0}^{M-1} \left\{ w_{0,m,n}^* i(x - m \Delta l, y) + w_{1,m,n+1}^* i \left(x - \frac{2m+1}{2} \Delta l, y - \frac{\sqrt{3}}{2} \Delta l \right) \right\} \quad (4 \cdot 16 b)$$

ただし、 $N = L - 1$ 、 $M = K$ で、 $w_{i,m,n}^*$ は分割された重みである。式(4・16 b)はI S A P法で行い、式(4・16 a)はI P A S法で行う。つまりI

SAP処理された像をx方向に $X + \{ 1 + (-1)^{n+1} \} \Delta l / 4$, y方向に $Y + n \sqrt{3} \Delta l / 2$ だけ移動させ、蓄積管ターゲット絶縁物上に順次重ね合わせていくことになる。したがってもともとの修正重みの第0番目と第(L-1)番目のライン上の重みの位置を除いて、それぞれの重みの位置に対応して2重の書き込みが実行されていることになる。なお、図4・6(b)は $M=N=8$ である。

4・4 む す び

本章では、テレビ方式を用いた処理方式の問題点を解決する方法を提案した。まずISAP-IPAS併用方式が、それぞれ単独の方式の欠点を相補うことを示し、さらに高度な処理の場合には、修正重み再分割併用方式が有効なことを示した。

第5章 処理システム (33-43)

5・1 まえがき

前章で修正重み再分割併用法を提案し、その有効性を理論的に示した。本章では、この併用法を遅延線と2電子銃型信号蓄積管を用いて構成した処理システムを実際に即して説明する。

本処理システムでは、簡単な操作によって各種ばけ修正を会話的に行えるよう、マイクロコンピュータを用いて処理装置を制御している。したがって5・2において本処理システムの構成を概説し、その後5・3において処理装置つまりISAP処理部とIPAS処理部の概要を述べる。さらに5・4においては、2つの処理部の電気的特性を述べる。

5・2 処理システムの構成

処理システムのブロック図を図5・1に示す。修正処理のための制御は、

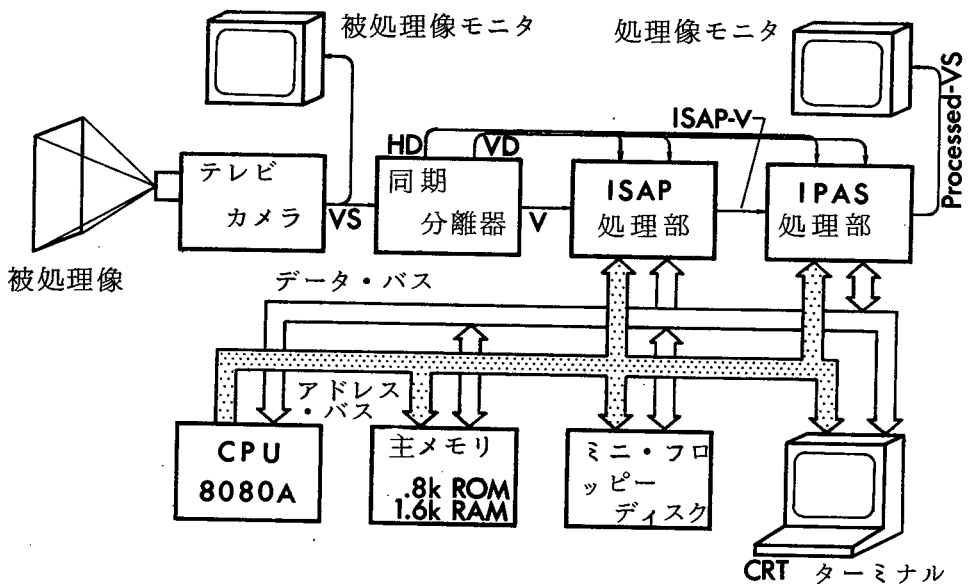


図5・1 処理システムのブロック図

図下部のデジタル制御部が行う。各種ばけ修正を会話的に簡単な操作で行うため、このデジタル制御部にはマイクロ・コンピュータを用いている。

ばけ像は、テレビカメラによって映像信号に変換され、標準テレビ信号（水平走査周波数 15.75 KHZ，垂直走査周波数 60 HZ）の形で処理装置に入力される。既に設置済みの撮像装置が上記の形で画像信号を生成している場合には、この信号を直接処理装置に入力すればよい。

上記の入力された標準テレビ信号は、まず最初に映像信号(V)および水平駆動信号(HD)と垂直駆動信号(VD)に分離される。後者の2つの駆動信号は、以下の処理部で行う画像信号の種々な操作の同期に用いられる。前者の映像信号はISAP処理部に入力される。この処理部は、主として映像信号用遅延線、高速アナログ乗算器および加算器により構成されているが、式(4・16b)のISAP処理操作を、デジタル制御部から与えられる重みデータ群を用いて、フレーム同期した形で行う。このようにISAP処理された信号(ISAP-V)は、順次IPAS処理部に導かれる。IPAS処理部は、主として映像信号ボトムクランパー、ガンマ補正器および2電子銃型信号蓄積管により構成されているが、式(4・16a)のIPAS処理操作を、デジタル制御部から与えられる像の移動データを用いて、フレーム同期した形で行う。つまり、前段から与えられるISAP処理された映像信号が、順次、信号蓄積管のターゲット上に変調ビーム走査により重ね合わされていくことになる。

式(4・16a)および(4・16b)の全体の処理は、デジタル制御部からのデータ転送時間を除けば、N回の画像の重ね合わせを実行しているから、Nフレーム時間つまり $N \times (1/30)$ 秒の時間を必要とする。この処理を以下では一巡処理というが、一般に撮像系および処理部で混入する雑音（フレーム間では相関がない）を除去して、より高S/N比で十分なコントラストの処理像を得るために、一巡処理を何回か繰り返す。つまり、雑音の混入した処理像をそのまま重ね合わすことにより雑音除去を計る。処理途上の蓄積像は、常時信号蓄積管の読みビーム走査により読み出され、増幅後標準テレビ信号の形に処理されて、映像モニタに映し出される。

上記の操作は、デジタル制御部のCRTターミナル・コンソールから種々の

命令を入力すれば、制御プログラムのもとで自動的に実行される。このプログラムは、フロッピー・ディスクに記憶されており、処理装置の電源投入と同時にROM領域のブート・ストラップ・プログラムが働いて、自動的にRAMのプログラム領域にロードされる。フロッピー・ディスクにはまた、画像の移動とISAP処理に用いる分割重み群が、種々の処理の目的に応じて、8ビット・オフセット・バイナリーの形で記憶されており、データ名 NAME が付けられている。

制御プログラムは以下の5つの判断もしくは制御操作を行う。

① ターミナル・コンソールから入力される命令を解釈する。

② "LOAD NAME" をターミナル・コンソールから入力すれば、NAME という名前の付いた目的の処理データ（再分割重みとそれに付随したIPAS処理の画像移動）をRAMデータ領域にロードする。

③ "PRC" もしくは "PRC-NUM" をターミナル・コンソールから入力することにより、処理を開始する。後者の命令では、NUM 回の一巡処理を続行する。一巡処理は、データ領域にある分割重み群とその場合の移動量をそれぞれISAP処理部、IPAS処理部に垂直帰線期間の時間を使って3フィールド毎に順次転送し、後の2フィールドつまり1フレーム間、書きビームを開いて実行される。

④ "STOP" を入力すれば、上記③の制御操作を、この命令を入力した時点に行っている一巡処理が完了した段階で中断する。

⑤ "ERASE" をコンソールから入力すれば、第3章で述べた消去操作および準備操作を行って、信号蓄積管の絶縁物蓄積面を初期状態にもどす。

したがって、われわれが "LOAD NAME", "ERASE", "PRC-NUM" の順でターミナル・コンソールから入力すれば、NAME という修正処理操作が開始され、NUM 回の一巡処理が実行され、映像モニタに映し出される。もしこの途中の段階で、我々が処理された像を見ていて十分高コントラストと判断するか、もしくは処理を他の処理データで行った方がよいと判断したときには、実行中の処理を "STOP" で中断させることができる。

なお、③の後半で述べたことを考慮すると、実際の処理時間は、

$$\text{処理時間} = \text{NUM} \times \text{N} \times \left(\frac{1}{60} \right) \times 3 = \frac{1}{20} \text{NUM} \times \text{N} \text{ [秒]} \quad (5 \cdot 1)$$

