



Title	対話型画像処理システムの開発とその応用に関する研究
Author(s)	河田, 聡
Citation	大阪大学, 1979, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1597
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

DECEMBER, 1978

対話型画像処理システムの開発と その応用に関する研究

Interactive image processing system
and its applications

大阪大学大学院工学研究科
応用物理学専攻

河 田 聡

Satoshi Kawata

Department of Applied Physics
Faculty of Engineering
Osaka University
Suita, Osaka, Japan

目 次

要 旨	vii
Abbreviations and Significant Notation	xi
第1章 序 論	1
1.1 画像修正と画像強調	3
1.2 マン・マシンの対話による画像処理	4
1.3 画像修正/強調の応用性	7
1.4 劣化系と修正系	8
1.5 ハイスリットド画像処理	11
第2章 対話型画像処理システムの試作	14
2.1 緒 言	14
2.2 設計概念	14
2.2.1 構 成	16
2.2.2 動 作	19
2.3 装置各論	20
2.3.1 ミニコンピュータ・システム	21
2.3.2 画像表示システム	21
2.3.3 画像入力システム	23
2.3.4 高速フーリエ変換/コンボリューション器	25
2.4 システムの性能	28
2.5 考 察	34

第3章	対話型画像処理に適したデジタル処理方法	36
3.1	緒言	36
3.2	画像の微分	39
3.3	多項式曲線適合による平滑化及び微分	41
3.3.1	多項式曲線適合平滑化及び微分の2次元への拡張	44
3.3.2	2次元多項式曲面適合による平滑化と微分	47
3.4	微分の画像処理への応用	51
3.4.1	微分による画像強調	51
3.4.2	微分による画像修正	52
3.4.3	対話型処理への応用	59
3.5	考案	62
第4章	医用画像への対話型画像処理の応用	65
4.1	緒言	65
4.2	微分による微細構造抽出処理	65
4.2.1	乳癌×線写真の微分処理	66
4.2.2	指骨×線写真の微細構造抽出処理	67
4.2.3	顕微鏡像の微分処理	68
4.2.4	局所平均減算処理	69
4.3	非線形な強度変換処理によるコントラストの改善	71
4.3.1	Bits removal によるコントラストの強調	71
4.3.2	Histogram equalization によるコントラストの改善	73
4.3.3	局所的 histogram equalization による画像強調	76
4.4	Edge-sharpening 処理	78
4.5	考案	79

第5章	超高電圧電子顕微鏡写真の画像処理	80
5.1	緒言	80
5.2	弯曲した金属結晶の転位像のコントラストの改善	81
5.3	ガスを封入したカプセル中の試料像の強調	85
5.4	Latexの焦点はずれ電子顕微鏡写真の修正	89
5.5	考案	91
第6章	反復法による線形劣化像の修正	92
6.1	緒言	92
6.2	線形劣化像の離散的表現	93
6.3	連立1次方程式の反復解法	95
6.4	反復法の画像修正への応用	97
6.4.1	同時置換法(Jacobi法)の応用	98
6.4.2	収束条件の緩和	100
6.4.3	逐次置換法(Gauss-Seidel法)の応用	102
6.4.4	拘束条件の導入	104
6.5	実験	107
6.5.1	アルゴリズム	107
6.5.2	1次元計算シミュレーション	109
6.5.3	2次元画像への応用	116
6.6	考案	119

第7章	インコヒーレント光学/ デジタル・ハイスリッド 画像処理	122
7.1	緒言	122
7.2	インコヒーレント光学系による低周波フィルタ リングの応用	124
7.2.1	高周波空間フィルタリング	124
7.2.2	インコヒーレント光学系による線形処理と デジタル・システムによる非線形処理との組合せ	127
7.3	ハイスリッド・システムによる constant variance enhancement 処理	130
7.4	考 察	
第8章	総 括	139
	謝 辞	145
	参 考 文 献	146

要 旨

本研究は、実験者とデジタル画像処理装置との対話形式による画像処理（特に、画像修正及び画像強調処理）の実用化を目的として、対話型処理用の画像処理システムの開発、対話型処理に適した種々の処理法の開発、提案、並びに、多くの対話型処理の、画像修正、画像強調、特徴抽出等への応用実験を行なったものである。対話型画像処理とは、コンピュータの演算能力と人間の観察・認識・判断能力の双方を積極的に利用し、しかも、双方をインタラクティブな形で結合させた処理方式である。