となる。

5・3 処理装置の概要

5・3・1 ISAP 処理部

図 5・2 に ISAP 処理部の構成を示す。14 個の映像信号用水平遅延線と

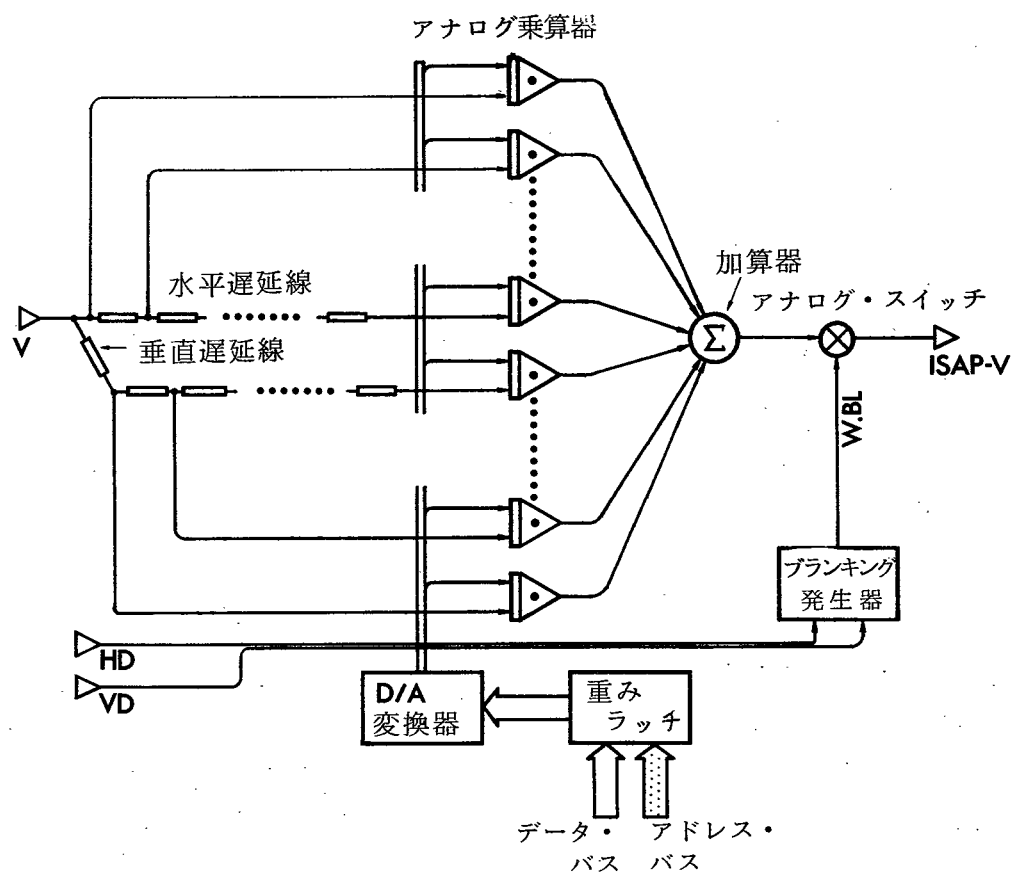


図 5・2 ISAP 処理部の構成

1 個の映像信号垂直遅延線によって、4・3・2 で説明した図 4・7 (a)の横方向 8

個で2ライン分、計16個の複号開口を構成する。2:1の線順次走査方式では、複号開口のライン間隔 $\sqrt{3}\Delta l/2$ が2走査線分に対応するから、開口間隔 Δl は $(4/\sqrt{3})TV$ ラインに対応する。デジタル制御部から転送される16個の重みは、それぞれ対応する16個のラッチに一時記憶され、D/A変換器でアナログ量に変換される。ラッチに一時記憶される16個の重みは3フィールド毎に、垂直帰線期間の間で更新される。16個の遅延された映像信号は、高速アナログ乗算器によってそれぞれ重み付けられ、高速演算増幅器による加算器でこれらの和がとられて、ISAP処理された映像信号となる。以上の過程での入力と出力の1水平期間中の映像信号の模様をそれぞれ図5・3(a),(b)に示す。

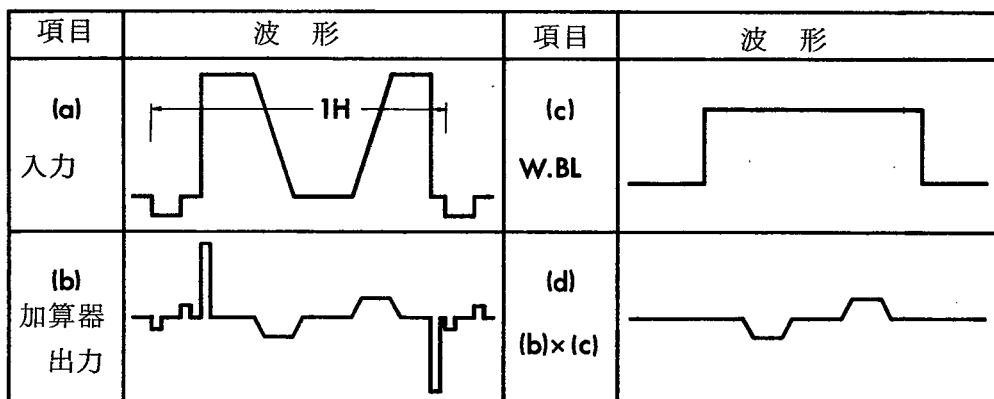


図5・3 不必要なインパルスの除去

入力の映像信号には、水平帰線期間の前後に、暗レベルと画像自体が端でもつレベル間に急激な遷移がある。したがってISAP処理を実行すると、この帰線期間の近傍に大きなインパルスが発生させる。この事情は垂直帰線期間においても同様である。この余分な大きなインパルスを含むISAP処理された映像信号を蓄積管に書き込むと、この信号の最低値をクランプして書き込まれることになるから、不必要なバックグラウンド・レベルの上昇をもたらすことになる。したがって、もともとの帰線期間を被う広いブランキング信号(W. B L)を水平、垂直駆除パルスから生成し、この信号とアナログ・スイッチによ

ってこのインパルスを取り除く。図 5・3(c)と(d)にそれぞれW・BLとブランキングされた映像信号を示す。

5・3・2 IPAS 処理部

IPAS 処理部の構成を図 5・4 に示す。IPAS 処理を行うデバイスとしては、2 電子銃型信号蓄積管を用いた。その理由は、第 3 章で述べたように IPAS 処理の過程で、書き込み過多の状況で読み出せることと、処理の過程が常時監視でき、任意の時点で処理を中断できることである。

次節で述べるように、信号蓄積管の書き込みビーム電流は、その制御格子 G_1 の遮断電位を基準にして G_1 の電位の 2 乗に比例する。したがって IPAS 処理もしくは蓄積管への書き込みの線形性を保証するには、ISAP 処理後の映像信号を書き込み前に平方根特性をもつガンマ補正器によって歪ませておく必要がある。この補正を行うために、各 ISAP 処理された映像信号を 3 フィールド間保持しておき、最初の 1 フィールド間でこの映像信号の最低値を検出し、

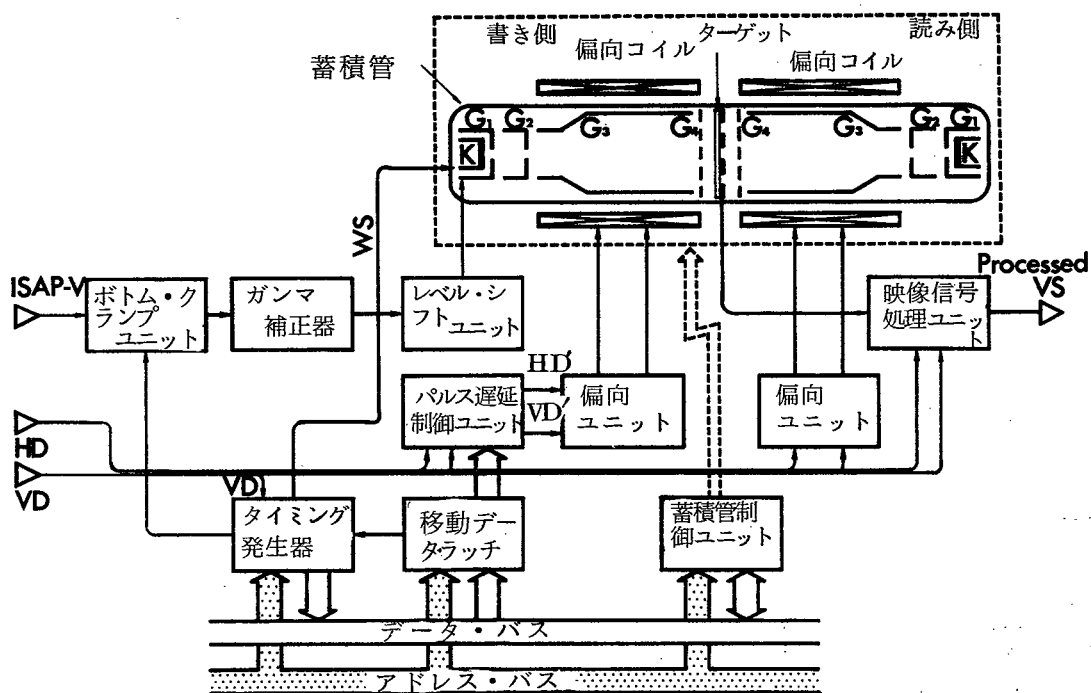


図 5・4 IPAS 処理部の構成

この値を利用して続く2フィールド間、この映像信号の最低値を0 Voltにクランプする。以上の映像信号の操作は、ボトム・クランプ・ユニットで行うが、最低値検出、クランプの2つの操作の制御はタイミング発生器が行う。ここで最低値検出を1フレーム間より短い1フィールド間で行なったのは、複雑な被処理像パターンのISAP処理信号の最低値は、ぼけが4TVライン以上に渡たるような場合、偶フィールドと奇フィールドで同じであったからである。

最低値がクランプされた映像信号は、ガンマ補正された後、最低値が蓄積管の書き側G1の遮断電位に一致するようにレベルシフトされて、このG1に供給されている。このように処理された映像信号で変調されたビームによってターゲットを、後の2フィールド間つまり1フレーム間走査すれば、これに応じた電荷パターンが絶縁物表面上に書き込まれる。この書き込みは、書き側陰極を書き込み制御信号(W S)によって高速高電圧開閉する⁽⁴⁾ことによって実行される。この書き込み制御信号は、タイミング発生器で生成されるが、画像の移動データを認知してから1フィールドの最低値検出期間を経過した後、1フレーム間活性状態となる。1フレームの書き込みが終了すると、タイミング発生器は、デジタル制御部に次のデータ要求(実際には割り込みをかける)を行い、一巡処理を順次実行していくことになる。

ところで、式(4・16a)のIPAS処理においては、ISAP処理した信号を順次、水平、垂直方向に平行移動して重ね合わす。信号蓄積管でこの移動を実現するには、①水平、垂直偏向コイルにそれぞれ移動量に応じた直流電流を流すバイアス制御方式と、②水平、垂直の駆動パルスの時間位相を映像信号に対して、それぞれ移動量に応じて変化させる位相制御方式、の2通りの方法が考えられるが、5・4・2で述べるように、処理像が被るシェーディングおよび処理系の空間不変性の観点から検討すると、後者の方式が勝れている。したがって本処理装置では、画像の移動は位相制御方式で実現する。デジタル制御部から転送される水平、垂直移動データはラッチに取り込み、水平方向に対しては $\Delta 1/2$ に対応する時間遅れで、垂直方向に対しては垂直駆動信号を移動データ分だけ計数して、それぞれ位相制御されたHD', VD'を生成している。この駆動パルスの位相制御は、パルス遅延制御ユニットで行なわれ、HD', V

D' が偏向ユニットを駆動することになる。

2 電子銃型信号蓄積管の初期設定は、第 3 章で述べた両面消去操作と準備操作をこの順で実行することによって逐行される。できるだけ書き込み量を多くとるため、 $E_p = 30 \sim 40 \text{ V}$ として準備操作を行っている。“ERASE”なる命令をターミナル・コンソールから入力すると、制御プログラムと蓄積管制御ユニットが、第 3 章の操作手順に従って各電極電位を切り換え、上述の初期設定をした後書き込み可能状態で停止する。

5・4 処理装置の電気的特性

処理装置の電気的諸特性は、とくにアナログ処理装置の場合、処理精度に重大な影響を及ぼす。第 2 章の処理原理においては、処理装置は、線形かつ空間不変で、さらに修正重みが 1 つだけ非零の場合には、処理装置の P S F をデルタ関数であると仮定した。標準テレビ方式では、映像信号の帯域が 4.5 MHz 以下に制限されているから、後者の仮定は、処理装置の遮断周波数が 4.5 MHz 以上あり、また蓄積管での分解能が 500 TV ライン以上あれば、満されることになる。以下、重要な構成部について上述の電気的特性を述べる。

5・4・1 I S A P 処理部

まず、画像はテレビ・カメラによって映像信号に変えられるが、本装置で用いたテレビカメラは、ビジコン (8541) が 500 TV ラインの分解能、映像増幅器の遮断周波数が 15 MHz 、偏向精度が周辺部で 1 TV ラインなる性能を有するものである。また映像部非線形歪みは、内臓の γ 補正により 1 % 程度に調節されている。

つぎに I S A P 処理部においては、遅延線の遅延時間誤差、周波数特性、および乗算器の周波数特性、乗算精度⁽²⁾が問題となる。水平遅延線 (D L - Ⅲ) については、各遅延線間に緩衝増幅器を挿入し、挿入損失の補償と映像信号の反射による線形歪み除去を行った。その結果、タップ間遅延時間を 0.185μ 秒 ($\Delta 1$ に対応) として 7 段接続で挿入損失 0.1 dB 、周波数帯域は 8 MHz (-0.9 dB) となった。垂直遅延線 (U G L - 103) については、挿入損

失 0.1 dB 以内、周波数帯域は 5.5 MHz (- 0.5 dB) であった。乗算器 (CA 3091 D) については、乗算精度 1 % 以下、周波数帯域 5 MHz (- 3 dB) であった。

ところで、高速度乗算器の動特性のなかで、フィード・スルー : FS⁽²⁹⁾ なる量が重要となる。一般に入力信号が高周波になると、重み付け (乗数) を 0 としても、出力に信号が漏れ出す。このとき FS は、出力振幅 / 入力振幅の比で与えられる。上の乗算器においては、- 40 dB (5 MHz) であった。この FS および乗算精度を考えると、修正重み自体の精度を 1 % 程度としてよく、デジタル量としては、8 ビット・バイナリー形式とすれば十分である。

5・4・2 IPAS 処理部

4・2 においては、信号蓄積管への書き込み静特性を $\gamma = 1$ と仮定した。図 5・5 実線は信号蓄積管の書き側 G1 に印加される電圧対第 4 グリッド電流を実測したものである。この静特性をみると、ビーム電流は、入力電圧の 2 乗に比例することがわかる。したがってガンマ補正としては平方根特性をもてばよい。図 5・5 破線は、ガンマ補正器の静特性である。平方根特性が得られる範囲としては、最大入力 5 V で 30 dB となっている。さらにガンマ補正器の帯域は、5 MHz (入力 30 mV, - 3 dB) を保証している。以上で、IPAS 処理部の線形性が保証されたことになるが、空間不変性については以下の考察からこれが完全に保証されていることがわかる。

比較のために、画像移動の方法としてバイアス制御方式と、実際に採用した位相制御方式を考える。テレビカメラ等の撮像装置の偏向系は十分調整されているとしよう。この場合には、1 水平期間において時間軸は画像の x 軸とみなすことができる (垂直方向に対しても同様であるが、説明のためには水平方向がわかりやすい)。まず、バイアス制御方式においては、画像の移動は偏向コイルに流れる直流電流を制御するから、値の異なるバイアスのもとでは、入力画像の x 座標は、出力画像 (蓄積管ターゲット絶縁物表面上の画像) の x 座標に、図 5・6 (a) 実線 I, II によって写像されることになる (偏向系は線形走査からずれている)。この場合、I, II の曲線は縦方向の平行移動によって互に

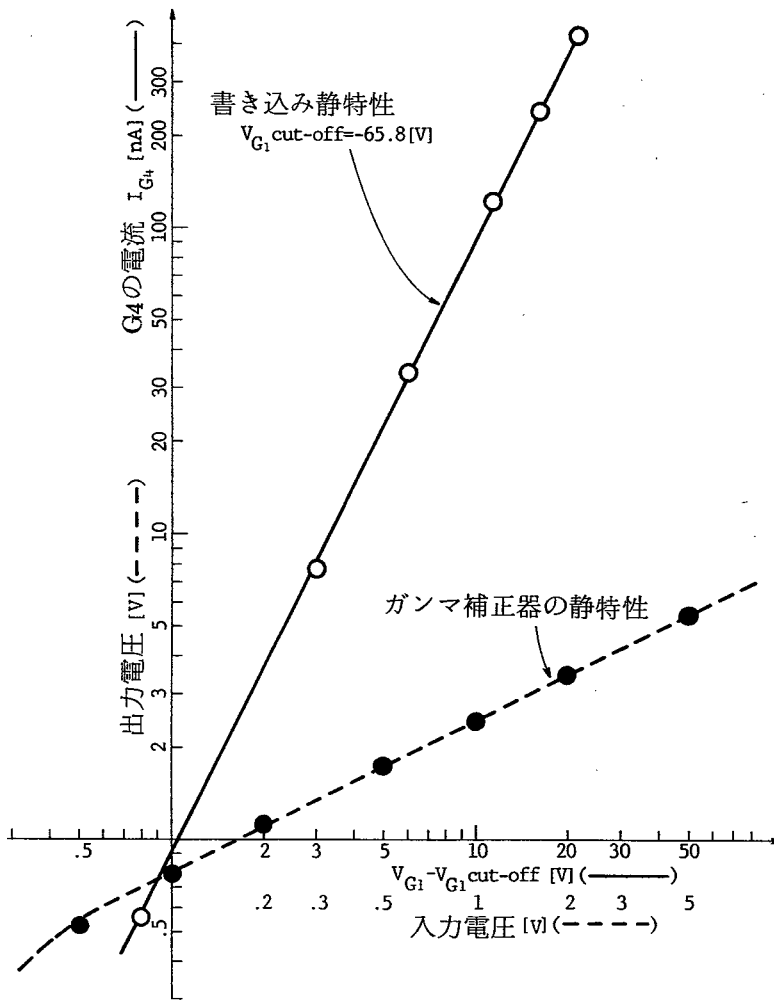


図 5・5 信号蓄積管の書き込み静特性とその補正

重なり合うが、このバイアスのもとで画像を重ねると、出力画像の x_1 , x_2 なる場所には、それぞれ入力画像の x_1^{I} , x_1^{II} および x_2^{I} , x_2^{II} の点の明るさが重ねられることになる。図より明らかに $x_1^{\text{II}} - x_1^{\text{I}} \neq x_2^{\text{II}} - x_2^{\text{I}}$ となる。すなわち画像は、平行移動ではなく、それぞれの空間に依存していることになり、処理系の空間不変性が満たされない。

これに対し位相制御方式では、水平駆動パルスの時間位相を映像信号に対し

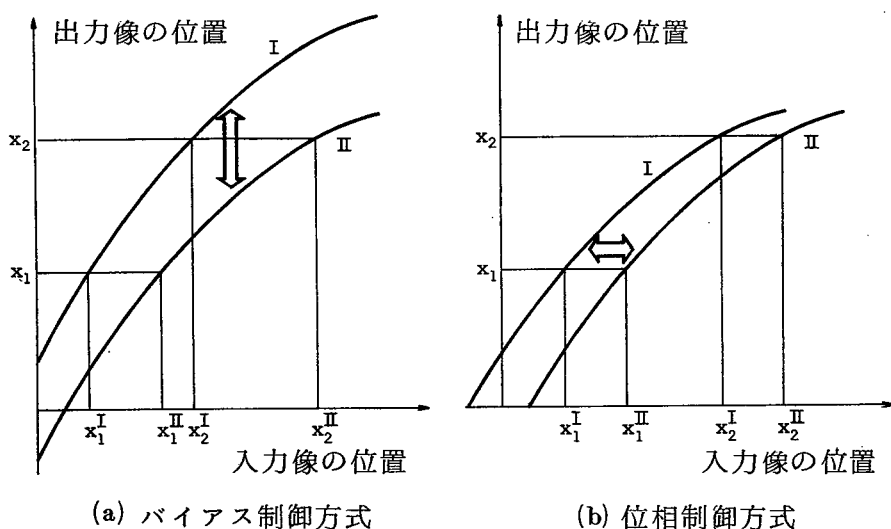


図 5・6 バイアス制御方式と位相制御方式の比較

て変化させるから、いま映像信号を固定して考えると、図 5・6 (b) のように横方向に平行移動した曲線 I, II によって入力画像の x 座標が出力画像の x 座標に写像されていることになる。この方式で画像移動を行い、重ね合わせた場合には、出力画像の x_1, x_2 なる場所では、それぞれ入力画像の x_1^I, x_1^{II} および x_2^I, x_2^{II} の点の明るさが重ねられる。図から明らかに $x_1^{II} - x_1^I = x_2^{II} - x_2^I$ が成立している。これは処理系の空間不変性が成立していることに対応する。ただし、処理像を実際に読み出した場合には、水平方向に歪んでいることになる。

画像移動に関連して、処理像に生じるシェーディングの問題がある。バイアス制御方式では、偏向中心を変えていることになり、蓄積管のレンズ系が近軸近似からずれることになる。このような場合には、シェーディングが増大し、処理像の画質を劣化させる。一方位相制御方式では、走査はターゲット面の固定された領域で行われているから、このような問題は生じない。

なお、信号蓄積管の書き側各電極電位は 1 % 以内に安定化し、ビーム電流によって生ずる書き込み画像の大小変動を抑えている。

5・5 む す び

本章では，テレビ方式を用いた I S A P－I P A S 併用法による処理システムの概要を述べた。マイクロコンピュータの採用によって，本処理システムでは簡単な操作で会話的に修正処理を行うことが可能となった。

アナログ処理装置の欠点はその精度であるが，各構成部における処理精度について検討し，1 %以内の精度で処理可能なことを示した。

第 6 章 修正関数の設計 (44, (45)