本論文は、序論、本論6章と、総括から構成されている。以下、本論文の各章に沿ってその要旨を述べる。

第1章、序論では、画像修正と画像強調を定義し、その現状を把握した上で、現在の、画像修正及び画像強調の研究におけるいくつかの本質的な問題点を提起する。第2章以降では、提起したそれぞれの問題の克服及び解明をテーマとしている。

第2章においては、種々のデジタル画像処理装置を検討し、対話型画像処理に適したデジタル画像処理システムの試作について述べる。試作したシステムは、実験室内で、ホータの近傍に設置、あるいは、結像機器に内蔵され、実験者と対話処理を行なうことが可能な、小型・低価格の専用装置である。このシステムの特徴は、大きく2つ挙げられる。ひとつは、その構成上の特徴であり、ミニコンピュータのメイン・メモリを、画像メモリとしてシステムの中心に置き、コンピュータのCPU (Central Processing Unit) を含めた各入出力機器並びに処理器を、DMA (Direct Memory Access) バスによって、メイン・メモリと並列にリンクして

いる点である。もうひとつは、その動作の特徴であり、メイン・メモリの周辺機器(CPUを含む)がメモリ・アクセスを時分割している点であり、この特徴によって、各装置が同時に動作しているのと等価の効果をもたらしている。

第3章においては、対話型画像処理を行なうための、処理方法上の制約並びに問題点を提起し、それを満足する処理方法を考察する。ここでは、対話型画像処理に適したディジタル処理法のひとつとして、微分及び平滑化微分法の利用を提案し、それを、画像強調及び画像修正へ応用することを試みる。そして、試作したシステムを用いた対話型処理による実験例を示す。微分演算の画像処理への応用は、処理時間が短く、メモリ容量が小さいこと、処理パラメータが簡単であること等、対話型処理に適した特長を有する。

第4章及び第5章は、第2章で述べる試作対話型画像処理システムと、第3章で論ずるディジタル処理方法を用いて、実際の結像系で得られる画像に対する画像処理について述べる。第4章では、医用画像(X線写真、顕微鏡像、電子顕微鏡写真)の画像改善への対話型処理の応用実験例を示す。一般に、医用画像は、観測対象(人体)が3次元構造を成していることや、人体への損傷や衝撃が許されないため、画質が悪く、画像改善の需要が高い。ここでは、主として、線形な空間フィルタリングとして微分処理を利用し、非線形非記憶な処理として histogram equalization を用いた、画像強調及び特徴抽出の実験について述べる。

第5章では、超高電圧電子顕微鏡写真の対話型画像処理の実験結果を示す。超高電圧電子顕微鏡は、従来の電子顕微鏡では観察できない、微細構造や3次元分布をもつ試料像を我々に提供してくれる。しかし、その画質は必ずしも満足できるものばかりではなく、不十分な場合も多い。そこで著者は、対話型画像処理によって、超高電圧電子顕微鏡写真の画像の改善を試みた。この章

では、その中から、彎曲した金属結晶の転位像のコントラストの改善、ガスを封入したカプセル中の試料の像の強調、及び焦点はずれの電子顕微鏡写真の修正の実験を行なった結果を示す。

第6章においては、対話型処理に極めてよく適合した画像修正法のひとつとして、多元連立1次方程式の反復解法を応用した新しい画像修正法を提案し、シミュレーション結果を通して、その有用性について考察する。この方法は、線形・スペース・インバリアント、線形・スペース・バリアントのいずれの系による劣化像をも取扱うことができること、及び、拘束条件を導入することにより、雑音が付加した像に対して非線形な修正が行なえること、等、実用的な画像修正の必要条件を備えている。これらの点から、第3章で記述する処理法と比較して、ここに提案する反復法は、より一般的な画像修正法である。また、従来の画像修正法と比べて、演算が簡単であり、演算時間、メモリ容量の点でも非常に優れているので、実用性が高いと考えられる。しかも、この方法は、反復によって、逐次、画像が回復していき、この反復回毎に、人間の評価を計算に導入していくことができる点から、対話型処理への適用性は極めて高いと思われる。

第7章では、ディジタル処理システムと、簡単なインコヒーレント光学処理系とを結合した、ハイスリッドなシステムによる画像処理について検討する。特に、試作したディジタル画像処理システムに組込まれたTVカメラのレンズ系に、簡単なインコヒーレント光学処理システムとしての機能を分担させることにより、純ディジタルな手法を用いた場合と比較して、より有効な画像処理が実現できることを、いくつかの実験結果を通して明らかにする。この場合、試作した対話型画像処理システム以外、特殊な光学系を付加する必要が全く無いという特長をもつ。また、提案するハイスリッド画像処理の対話型処理への適応性についても考察する。