6・1 ま え が き

第 2 章において、線形かつ空間不変な結像系によるぼけ像を修正する方法として、離散たたみ込み法を導出した。この離散たたみ込みの信号蓄積管を用いたテレビ方式による構成法を主に第 4, 5 章で検討した。

さて実際に像修正処理を実行するには、結像系の P S F に応じて修正関数を決定する必要がある。Frieden は 1 次元ぼけの修正の場合に、この離散たたみ込み法における修正関数がある原理に基づいて決定し、インバース・フィルタ法より少ない重み点数で同程度の修正ができることを示した。しかしこの方法は、低い空間周波数領域での復元特性を保証することができないという欠点を有していた。本章では、この点を改良した方法を提案し、また 1 次元ぼけを対象とした Frieden の方法を回転対称ぼけ修正に拡張する。まず 6・2 において設計原理について述べ、つぎに 6・3 においてこの方法による修正関数の設計例を述べ、この有効性を示す。なお、設計例におけるぼけは、焦点外れによるものを想定した。

6・2 設 計 原 理

式 (2・12) の離散たたみ込みによる像修正は、有限個の修正重みによって行われる。この場合修正重みの設計は、第 2 章で述べたように、結像系—処理系全体の P S F: $h_{net}(x, y)$ が、修正重みの有限個数のもとで、“もっともデルタ関数に近くなる”ように行う。

ところで結像系のぼけ、つまり P S F: $h(x, y)$ は、回転対称かもしくは回転対称関数に近似できる場合が多いから、以下では $h(x, y)$ を回転対称とし、

$$h(r) = h(\sqrt{x^2 + y^2}) \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (6 \cdot 1)$$

とする。できるだけ少ない個数の修正重みで、このような回転対称的ぼけを修正するには、対称面を多く含む格子点に修正重みを配置するのが得策である⁽⁴⁵⁾。かかる事情から、図 6・1 に示す三角格子点に修正重みを配置することにする。

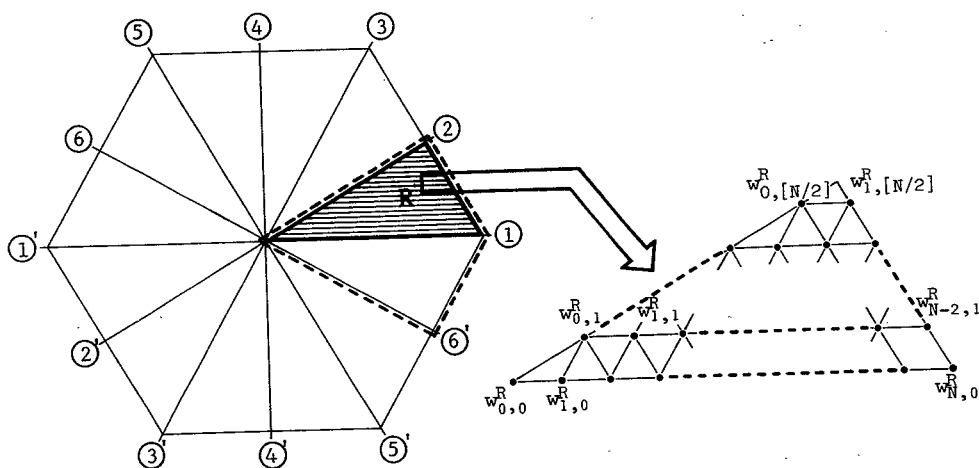


図 6・1 三角格子点と修正重みの計算すべき領域

この場合対称面は図中①－①'～⑥－⑥' と計 6 つあるから，全修正重みを設計する必要はなく，対称性から図 6・1 の実線で囲んだ領域 R に含まれる修正重みを設計すればよい。

さて図 6・1 のように，R 内の修正重みに添字をつけると，R 内にある修正重みだけの寄与による修正関数 $w_R(x, y)$ は

$$w_R(x, y) = \sum_{j=0}^{[N/2]} \sum_{i=0}^{N-2j} w_{i,j}^R \delta\left(x - \left(i + j \frac{3}{2}\right) \Delta l, y - j \frac{\sqrt{3}}{2} \Delta l\right) \quad (6 \cdot 2)$$

となる。ここで $[\cdot]$ はガウス記号， Δl は格子間隔である。R の境界つまり $w_{i,0}^R$ ， $w_{0,j}^R$ ($i \geq 0$ ， $j \geq 0$) と $w_{0,0}^R$ は，それぞれ実際の修正重みの $1/2$ ， $1/12$ とする。この $w_R(x, y)$ をまず，x 軸に対称に移動し， $w_R(x, y)$ に加えれば，図 6・1 の破線で示す領域に拡張できる。

$$w'(x, y) = \sum_{m=0}^1 w_R(x, (-1)^m y) \quad (6 \cdot 3)$$

さらに全領域拡張するには、上式を 60° ずつ回転して和をとればよい。したがって、修正関数 $w(x, y)$ は

$$\begin{aligned}
 w(x, y) &= \sum_{n=0}^5 w'(x \cos(n\frac{\pi}{3}) + y \sin(n\frac{\pi}{3}), -x \sin(n\frac{\pi}{3}) \\
 &\quad + y \cos(n\frac{\pi}{3})) = \sum_{j=0}^{[N/2]} \sum_{i=0}^{N-2j} w_{i,j}^R \left[\sum_{n=0}^5 \sum_{m=0}^1 \delta(x - \left\{ \left(i + \frac{3}{2}j\right) \cos(n\frac{\pi}{3}) + j \frac{\sqrt{3}}{2} (-1)^m \sin(n\frac{\pi}{3}) \right\} \Delta 1, y - \left\{ -\left(i + \frac{3}{2}j\right) \sin(n\frac{\pi}{3}) + j \frac{\sqrt{3}}{2} (-1)^m \cos(n\frac{\pi}{3}) \right\} \Delta 1) \right] \\
 &\quad (6 \cdot 4)
 \end{aligned}$$

で与えられることになる。図 6・1 を参照すれば、全修正重みの個数は、 $3 \times N(N+1) + 1$ に対し、実際に設計すべき重みの個数は

$$\sum_{j=0}^{[N/2]} (N-2j+1) = ([N/2] + 1)(N - [N/2] + 1)$$

で与えられることがわかる。したがって、結像系—処理系全体の PSF は、式 (6・4) を式 (2・10) に代入すれば、

$$\begin{aligned}
 h(r, \theta) &= h_{\text{net}}(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(\alpha, \beta) w(x - \alpha, y - \beta) d\alpha d\beta \\
 &= \sum_{j=0}^{[N/2]} \sum_{i=0}^{N-2j} w_{i,j}^R \left[\sum_{n=0}^5 \sum_{m=0}^1 h\left(x - \left\{ \left(i + \frac{3}{2}j\right) \cos(n\frac{\pi}{3}) + j \frac{\sqrt{3}}{2} (-1)^m \sin(n\frac{\pi}{3}) \right\} \Delta 1, y - \left\{ -\left(i + \frac{3}{2}j\right) \sin(n\frac{\pi}{3}) + j \frac{\sqrt{3}}{2} (-1)^m \cos(n\frac{\pi}{3}) \right\} \Delta 1) \right] \\
 &\quad (6 \cdot 5a)
 \end{aligned}$$

$$\text{ただし} \quad x = r \cos \theta, \quad y = r \sin \theta \quad (6 \cdot 5b)$$

と表現されることになる。

以上のように表現される $h_{\text{net}}(r, \theta)$ をできるだけデルタ関数に近似するように w_{ij}^R を決めればよいわけであるが、その決定はつぎのようにする。一般に $h(r)$ は、図 6・2 の実線のような広がったものとなっている。当然、修正処理した場合には、像はより鮮明なものとなっているのであるから、 $h_{\text{net}}(r, \theta)$ は $h(r)$ よりも狭い幅を有する図 6・2 破線のようにになっていることが予想できる。そこでまず最初に、適当な r_0 を選び、図 6・2 のように h_{net} が最初に 0 となる半径を与えることにする。 h_{net} は $\theta = 30^\circ, 60^\circ$ に対称面をもっているから、この拘束としてつぎの条件を課すことにする。

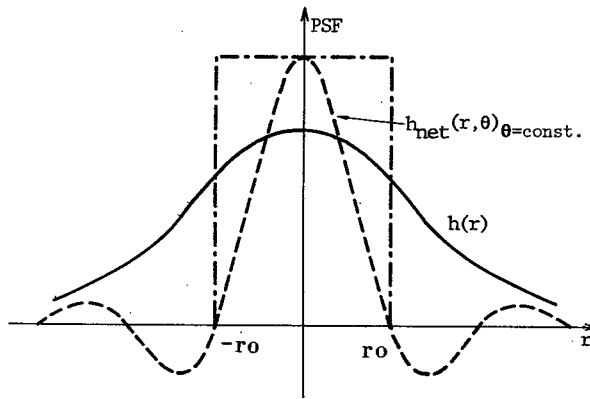


図 6・2 結像系の PSF と結像系—処理系の PSF

$$h_{\text{net}}(r_0, 0) = h_{\text{net}}(r_0, \pi/6) = 0 \quad (6 \cdot 7)$$

像修正処理を実行した場合、 h_{net} の $r \leq r_0$ の領域によって鮮明化されると考えられるから、この領域が復元像の有用な情報を伝達する立役者であり、 r_0 は解像度を決定するファクタであると考えられる。一方、 $r > r_0$ の領域には、振動部分が生じ、この振動（サイド・ローブと呼ばれる）が復元像に偽像を生ずる原因となる。そこで、Friedenはこのサイド・ローブの絶対値の最大を最小化する方法をとった。しかし、この方法では、復元像の低い空間周波数領域での特性が悪く、極端な場合原像に対しコントラストが逆転する。そこでこ

では、 $w_{i,j}^R$ の決定に際し、以下に述べる拘束条件を課し、このような事態の発生を防ぐことにする。

先ず原像として、図 6・2 一点鎖線のような、一様な輝度分布をもつ半径 r_0 の円形スポットを考え、これが結像系でぼけた後に修正処理されたとき、もとの一様輝度と同じ強さの最大輝度をもつことを要求する。最大輝度は、 $h_{\text{net}}(r, \theta)$ と原像のたたみ込みの最大値となるから、この要求は、

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} h_{\text{net}}(r, \theta) r dr d\theta = 1 \quad (6 \cdot 8)$$

なる拘束条件となる。一方、修正像の低い周波数領域での輝度分布は、原像の同様の輝度分布をできるだけ忠実に再生したものである。この要求はつぎの条件を課することになる。

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} h_{\text{net}}(r, \theta) r dr d\theta = C \quad (6 \cdot 9)$$

ここで、 C は以下のようにして決定される定数である。 h_{net} のフーリエ変換を考えれば、 C は 0 周波数での $\text{OTF} : H_{\text{net}}(\rho, \varphi)$ の値であり、 (ρ, φ) は空間周波数領域での極座標、もし原像と修正像の空間周波数 0 の値が同じになることを要求すれば、 C は 1 でなければならない。しかし、像の直流成分はまったく情報を荷っていないし、また第 4 章で述べたように修正像の直流成分つまりバックグラウンドレベルはターゲット表面上ではかなり上昇しているから、 $C = 1$ にとらなければならない根拠はない。そこで C は、処理後の周波数特性、つまり結像系全体の OTF が比較的低い周波数にわたって良好な特性をもつように正の範囲で変化させる拘束パラメータと考えることにする。

さて、2 次元ばけ修正の場合、サイド・ローブの絶対値の最大を最小にする。いわゆるミニ・マックス法は、この方法の基礎定理（1 次元の交代定理）⁽²⁹⁾ の成立が保証されないため、適用できない。そこでここではサイド・ローブの 2 乗積分を最小にする方法を採用する。

$$\left\{ \int_0^{2\pi} \int_{r_0}^{\infty} h_{\text{net}}^2(r, \theta) r dr d\theta \right\} \xrightarrow{w_{i,j}^R} \text{最小化} \quad (6 \cdot 10)$$

式(6・7)～(6・9)の拘束条件のもとに上式を最小化する問題は、ラグランジュの未定乗数法を用いて次式のように定式化できる。

$$\begin{aligned} \delta \left[\int_0^{2\pi} \int_{r_0}^{\infty} h_{\text{net}}^2(r, \theta) r dr d\theta - \lambda_0 h_{\text{net}}(r_0, 0) \right. \\ \left. - \lambda_1 h_{\text{net}}(r_0, \pi/6) - \lambda_2 \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} h_{\text{net}}(r, \theta) r dr d\theta - 1 \right\} \right. \\ \left. - \lambda_3 \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} h_{\text{net}}(r, \theta) r dr d\theta - C \right\} \right] = 0 \quad (6 \cdot 11) \end{aligned}$$

ここで、 δ は変分記号で、 $\lambda_0 \sim \lambda_3$ はラグランジュ乗数、変分を実行する変数は $w_{i,j}^R$ および $\lambda_0 \sim \lambda_3$ である。式(6・5b)を式(6・11)に代入して変分を実行すると、

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^{[N/2]} \sum_{i=0}^{N-2j} w_{i,j}^R \int_0^{2\pi} \int_{r_0}^{\infty} f_{u,v}(r, \theta) f_{i,j}(r, \theta) r dr d\theta \\ - \lambda_0 f_{u,v}(r_0, 0) - \lambda_1 f_{u,v}(r_0, \pi/6) \\ - \lambda_2 \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} f_{u,v}(r, \theta) r dr d\theta - \lambda_3 \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} f_{u,v}(r, \theta) r dr d\theta \\ = 0 \quad (6 \cdot 12a) \end{aligned}$$

ただし、 $u = 0, 1, \dots, N-2$, $v = 0, 1, \dots, [N/2]$,

$$\begin{aligned} f_{u,v}(r, \theta) = \sum_{n=0}^5 \sum_{m=0}^1 h(r \cos \theta - \left\{ (u + \frac{3}{2}v) \cos(n \frac{\pi}{3}) + \right. \\ \left. v \frac{\sqrt{3}}{2} (-1)^m \sin(n \frac{\pi}{3}) \right\} \times \Delta l, r \sin \theta - \left\{ -(u + \frac{3}{2}v) \sin(n \frac{\pi}{3}) + \right. \end{aligned}$$

$$v \frac{\sqrt{3}}{2} (-1)^m \cos \left(n \frac{\pi}{3} \right) \} \Delta 1) \quad (6 \cdot 12b)$$

と式(6・7)－(6・9)の $[(\lfloor N/2 \rfloor + 1)(N - \lfloor N/2 \rfloor + 1) + 4]$ 元1次連立方程式が得られる。この連立方程式は、電子計算機を用いて容易に解くことができる。 $\Delta 1$, r_0 , C が外部パラメータに含まれている。これらの外部パラメータは、適当に設定し、計算後の $h_{\text{net}}(r, \theta)$, $H_{\text{net}}(\rho, \varphi)$ の勝れたものを選ぶことにする。

6・3 修正重みの設計例

修正重み設計法の応用例として、焦点外れ像の修正処理を考えよう。理論解析によれば、焦点外れの度合いが非常に大きい場合には幾何光学が適用できて、そのPSFは回転対称の場合、

$$h(r) \begin{cases} = 1, & r < R \\ = 0, & \text{その他の領域} \end{cases} \quad (6 \cdot 13)$$

の円柱状ぼけになることが知られているが⁽³⁰⁾、実際には入力テレビカメラのビーム半径、IPAS処理における信号蓄積管の書き込みビーム半径などの要因のため、焦点外れに、遮断周波数のある程度高い低域通過特性を有するPSFがたたみ込まれ、その結果、式(6・13)の境界部が鈍ると考えられる。したがって、回転対称な焦点外れに対するPSFを次式で近似することにする。

$$h(r) = B \exp \{ -(r/\sigma)^{10} \} \quad (6 \cdot 14)$$

ここで、 B は任意定数、 σ は焦点外れの度合いを示す定数で、ほぼ式(6・13)の R と考えてよい。式(6・14)を図6・3(a)破線で示す。

さて、このような結像系のPSFに対して、式(6・7)－(6・9)および式(6・12)の連立方程式を解くわけである。全体の修正重みの個数が多ければ多い程、修正の度合いがよくなるが、反面修正重み自体の精度が要求されることになる。前章で述べたように装置でのこの精度は1%であるから、 $N=4$

として図4・6(a)のような配置とした。さらに3つの外部パラメータ (r_0 , Δl , C) を指定する必要がある。このうち C は、修正前後で低域周波数のコ

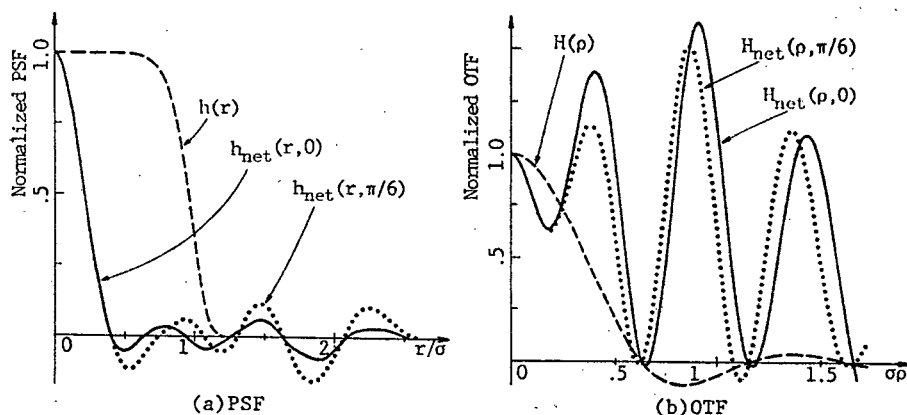


図6・3 結像系—処理系全体のPSFとOTF

$$C = 1, \Delta l / \sigma = 0.43 \quad r_0 / \sigma = 0.4, N = 4$$

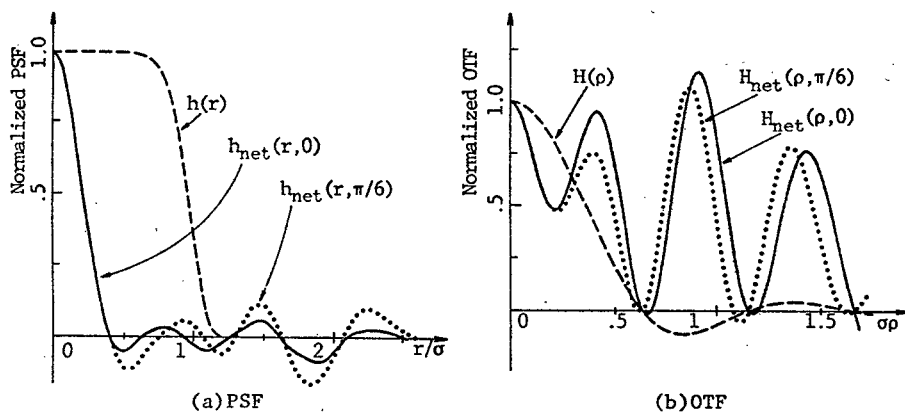


図6・4 結像系—処理系のPSFとOTF

$$C = 1.5, \Delta l / \sigma = 0.43, r_0 / \sigma = 0.4, N = 4$$

ントラストをほぼ等しく保つものと考えてとりあえず1とする。そして $\Delta l / \sigma$ を 0.3 から 0.5 まで 0.01 間隔で変化させ、各 $\Delta l / \sigma$ に対してそれぞれ

r_0/σ を 0.3 から 0.7 まで 0.05 間隔に変化させて上記の連立方程式を解いた。それぞれの場合の $h_{\text{net}}(r, \theta)$ を求め、この断面形状が勝れていると思われるものを選定した。このとき、パラメータは、 $C=1$, $\Delta l/\sigma=0.4$ $h_{\text{net}}(r, 0)$, $h_{\text{net}}(r, \pi/6)$ は図 6・3(a) のようになる。ところで、上記の場合の $H_{\text{net}}(\rho, \phi)$ は、 $\phi=0, \pi/6$ に対して図 6・3(b) のようになり、低域周波数領域での利得が、高域に比較して低いことに気