第8章では、以上を総括し、それらより得られた成果、並びに知見をもとに、今後への議論を行なう。

Abbreviations and Significant Notation

Abbreviations

CPU	Central Processing Unit
CRT	Cathode Ray Tube
CVE	Constant Variance Enhancement
DMA	Direct Memory Access
FFT	Fast Fourier Transform
HVEM	High Voltage Electron Microscope
HVS	Human Visual System
I/O	Input / Output
LSI	Linear Space(Shift) Invariant
LSV	Linear Space(Shift) Variant
MSB	Most Significant Bit
OTF	Optical Transfer Function
Pixel	Picture Element
PSF	Point Spread Function
SNR (SN比)	Signal to Noise Ratio (信号对雜音比)
TV	Television
超高压電頭	超高電压電子顯微鏡

Significant Notation

(x, y)	coordinates of two-dimensional spatial plane
(f_x, f_y)	coordinates of two-dimensional spatial frequency plane
$\Delta x, \Delta y$	sampling intervals in spatial domain
$o(x, y)$	original object intensity distribution
o_{mn}	sampled original object
\mathbf{o}	sampled original object in vector form
$O(f_x, f_y)$	Fourier transform of $o(x, y)$
$i(x, y)$	observed image intensity distribution
i_{mn}	sampled observed image
\mathbf{i}	sampled observed image in vector form
$I(f_x, f_y)$	Fourier transform of $i(x, y)$
$n(x, y)$	additive noise distribution
n_{mn}	sampled noise
\mathbf{n}	sampled noise in vector form
$N(f_x, f_y)$	Fourier transform of $n(x, y)$
$\hat{o}(x, y)$	processed image or estimated object intensity distribution
\hat{o}_{mn}	sampled processed image
$\hat{O}(f_x, f_y)$	Fourier transform of $\hat{o}(x, y)$
$\hat{o}^{(k)}(x, y)$	estimate of original object in k iterations
$\hat{o}_{mn}^{(k)}$	sampled estimated object in k iterations
$\hat{\mathbf{o}}^{(k)}$	vector estimate of object in k iterations
$\hat{O}^{(k)}(f_x, f_y)$	Fourier transform of $\hat{o}^{(k)}(x, y)$

$h(x, y; x', y')$	PSF of linear imaging system
$h(x, y)$	PSF of LSI imaging system
$h_{mn, m'n'}$	sampled PSF of linear imaging system
h_{mn}	sampled PSF of LSI system
$[H]$	sampled PSF of linear system in matrix form
$H(f_x, f_y)$	OTF of LSI imaging system (Fourier transform of $h(x, y)$)
$g(x, y)$	processing PSF
ω_{kl}	weighting series or digital filter (sampled processing PSF)
$G(f_x, f_y)$	processing transfer function (Fourier transform of $g(x, y)$)
$S(x, y)$	restored PSF
$I\{\cdot\}$	nonlinear memoryless operator of intensity mapping
*	convolution
★	cross correlation

第1章 序 論

“画像処理(Image processing)”は、今日、情報科学の世界で最も脚光を浴びている研究分野のひとつでありながらも、その言葉のもつ意味は漠然としており、統一的な定義は無いように思われる。しかし、現実には、“画像処理”は極めて広範な分野で利用されつつあり、また、その処理技術や処理目的も多種多様である。

現在、画像処理を必要とする自然科学の分野は、天体望遠鏡より像を得る天文学から、ロケットより火星、金星等の像を受像し、解析するスペース・サイエンス、最近のリモート・センシングやSLR(Side Looking Rader)の発達により、気象、地質、地理、海洋、環境の諸分野、とりわけ最近発達の著しい放射線像(X線写真、X線CT像(Computed Tomograph)、RI(Radio Isotope)シンチグラム)、各種超音波像、サーモグラフ、モアレ・トポグラフ、等をはじめ、内視鏡像、顕微鏡像等を対象とする医学・生物学関係の他、物理学、化学に至るまで、多岐にわたっている。また、日常生活においても、画像処理は、テレビジョン、印刷・出版、服飾・織物関係等において、深く係りあいをもっている。また、工場では、生産工程における製品の識別・欠陥検査等に、警察・銀行では、指紋・顔写真の認識等に、なく、画像処理が要望されている。