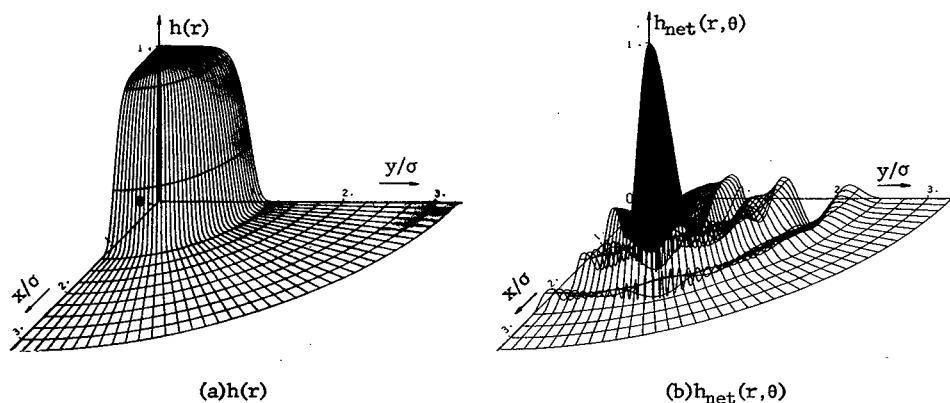


図 6・5 PSF の改善の模様 $C=1.5$, $\Delta l/\sigma=.43$, $r_0/\sigma=.4$, $N=4$

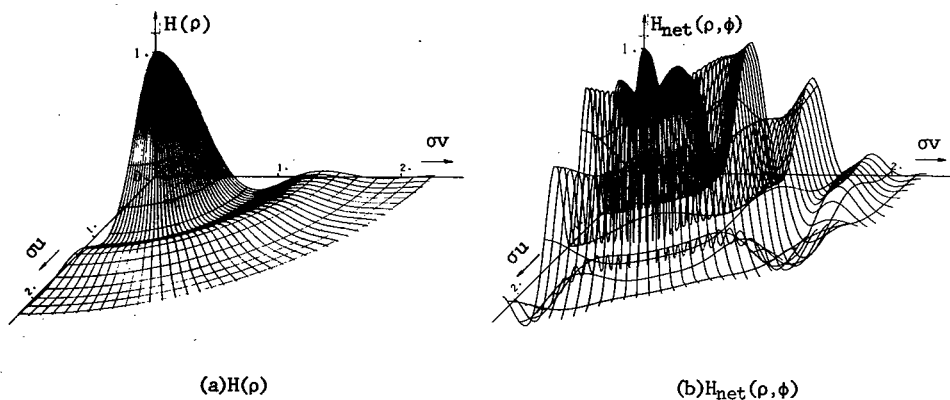


図 6・6 OTF の改善の模様 $C=1.5$, $\Delta l/\sigma=.43$, $r_0/\sigma=.4$, $N=4$

付く。さきにも述べたように C は低域周波数領域での利得を調節できるパラメータであるから、 C を変えることにより、高域特性はそのまま、低域特性を良くすることができる。このようにして求めた結果、 $C = 1.5$, $\Delta l / \sigma = 0.43$, $r_0 / \sigma = 0.4$ に対して、図 6・4 (a), (b) に示すような特性が得られた。またこのときの修正重みの値は図 4・6 (a) となる。

図 6・3 , 6・4 からわかるように、 PSF は両者大差ないが、 OTF は後者が低周波領域で勝れている。 PSF は半値幅にして 4 倍の改善がなされており、 OTF についていえば、コントラスト反転が第 3 交番点まで正されている。この場合の $h_{net}(r, \theta)$ と $H_{net}(\rho, \varphi)$ をそれぞれ図 6・5 と図 6・6 に掲げるが、対称性についてもほぼ満足のいく結果となっている。

6・4 むすび

本章では、回転対称的ぼけに対する修正重みの設計法を述べた。インバース・フィルタ法より少ない重み点数で同程度の修正が可能である、Frieden の設計法を 2 次元に拡張すると同時に、低域周波数領域の特性を改善する方法を提案した。つぎに、この方法を用いて回転対称的焦点外れに対する修正重みを求め、 PSF および OTF からみて、この方法の有効性を示すとともに、次章の実際の処理のための準備とした。

第7章 修正処理例⁽⁴⁴⁾

7・1 ま え が き

第5章で概略を述べた処理装置の最大の特長は、ISAP-IPAS併用方式の採用にある。さらにこの併用方式は、修正重み再分割を適用することにより高度な修正処理が実現できることを第4章で示した。

本章では7・2において、以上の事柄を、実際の焦点外れ像を処理して確めるとともに併せて本修正処理装置の有能性を示す。この場合、修正関数は前章で設計したものをを用いる。また7・3においては、簡単な処理の範ちゅうに属するが、特徴抽出の一例として、胸部写真の微分処理を行い、患部強調をした結果について示す。

7・2 修正処理結果

ここでは、回転対称焦点外れ像を処理装置を用いて修正した結果について述べる。さて焦点外れ像は、テレビカメラのレンズ系を、絞りを全開の状態にしたままで焦点外れとし、撮像することによって得ることができる。したがって、2TVライン幅を $\sqrt{3} \Delta 1/2$ に対応（本装置では線順次方式を前提にしているから、入力像は1フィールド内では1TVラインおきに走査する）させてあげると修正関数のマッチングをとるためには、ビジコンの光電面を移動させねばよい。

このマッチングを確認し、処理系の特性を評価するために、放射型図形のぼけ像を、図4・6(b)の分割重みを用いたISAP-IPAS併用法によって修正処理した。図7・1(a)に上記のマッチングが成立している放射型図形ぼけ像を、(b)にその修正処理像を示す。ぼけ像に観察される2つのコントラスト反転が、処理像においてはもとにもどっていることがわかる。またぼけ像の高周波成分が処理像で強調されていることがわかる。この事実は、前章の設計例で述べた図6・6(b)の周波数応答とよく合致している。したがって処理装置は、理論通りの処理操作を実行していることになる。

つぎに、併用方式における重み再分割の効果を確めた。ぼけ像としては、図

7・2(a)に示すような、文字パターンから構成される簡単なものを選んだ。図7・2(b)は、重み再分割を実行しない図4・6(a)の修正重みを、順次2ラインづつ上の方からISAP処理に適用し、併用処理した修正像である。図7・2(c)は重み再分割－併用法による修正像である。この結果は、第4章で予想した通

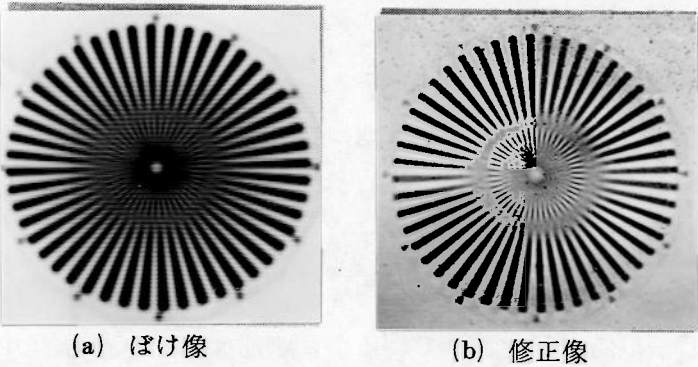


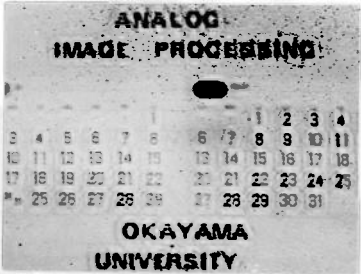
図 7・1 スポーク パターンの修正処理



(a) ぼけ像



(b) ISAP-IPAS 併用法による修正像



(c) 修正重み再分割－併用法による修正像

図 7・2 ISAP－IPAS 併用法と修正重み再分割－併用法の比較

り，修正像のコントラストが修正重み再分割併用法において大きく改善されていることを示している。なお，IPAS単独方式においては，信号蓄積管ターゲット絶縁物に書き込まれるバックグラウンドが大きいため，修正像にコントラストがつかず，転写効果を用いても処理像が観察できなかった。

図7・3および図7・4は以下の実用的な目的で修正処理した結果である。まず一般に画像は中間調を多く含んでいるから，修正した場合中間調の再現性は処理像の画質を大きく左右する。図7・3は，このような原像に中間調を含むぼけ像を修正した例である。つぎに電子顕微鏡像の修正処理の場合を想定すると，原像自体は細かな構造を有していて，しかも比較的周期的な様相を呈していると考えられる。図7・4は，このような場合を想定した，細いパターンのぼけ像の修正結果である。修正関数の空間的な拡がりが制限されているため，これらの結果には若干の偽像が含まれているが，処理は満足できるものである。またこれらの結果は文献(9)のシュミレーション結果に比肩できる。

以上の処理像には粒状性雑音が目立つが，これは信号蓄積管のターゲット絶縁物上の塵芥や傷に起因するものである。この雑音を無視した場合，処理像の雑音は目立たないといえる。修正重みの設計においては，撮像系－処理系で発生するランダム雑音について考察しなかったが，以上の処理においては，相異なるフレームの信号をISAP処理しながら，160回順次IPAS法における重ね合わせを実行しているため，ランダム雑音は平滑化され，目立たなくなっ



(a) ぼけ像



(b) 修正像

図7・3 中間調を含む像の修正

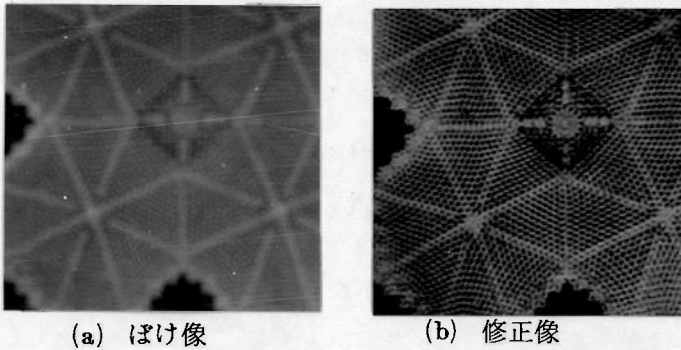


図 7・4 微細構造を含む像の修正

たといえる。一巡処理つまり処理像が得られる最小時間の処理操作は、図 4・6(b)からわかるように 8 回の I P A S 法の書き込みを必要とするから、上述の修正像を得るためには 20 回の一巡処理を繰り返したことになる。これに要する時間は、式 (5・1) より 8 秒ということになる。