一方、画像処理の目的も多様であるが、大別して、

1. 情報量の圧縮：帯域圧縮、符号化
2. 画像の改善：画像修正、画像強調
3. 画像の計測：パターン計測
4. 画像の合成・再成：トモグラフィ、ホログラフィ、疑似カラー
5. 認識・判別：特徴抽出、パターン認識

の5つに分類できると考えられる。しかし、この5つの中に含まれない目的をもつ場合や、これらのいくつか、もしくは全部が組合わさった目的をもつ場合も多々ある。

このような、今日益々、多様化、多彩化する画像処理研究の背景の下で、本研究では、特に、上記の画像処理の目的の2、画像改善に着目し、その実現・実用化を主題としている。観測された画像の改善は、上記の3以下の目的の達成に際しても、前処理として、必ず行なわれるべき、基本的かつ重要な処理でありながら、現状では、最も困難な処理のひとつであり、未だ多くの問題点を残しており、画像処理の実用化という観点から、その解決が望まれている。

本研究では、マン・マシンの対話形式による処理方法によって、現状における、画像改善の実用化を阻む問題点の解明とその克服を試みた。

本章では、本研究への序論として、1.1節において、画像改善の具体的な2つの手法である画像修正と画像強調を定義し、その現状を把握した上で、1.2節から1.5節にわたって、それぞれ、現在の画像修正、画像強調の研究に於けるいくつかの本質的な問題点を提起する。これらの問題点の解明及び克服は、第2章以降の各章の主題となっている。

1.1. 画像修正と画像強調

“画像の改善(Image improvement)”は、通常、その目的によって2種類の処理に分けて考えることができ。ひとつは“画像修正(Image restoration)”であり、もうひとつは“画像強調(Image enhancement)”である^{10,11,12}

画像修正とは、物体が、何らかの系を通して、劣化した像として観測されたとき、その劣化像より、真の物体を推定する、あるいは、理想的な物体像を推定する問題である。一方、画像強調は、観測像を、人間に観

察、認識し易いように変換する問題であり、観測像より、人間が望む情報を抽出して強調することである。画像修正が、劣化像から、できるだけ真に近い像を求めることを目的としているのに対し、画像強調においては、対象とする画像の性質とか、人間の主観によって、求める像は異なる。このように、2つの処理は、目的の異なる問題であるが、実際に、画像を変換する際に用いる手法は、しばしば、同等のものが利用され、また、結果的にも、画像強調が修正をもたらしたり、画像修正が強調を生む場合が多い。

画像強調の試みは、比較的古くから広範に行なわれており、多くの手法の実用化が図られている。現在では、テレビジョンにおける電氣的アナログ・ビデオ処理が、コントラストの変換(疑似カラー、ガンマ補正、シェーディング補正)等で実際に利用されている¹³。他、スキャン・コンバータ管を用いた空間処理¹⁴、フラインク・スポット・スキナを用いたトロコイド走査による微分処理¹⁵、アナログ・メモリを用いた複数枚の画像の合成・減算¹⁶等が試みられている。写真技術においても、2枚の医用X線写真の減算による輪郭の強調や、造影剤注入前後の変化分である血管の抽出等が試みられている。このような、アナログ技術の利用による画像強調処理は、極めて簡単に、かつ、おおむね高速に実行できるため、人間との対話処理として、その効果を発揮しているものが多い。それに対して、デジタル処理による画像強調の研究は、従来左程活発でなかったように思われるが、デジタル処理のもつアナログ処理とは比較にならない自由度の大きき故に、次第にその報告も増加しつつある^{17,18,19}。

画像強調の試みが、古くから写真技術等において、必然的に行なわれてきたのに対し、画像修正の研究は比較的新しく、空間フィルタリングの概念が光学に導入された直後、1953年、Maréchalらの、光学的空間フィルタの利用による劣化写真像の修正の実験に端を発する²⁰。その後、レーザの出現により、数多くの光学的空間フィルタリングによる画像修正の実験が試みられた^{21,22}。とりわけ、Strokeら²³、Lohmannら²⁴の研究によって、位相変調をホログラフィックに行なう、所謂、ホログラフィック・フィルタリングが開発されたことにより、画像修正は、より現実のものとなった。一方、コンピュータの目ざましい発達により、デジタル処理による画像修正も次々と試みられ^{25,26}。現在では、画像修正といえば、殆んど、デジタル・コンピ

ュータを用いた画像修正を指すようになっていく。当初、コンピュータによる処理は、メモリ容量の制限から、光学処理と比べ、遙かに分解能の低い画像（例えば、数十点×数十点）しか扱うことができなかったが、種々の、大容量、低価格のデジタル・メモリ素子の開発により、現在では、分解能の問題も次第に解決されつつある。

1.2 マン・マシンの対話による処理

通常、画像修正法として提案されている大部分の方法は、観測像と、それが通過してきた劣化系に関する情報が既知であるとの仮定の下に、その2つの情報を使って、元の像を回復することを目的としている。しかし、現実には生ずる修正への要求では、劣化系に関する情報が、完全に、正確に得られていることは、まず無いといつてよい。これまでの研究の多くは、劣化系を線形な系、特に、線形・スเปース・インバリアントな系と仮定して、さらに雑音は、白色で Gauss 分布をもち、また、それは、加算的か乗算的であると仮定している。定量的にも、系の伝達関数、または点像分布関数と、雑音の分散を既知として取扱い、しかも、その適用例を、シミュレーション実験にとどめるに終わっている場合が多く、実用的に、画像修正が利用されている例は、殆んど見あたらない。

そこで、現在、画像修正において必要とされるのは、むしろ、劣化系や雑音の性質が正確に知られていない場合の修正方法であると思われる。ある特定の条件の下で、特定の系によって劣化した像（例えば、特定のレンズ系を通して、特定の照明条件、特定のフォーカス値、絞り値等の下で得られる焦点はずれ像）に対して、全く同一の系で、同一の条件で、十分に実験、検討することができれば、その条件下での系の性質は、ほぼ解明できるであろう。しかし、通常の場合、得られるものは、観測結果の像だ

けであり、その時の系の完全な再現は、殆んど不可能であるし、できるとしても、非常に時間と労力を要する。

劣化系の性質を調べることなく、画像を修正する方法は、2つ挙げられる。ひとつは、homomorphic filter による blind deconvolution 法²⁷⁻²⁹である。この方法では、線形・スเปース・インバリアント系において、その系に入力される原像が、空間座標に対して、確率過程論的に定常過程であると仮定する。すなわち、原像のスペクトル密度関数が存在すると仮定する。そして、原像のスペクトル密度関数 (Stockhamらは、これを prototype²⁷ と呼んでいる) を予め求めておけば、劣化像から、通過系の伝達関数を求めることができ、それを利用して、線形フィルタリング処理により、修正を行なうことができる。但し、実際の画像では、一般的には、特殊な場合を除いて、その定常性は成り立たない。また、この方法は、系の伝達特性における位相成分に、周期性があることが要求する。したがって、この方法によって修正可能な劣化像は、伝達関数の位相成分が、空間周波数座標に対して周期的であるような劣化系を通過して来た像に限られる。さらに、prototype を求めるためには、被処理像以外に、十分多くの原像が必要である。これらの問題点があるとはいへ、homomorphic filter による blind deconvolution 法は、数学的に、劣化像から劣化系の伝達関数を知ることのできる唯一の手法である。

劣化系を正確に知ることなく、画像を修正することのできるいまひとつの方法は、人間の認識・判断能力の助けを借りることである。コンピュータが、たった一枚の劣化像から、その通過した系の性質を、誤まりなく見つけることが至難の技であるのに対し、人間がその像を一瞥すれば、焦点はずれの像であるとか、流れ写真像であるとか、二重ぶれの像であるとかの判断は、即座にできるであろう。計算能力においては、人間を遙かに超えてしまったコンピュータも、判断能力では、人間に遙かに劣り、突然与えられた一枚の画像に対して、修正を命ぜられれば、劣化関数を知ることでもできず、人間の認識力に頼らざるを得ない。

著者は、人間の認識・判断能力が、コンピュータのみによる画像修正処理をうまく補い得る点に着目し、人間と機械の対話による処理が、現在、シミュレーション段階で止まってしまっている画像修正法を、実用化へ

一步、進めこくれるのではないかと考えた。このような対話形式による画像処理は以下の手順を実行される。まず、劣化像を実験者が観察し、おおざっぱな処理パラメータをコンピュータに与える。それによって、コンピュータは処理を行ない、処理結果の像を人間に表示する。人間は、処理結果を観察・認識し、処理像の特徴を左右した処理パラメータに補正を加え、コンピュータへ、それをフィード・バックする。コンピュータは、新しい処理パラメータに基づいて処理を行ない、再び実験者に処理結果を表示する。所望の結果が得られるまでこの手続きは繰り返され、実験者が妥当であると判断できる結果が得られれば、それを最終処理像として、実験を打ち切る。