ここでの実験においては、ぼけの大きさを修正関数にマッチングさせた。しかし実際には、ぼけの形状がわかっていたとしても、その程度がわからない場合が多い。このような場合には、たとえばテレビカメラにズームレンズを装備し、入力ぼけ像のスケールを変えることによって、ぼけを修正関数にマッチングさせることができる。またこのマッチングの問題はつぎのようなソフトウェアでも解決できる。種々の $\Delta 1 / \sigma$ の値に対して前もって第 6 章で述べた手順で修正関数を計算しておき、もっとも画像がよく修正できる修正関数を用いる。この方式は、いわば処理装置と人間が会話的に操作を実行し、もっとも良い結果をわれわれが手にするといった、マン・マシン方式をとっていることになる。

7・3 特徴抽出処理例

前節の処理例は、焦点外れ像等の複雑な処理つまり修正のために用いる重みの個数が比較的多数必要な場合のものであった。本処理装置ではまた、処理自体が線形かつ空間不変であれば、ある近似のもとにそれを実現することができる。ここでは、ラプラシアン操作による特徴抽出例を挙げておく。ラプラシアン操作とは、像 $f(x, y)$ に対し、 $\{ \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 \} f(x, y)$ を処理像

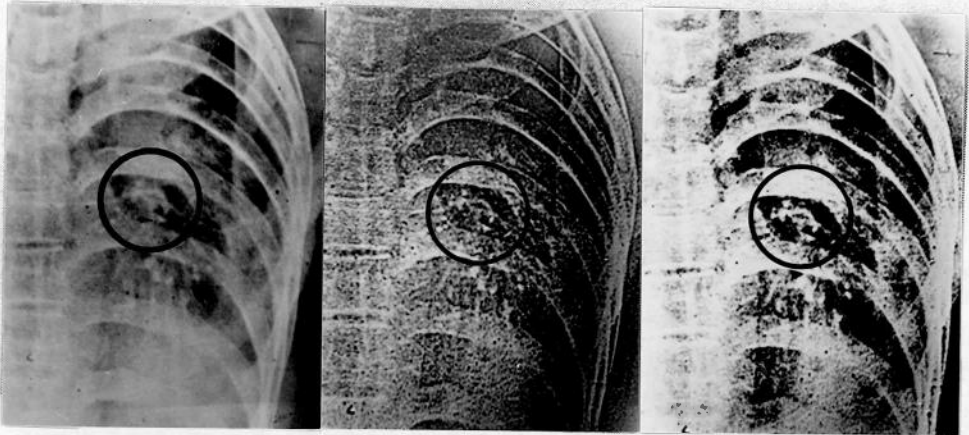
$$\begin{array}{ccccc}
 & -1/6 & & -1/6 & \\
 & \circ & & \circ & \\
 & & \circ & & \\
 -1/6 & & \circ & 1 & \circ \\
 & & \circ & & \\
 & -1/6 & & -1/6 &
 \end{array}$$

(a) 重み

$$\begin{array}{ccccc}
 & -1/6 & & -1/6 & \\
 & \circ & & \circ & \\
 -1/12 & & \circ & 1/2 & \circ \\
 & & \circ & & \\
 -1/12 & & \circ & 1/2 & \circ \\
 & & \circ & & \\
 & -1/6 & & -1/6 &
 \end{array}$$

(b) 再分割重み

図 7・5 ラプラシアン操作のための重み (3 角格子状に重みを配し, 格子間隔は $\Delta 1$ である。)



(a) 原 像

(b) ラプラシアン処理像

(c) (a)+(b)

図 7・6 胸部 X 線写真の特徴抽出例

の形で出力することをいう。この操作は2次元的に $f(x, y)$ の変化の急峻な部分を抽出(エッジ抽出)するために用いられる。また高域強調にもなっているため、画像の中に含まれる小さな振幅の細かい構造を明確化するためにも用いられる。図7・5(a)にラプラシアン操作を近似する重み列を、また(b)にその再分割した場合を示す。

図7・6(a)は、過去に結核を煩った患者の胸部X線写真である。この写真では気胸が明確に観察されないが、ラプラシアン処理を行った同図(b)ではエッジが抽出され、気胸部の輪郭が浮きでてくる。ラプラシアン処理だけでは、各部の濃淡情報が失われているから、このラプラシアン処理像に原像を若干重ね合わせると、より各部位が区別できるようになる。この処理をしたものが、図7・6(c)である。実線で囲んだ部分が気胸ではっきり区別されていることがわかる。なお以上のラプラシアン処理においては、図7・5(b)の再分割重みによって処理を実行した。

7・4 む す び

本章では、試作処理装置によって実際に修正処理を行った結果について述べた。まず、焦点外れ像を処理し、ほぼ設計した修正関数の修正限界まで実際に処理が実行されていることを示した。つぎに種々の像に対しても実験を行い、処理像の画質が満足しうることを示した。最後に胸部X線写真の特徴抽出例を挙げ、胸部診断に実用化できることを示した。

第8章 結 論

光電変換処理装置については、過去種々の方式による装置が提案され試作されてきたが、せいぜいラプラシアン処理のような簡単な処理しかできなかった。焦点外れのようなばけを除去するような複雑でしかも高度な処理を可能にしたものは、本論文で提案した方式による処理装置が最初である。その理由を列挙すると以下ようになる。

① テレビ方式の採用によりISAP法、IPAS法を合併併用でき、それぞれ単独の欠陥を相補う方式がとれた（この併用方式についての理論解析は4・2で行った）。

② ISAP-IPAS併用法において、再分割された修正重みを用いると、ターゲット絶縁物表面の不必要な電位上昇を大きく抑えることができ、高コントラストの処理像が得られるようになった（修正重み再分割併用法の理論解析は4・3で行った）。

③ 2電子銃型信号蓄積管には転写効果が存在することを見出し、この効果を利用した場合には、信号蓄積管での画像の重ね合わせ可能量を多くとることができ、その分だけ高コントラストの処理像が得られるようになった（転写効果の理論的、実験的検討は第3章で行った）。

④ 2次元回転対称ばけに対する、三角格子点に分布する修正重みの設計法を提案し、比較的少い重みの個数でもかなりの程度修正できるようになった（設計法は第6章、実験は第7章で示した）。

以上のような根本的な方式の採用により高度な処理が可能になったわけであるが、試作処理装置の特長を挙げるとつぎのようになる。

① マイクロコンピュータを用いて処理装置の動作を制御し、簡単な操作で各種ばけの修正を会話的に行えるようにした。

② 処理時間は、第7章の例では8秒であるが、テレビカメラの雑音を十分低下（本論文で用いたテレビカメラのS/N比は30 dB程度であった）さえすることができれば、処理時間はさらに短縮できる。

③ 処理像の画質は，電子計算機で行ったばけ修正シュミレーション像⁽²⁹⁾のそれと比肩しうる。

④ テレビ信号の形で画像が出力される撮像装置を接続することができる。

本論文で挙げた処理例以上に高品質な処理像を得るためには，

① ターゲット絶縁物上の塵芥，傷のない2電子銃型信号蓄積管を用いる。

② 水平方向の映像信号用遅延線をさらに増設し，より偽像の少ない処理像を得る。

ことによって可能である。

謝

辞

本研究の全過程を通じて終始ご指導いただいた岡山大学工学部浜田 博教授，大阪大学工学部裏 克巳教授に衷心より感謝申し上げます。

本研究をまとめるにあたり，種々のご助言を賜りました大阪大学工学部滑川 敏彦教授，大阪大学産業科学研究所角所 収教授に深く感謝申し上げます。

研究途上つねに細部にわたる討論を定期的に行っていただいた長岡総合技術大学松田 甚一助教授に厚くお礼申し上げます。

処理装置試作にあたり，種々の便宜をおとり計らいいただいた松下技術研株式会社西野 勉博士に深謝申し上げます。

また本研究を通じて格別のご支援を賜った大阪大学工学部小山次郎教授，西原 浩助教授，藤岡 弘助教授，大阪大学産業科学研究所松尾 幸人教授の各氏に感謝申し上げます。

最後に，本論文作成にあたりご援助いただいた浜田研究室高丸厚子夫人にお礼申し上げます。

- (1) F.Nagata and I.Ishikawa, "Observation of Wet Biological Materials in a High Voltage Electron Microscope", Japan J.appl. Phys., 11, p1239(1972).
- (2) H.Fujita, T.Tabata, K.Yoshida, N.Sumida and S.Katagiri, "Some Applications of an Ultra-High Voltage Electron Microscope on Materials Science", Japan J.appl. Phys., 11, p1522(1972).
- (3) 裏, 松田, "超高压電顕画像処理研究会について", DENKEN, 6 & 7, p10(1978).
- (4) K.Ura, H.Fujioka and T.Hosokawa, "Stroboscopic Scanning Electron Microscope to Observe Two-Dimensional and Dynamical Potential Distribution of Semiconductor Devices", IEEE Technical Digest of IEDM, 502(1977).
- (5) H.C.Andrews, "Computer Techniques in Image Processing", Academic Press, New York(1970).
- (6) T.S.Huang, "Picture Processing and Digital Processing", Springer-Verlag, Berlin(1975).
- (7) A.Rosenfeld and A.C.Kak, "Digital Picture Processing", Academic Press, New York(1976).
- (8) W.K.Pratt, "Digital Image Processing", John Wiley and Sons, New York(1978).
- (9) P.W.Hawkes, "Computer Processing of Electron Microscope Images", Springer-Verlag, Berlin(1980).
- (10) E.L.O'Neill, "Spatial Filtering in Optics", IRE Trans. Information Theory, IT-2, p56(1959).
- (11) J.Tsujiuchi, "Progress in Optics vol. II", edited by Wolf, North Holland Pub.Co. Amsterdam, p131(1963).
- (12) 辻内, "画像情報の処理(解説)", テレビ誌, 25, 12, p934(1971).
- (13) 辻内, "画像情報処理-相関および像修正を中心として-", 応用物理, 41, 6, p542(1972).
- (14) A.F.Abel, "Analog Signal Processing and Instrumentation",

Cambridge Univ. Press, Cambridge (1980).