コンピュータのみによる1回限りの処理は、劣化系の推定の誤まり、雑音等の影響により、真の像と全く異なった、望ましくない出力像を生ずる危険性が高く、しかも、コンピュータによって、その正否の判断を誤りなく下すことは、極めて困難である。結局、最終的には、やはり、人間の認識・判断力に頼らざるを得ない。

一方、画像強調においても、その最終目標が、人間に認識し易い形に、入力像を変換することであることを考えれば、コンピュータによる一方的な処理よりも、人間と対話しながら、人間に必要な情報を強調していく対話型処理が、より有効であることは明らかである。

しかしながら、このように極めて有効な画像処理方法であると考えられるマン・マシンの対話による画像修正、または画像強調処理は、本研究までに、1970年のMacAdamによる報告³⁰を除いて、見あたらない。それは、主に、次の2つの理由に依ると思われる。

1. 対話型処理に適した特別の画像処理装置・システムが必要であること。
2. 対話型処理を行なうためには、それに適した特別の処理方法が要求されること。

1.の装置、システムに関しては、対話型処理を行なうためには、人と機械の間で、高速に、しかも、簡単に情報の授受ができる必要があり、従来の、多くのアナログ画像処理システムや、共同利用の大型計算機センターの利用

は、ターン・アラウンド・タイムが長すぎるため、対話型処理に不適當である。2.の処理方法に関しては、対話型処理を実施するためには、高速、もしくは、実時間で処理結果を提供できる方法が必要とされるのに対し、従来のデジタル処理方法は、演算時間の節約を左程厳しく要求されていなかったため、殆んどどの処理法は、そのまま対話処理に適用することはできない。

そこで、本研究では、この2つの問題を解決することを主題のひとつとしている。本論文、第2章において、上記1.を克服するために試作した、対話型画像処理システムについて、また、第3章では、上記2.を克服するために、対話型処理に最も適したデジタル処理方法の開発について述べる。第4章及び第5章では、対話型画像処理の実験例を示し、第6章では、第3章で示す方法と比べ、より一般化した対話型処理に適した画像修正法を提案する。第7章では、特に対話型処理に適したデジタル/インコヒーレント光学系のハイブリッド画像処理システムについて述べる。

1.3 画像修正/強調の応用性

Huangら³¹は、処理を要する画像を得てから、その像に対して処理を施す従来の画像修正、画像強調を、“*a posteriori*”な処理法と呼び、それに対して、はじめから、処理を必要としない像を得るように結像系を工夫する、あるいは、結像系自体で劣化を補正してしまう方法は、“*a priori*”な処理法と呼んでいる。テレビジョン技術におけるAGC (Auto Gain Control) 回路、あるいは、カメラ技術におけるAE (Auto Exposure) 機構、自動焦点 (Auto Focusing) 機構等は、*a priori*な処理といえる。最近、盛んに研究が進められている *a priori* な方法としては、adaptive optics による処理³²が挙げられる。これは、大気のもらぎを通過して得られる像に対して、結像機器 (望遠鏡) 内で、実時間で波面の歪みを検出し、光学素子 (通常、dither と

呼ばれる電氣的に可動なミラー)により、補正する方法である。また、顕微鏡では、3次元的構造をもつ物体に対し、結像レンズ系を移動することにより、異なるフォーカス値をもつ像を重ねし、その焦点深度を深める方法があるが^{33,34}。これも、*a priori*な処理法のひとつといえよう。

しかし、*a priori*な処理は、それぞれ、特殊な個別の問題に対する独特の解法であり、画像修正、画像強調の問題が、すべてこれによって解決するわけではなく、一般的には、画像の改善に対し、やはり、*a posteriori*な画像修正、画像強調が必要とされる。

本論文では、画像修正、画像強調の応用として、第4章で、医用画像処理、第5章で、超高電圧電子顕微鏡写真の処理について述べる。特に第5章においては、超高電圧電子顕微鏡の利用によって、はじめに観察されるが、しかしまた著しく劣化している観測画像の、*a posteriori*な画像修正/強調の処理例を示す。この場合、従来の電子顕微鏡を用いるは、絶対観察され得ない像を可視化する超高電圧電子顕微鏡という結像系が*a priori*な処理を行ない、さらにその*a priori*な処理の限界を、*a posteriori*な修正/強調処理によって克服していることになる。多くの実験結果は、*a posteriori*な方法である、画像修正/強調の応用性を強く証明している。

1.4 劣化系と修正系

一般に、劣化像を与える結像系の性質は複雑である。しかし、実際によく問題とされるのは、インコヒーレント照明下での結像や、あるいは、部分的コヒーレント照明下であっても、結像特性が線形近似されるような特殊な物体に対する場合が多い。本節では、このように、劣化系が線形に表現される場合の像モデルを数学的に表現し、従来の画像修正法を考察する。

一般に、物体面における強度分布を $o(x', y')$ 、像面における強度分布を $i(x, y)$ で表現す ならば、線形な結像系においては、両者は、次式で結合される。

$$i(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} h(x, y; x', y') o(x', y') dx' dy'. \quad (1)$$

(1)式で、 (x, y) は、像面における2次元空間を表わす変数であり、 (x', y') は物体面における変数である。また、 $h(x, y; x', y')$ はインパルス応答、または真像分布関数 (Point Spread Function; 以下、PSF と略す) と呼ばれ、系の性質を表わす関数である。(1)式は、像が、PSF を係数とした物体の線形な重ね合わせによって構成されていることを示している。

系の性質が物体、あるいは像の空間的位置に対して不変であれば (1)式のPSFは、

$$h(x, y; x', y') = h(x-x', y-y'), \quad (2)$$

と書き改めることができる。このようなPSFを持つとき、その系は、線形・スペース・インバリアント (Linear Space-invariant; 以下、LSI と略す) な系と呼ばれる。一方、PSFを(2)式で表現できないとき、すなわち、線形であつても、系の性質が場所によって変化するとき、その系は、線形・スペース・バリアント (Linear Space-variant; 以下、LSV と略す) な系と呼ばれる。(2)式を(1)式に代入すれば、次のようなコンボリューション積分の形で表わされる。

$$i(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} h(x-x', y-y') o(x', y') dx' dy'. \quad (3)$$

あるいは簡単な表式を用いて、

$$i = o * h, \quad (4)$$

ここで、 $*$ はコンボリューションを表わす。

LSIなモデルは空間周波数面での取扱いが行なえる。2次元空間周波数変数を、 (f_x, f_y) で表わせば、(4)式の両辺をフーリエ変換して、

$$I(f_x, f_y) = O(f_x, f_y) \cdot H(f_x, f_y) \quad (5)$$

となる。ここで、大文字で表わされる関数は、それぞれ、小文字のフーリエ変換を表わす。系の空間周波数応答を表わす $H(f_x, f_y)$ は、インコヒーレント照明下の結像系では、Optical Transfer Function (OTF) と呼ばれる。

画像修正とは、観測される像、 $i(x, y)$ から、物体像、 $o(x, y)$ を推定する問題である。従来、殆んどの画像修正法では、(4)式で表現されるLSIモデルを取扱っている。これは、(5)式より、空間周波数面での解釈が行なえることに依ると考えられる。実際の問題においても、劣化系がLSIである場合は多い。しかし、より一般には、線形であっても、LSVな劣化の像に対する修正の要求も多い。このような場合、LSIモデルを仮定した従来の多くの修正法は利用できない。

LSV劣化系を考慮した画像修正法もいくつか提案されている。それらは、大きく2種類に分けて考えることができる。ひとつは、空間座標軸を変換して、LSVの問題をLSIの問題に換えてしまう方法である。回転流れ写真の修正^{35,36}、コマ収差像の補正³⁷、幾何学的歪みの補正³⁸等は、適当な座標変換によって、LSI問題に変形することができる。しかし、この方法は、あくまで、特殊な劣化系に対してのみ有効であり、一般性は無い。

LSV系で劣化した像のより一般的な修正法は、(1)式を離散的に表現した連立1次方程式の、解法問題である。(1)式を離散的に表現すれば、

$$i_{mn} = \sum_{m'} \sum_{n'} h_{mn; m'n'} o_{m'n'} \quad (6)$$

$$m = 1, 2, \dots, M$$

$$n = 1, 2, \dots, N.$$

画像修正問題とは、(6)式においては、既知数、 i_{mn} ($m=1, 2, \dots, M, n=1, 2, \dots, N$) 及び、 $h_{mn; m'n'}$ ($m=1, 2, \dots, M, n=1, 2, \dots, N; m'=1, 2, \dots, M', n'=1, 2, \dots, N'$)