- (15) 土屋, 長谷川, “アナログ画像処理 I (講座)”, テレビ誌, 29, 3, p222 (1975).
- (16) 二宮, 長谷川, 和久井, “撮像工学”, テレビジョン学会編, コロナ社 (1975).
- (17) W. Swindell, “A Noncoherent Optical Analog Image Processor”, Appl. Opt., 9, 11, p2459 (1970).
- (18) T. Honda, J. Tsujiuchi and S. Ishiguro, “Image Processing by Multiple Aperture Scanning”, Optica Acta, 21, 8, p653 (1974).
- (19) T. Honda and J. Tsujiuchi, “Restoration of Linear-Motion Blurred Pictures by Image Scanning Method (Effect of Total Width of the Scanning Aperture)”, Optica Acta, 22, 6, p537 (1977).
- (20) B. L. McGlamery, “Restoration of Turbulance-Degraded Images”, JOSA, 57, 3, p293 (1967).
- (21) J. K. Hawkins and C. J. Munsey, “Image Processing by Electron-Optical Techniques”, JOSA, 57, 7, p914 (1967).
- (22) C. J. Munsey, “An Electro-Optical Search and Visibility Enhancement Technique”, SPIE Seminar Proc., 12, p175 (1968).
- (23) 土屋, 鈴木, “撮像蓄積管による画像処理”, テレビ誌, 28, 5, p175 (1974).
- (24) B. R. Frieden, “Image Restoration by Discrete Convolution of Minumal Lenght”, JOSA, 64, 5, p682 (1974).
- (25) E. W. Cheney, “Introduction to Approximation Theory”, McGraw-Hill, New York (1966).
- (26) 寺田, 裏, “電子管工学”, 近代電子工学大講座 2, 電気書院 (1970).
- (27) 西野, 藤井, 茂木, 佐川, “ポリイミドフィルムを用いた電荷像蓄積ターゲット”, テレビジョン学会光・フィルム技術研究会資料, 37 (1975, Sept.)
- (28) “Semiconductor Data Library, Linear Integrated Circuits”, Vol.6/Series B, MOTOROLA Inc., p8/61 (1975).
- (29) T. Honda, K. Kumagaya and J. Tsujiuchi, “Restoration of Defocused Pictures by Image-Scanning Method”, Optica Acta, 24, 1, pp23 (1977)
- (30) J. W. Goodman, “Introduction to Fourier Optics”, McGraw-Hill, New York (1968).

関連発表論文・資料

- (31) 浜田, 森川, “電子顕微鏡像の処理”, 応用物理, 44, 5, p533 (1975).
- (32) 浜田, 森川, “電子顕微鏡像のアナログ的処理”, 画像技術, 6, 12, p13 (1975).
- (33) 湯浅, 松林, 森川, 浜田, “信号蓄積管を用いたアナログ的画像処理装置”, 電気四学会中国支部大会予稿集, 323-22 (1973).
- (34) 浜田, 森川, “超高電圧電子顕微鏡像の画像処理装置”, 大阪大学工学部超高電圧電子顕微鏡室 “でんけん”, 2, p19 (1973).
- (35) 湯浅, 森川, 浜田, “二電子銃信号蓄積管を用いたコンボルーション画像処理装置”, 電子通信学会全国大会予稿集, 968 (1975).
- (36) 大倉, 湯浅, 森川, 浜田, “蓄積管を用いた画像処理装置とその処理結果”, 電気関係学会関西支部連合大会, S 4-6 (1975).
- (37) 浜田, 森川, “蓄積管を用いた画像情報処理装置の試作”, 学振第132委員会研究会資料, p39 (1975, July).
- (38) 大倉, 湯浅, 森川, 浜田, “蓄積管を用いた画像処理装置とその処理結果”, 信学技報, IE75-78 (1975, Nov.).
- (39) 森川, 浜田, 西野, “2電子銃型信号蓄積管の転写効果”, 信学論(A)研究速報, 59-A, 10, p879 (1976).
- (40) 森川, 深井, 浜田, “走査変換管による画像のコンボリューション処理—ぼけ像修正を中心として—”, テレビ誌, 31, 11, p876 (1977).
- (41) J. Matsuda, Y. Morikawa, H. Hamada and K. Ura, “Image Processing System for High Voltage Electron Microscope by Using Scan Converter Tube”, 5-th Int. Conf. High-Volt. Elec. Microscopy, p1 (1977, Sept).
- (42) 近藤, 森川, 浜田, “高速高電圧トランジスタスイッチ”, 信学論(C)研究速報, 61-C, p130 (1978).
- (43) 近藤, 森川, 浜田, “蓄積管を用いた画像処理におけるコントラスト強調法”, 電子通信学会総合全国大会予稿集, 1103 (1979).
- (44) Y. Morikawa and H. Hamada, “A TY type of Analog Image Processor”, Optica Acta (to be published in 1980).
- (45) 中尻, 森川, 浜田, “ボケ像修正有限アパーチャの設計”, 電子通信学会総合全国大会予稿集, 1106 (1979).

- (46) 森川，浜田，“6角ブロック化による高速たたみ込み”，信学論（D）研究速報，63-D，10，P909（1980）

付 録 式 (4 ・ 9) , (4 ・ 1 0) および (4 ・ 1 5) の導出

修正重み再分割－I S A P－I P A S 併用方式においては，式 (4 ・ 6) と式 (4 ・ 2) の形式がまったく同じであるから，式 (4 ・ 6) の併用方式におけるバックグラウンドレベル (Background Level) は，

$$BGL = \sum_{l=0}^{L-1} \text{Max}_{x, y} \left\{ - \sum_{k=0}^1 w_{l, k}^* i (x - \tilde{x}_k, y) \right\} \quad (A - 1)$$

と表現できる。ここで $w_{l, k}^*$ は 1 次元処理の場合の再分割された重みである。

図 4 ・ 5 をみてわかるように， $w_{l, 0}^*$ と $w_{l, 1}^*$ はかならず

$$(w_{l, 0}^*, w_{l, 1}^*) \begin{cases} = (-\alpha_l, \alpha_l + \beta_l) \\ = (\alpha_l + \beta_l, -\alpha_l) \end{cases} \quad (A - 2)$$

のように表わすことができる。ここで α_l, β_l はともに正値をとる。式 (A - 2) を式 (A - 1) に代入すると，次式が得られる。

$$BGL = \sum_{l=0}^{L-1} \text{Max}_{x, y} \left\{ +\alpha_l \left\{ i \left(x - \frac{\Delta}{2}, y \right) - i \left(x + \frac{\Delta}{2}, y \right) \right\} \right. \\ \left. - \beta_l \left\{ i \left(x - \frac{\Delta}{2}, y \right) \right. \right. \\ \left. \left. i \left(x + \frac{\Delta}{2}, y \right) \right\} \right\} \quad (A \cdot 3)$$

上式〔 〕中第 1 項に関して，平均値の定理より

$$i \left(x - \frac{\Delta}{2}, y \right) - i \left(x + \frac{\Delta}{2}, y \right) = - \frac{\partial i (x', y)}{\partial x} \Delta \quad (A \cdot 4)$$

ただし $x' \in (x - \frac{\Delta}{2}, x + \frac{\Delta}{2})$

と表現できる。ぼけ像は非負の値をとる関数であるから、式(A-3)〔 〕
中第2項はかならず負である。したがって

$$\text{Max}_{x, y} \left\{ \pm \alpha_1 \left\{ i \left(x - \frac{\Delta}{2}, y \right) - i \left(x + \frac{\Delta}{2}, y \right) \right\} - \beta_1 \right.$$

$$\cdot \left. \begin{matrix} i \left(x - \Delta/2, y \right) \\ i \left(x + \Delta/2, y \right) \end{matrix} \right\} \leq \alpha_1 \text{Max}_{x, y} \left\{ \pm \frac{\partial i(x, y)}{\partial x} \right\} \Delta$$

さらにこの不等式の右辺は、微係数の符号に関係なく、

$$\alpha_1 \text{Max}_{x, y} \left\{ \pm \frac{\partial i(x, y)}{\partial x} \right\} \Delta \leq \alpha_1 \text{Max}_{x, y} \left\{ \left| \frac{\partial i(x, y)}{\partial x} \right| \right\} \Delta \quad (\text{A} \cdot 6)$$

と上限値で抑えられるから、次式が得られることになる。

$$\begin{aligned} \text{BGL} &\leq \sum_{l=0}^{L-1} \alpha_l \text{Max}_{x, y} \left\{ \left| \frac{\partial i(x, y)}{\partial x} \right| \right\} \Delta \\ &= \left| \sum_{w_{1,k}^*} w_{1,k}^* \right| \text{Max}_{x, y} \left\{ \left| \frac{\partial i(x, y)}{\partial x} \right| \right\} \Delta \\ &= \left| \sum_{w_k < 0} w_k \right| \text{Max}_{x, y} \left\{ \left| \frac{\partial i(x, y)}{\partial x} \right| \right\} \Delta = [\text{UBBL}]_{\text{DW-HYB}} \end{aligned} \quad (\text{A} \cdot 7)$$

ここで最後の符号は、もともとの修正重みが同じ符号の重みに分解できるという仮定から誘導される。

一方、IPAS単独方式では、バックグラウンドレベルは次式で与えられる。

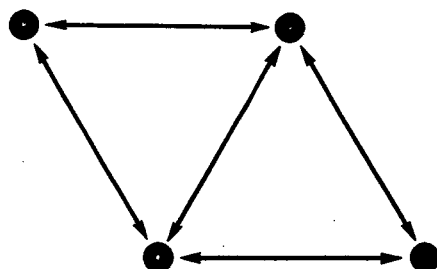
$$\text{BGL} = \sum_k \text{Max}_{x, y} \left\{ -w_k i(x, y) \right\} \quad (\text{A} \cdot 8)$$

$i(x, y)$ は非負であるから、同様に

$$BGL \leq \left| \sum_{w_k < 0} w_k \right| \max_{x, y} \{ i(x, y) \} = [UBBL]_{IPAS} \quad (A \cdot 9)$$

次に、上の結果を2次元修正の場合に拡張しよう。もともとの修正重みは三角格子点上に分布しているから、ペアーを成す重みは図A・1に示す3つのどれかの配置をとる。したがって、式(A・7)において、x方向の微係数を、これら3つの方のどれかの微係数で置き換え、また Δ を Δ_1 と書き換えればよい。これらの微係数の絶対値は $|\text{grad } i(x, y)|$ を超えることがないから、以下の式が導ける。

$$BGL \leq \left| \sum_{w_k, 1 < 0} w_k, 1 \right| \max_{x, y} \{ |\text{grad } i(x, y)| \} \Delta_1 = [UBBL] \quad (A \cdot 10)$$



図A・1 2次元修正における再分割重みのペアー配置