より、未知数、 $0m'n'$ ($m'=1, 2, \dots, M'$, $n'=1, 2, \dots, N'$) を求める問題となる。

(6)式は、数学的には十分解き得るもので、線形計画法³⁹ Moore-Penrose の疑似逆行列⁴⁰等によって解かれた報告があるが、それらには、極めて致命的な欠点がある。すなわち、(6)式において劣化係系列 $\{i_{mn}\}$ が、 200×200 の画素から成っているとすれば、 $\{h_{mn}; m'n'\}$ は、 $40,000 \times 40,000$ という膨大な要素をもち、理論的には解は求まるが、現実には、コンピュータのメモリ容量及び演算時間の点で、実用の範囲を超えており、(6)式を解くことは不可能に近いといえよう。

通常の結像系を考えた場合、PSFの広がりとは像の広がりと比較して遙かに小さい。著者はこの点に着目して、通常の劣化系の性質をうまく利用することにより、(6)式を直接解かず、上記欠点を十分克服できる別の解法を考案した。著者の提案する新しい画像修正法は、数値解析においてよく知られる線形方程式の反復解法を改良したものであり、必要とするメモリ容量の大きさ、演算時間等の点で、上述の方法と比べ、非常に優れており、実用性の高い手法である。本論文、第6章において、この反復法による線形劣化像の修正方法について記述し、シミュレーション結果より、この手法の対話型処理への有用性等を検討する。

1.5 ハイブリッド画像処理

画像処理に用いられる技術としては、コンピュータを用いたデジタル技術、電気的アナログ技術、レーザを用いたコヒーレント光学技術、及び、インコヒーレント光学技術等が挙げられるが、よく知られているように、それらは各々、個別の長所・短所を有している。特に、コンピュータを用いたデジタル技術は、フローラムスルであるため、汎用性に富み、演算能力が高く、繰り返し演算が可能であり、判断能力を持ちうること、さらに、再現性、精

度が高く、専門家以外でも、十分操作が容易であること等、他の技術に対して数多くの長所があるため、現在、特に画像修正の研究においては、他の技術に対して、圧倒的に優勢を誇っている。しかし現在のフォン・ノイマンタイプのコンピュータは、逐次処理型であるため、2次元情報である画像を扱うことは、本質的に不得手であり、画像の情報量が増大するに伴い、膨大な演算時間を要し、また、メモリ容量の制限により、取扱える画像の大きさも限られる。特に、画像処理の場合、メモリ容量の制限は致命的である。一方、光学技術を利用した処理は、2次元の実時間並列処理であるため、画像の処理が瞬時に行なえ、また、高分解能画像を、離散化・量子化せずに対処する等の特長をもつ。しかし、上述の、コンピュータの長所に対してはすべて、実現困難な短所となっている。

そこで、この両者、あるいは、さらに電氣的アナログ技術等を、互いにうまく組合わせて、互いの長所を結合し、その短所を相補うことができれば、従来のいづれか単一の技術による処理を上まわる処理能力を持つ可能性がある。しかし、このような、光学処理系とデジタル処理系の結合によるハイスリットな画像処理は、多くの提案^{41,42,43}がなされているものの、有効な成果を収めているものは極めて僅かである。^{44,45}これは、主に、以下の3つの理由に依ると考えられる。

1. 両者を組み合わせることにより、双方の長所が相補するよりも、双方の短所が相乗し、他方の長所をも相殺する 경우가多く、単一の処理よりもむしろ悪い結果を招きやすい。
2. 光学処理系と、デジタル処理系の2つのシステムが必要であり、それらを同時に効率良く作動させるハイスリット系の製作は、極めて困難で、かつ高価である。
3. 情報を、デジタル系からコヒーレント光学系へ伝達する際に、両者のインタフェイスとなるべき実用的な素子が無い。

3. のインタフェイスに利用され得るものとして、研究が進められている実時間空間変調素子は、 $B_{12}SiO_{20}$ 結晶、 KD_2PO_4 結晶、フォトクロミック、液晶、サーモプラスチック等の代表的なものをはじめ、魅力的な素子が数多く

あるが、^{46,47} 現在では、まだ、実験・開発段階であり、実用化には至っていない。ハイスリット処理システムはもちろん、光学系のみによる処理においても、これら実時間空間変調素子の実用化は、その応用性を大きく広げることが十分予想され、非常に待望されている。

著者は、ハイスリット・システムによる画像処理を不可能としている上記、3つの要因を十分認識した上で、この3点に抵触しない新しいハイスリット処理法を考案した。これは、簡単なインコヒーレント光学系と、2章で述べる対話型処理用のデジタル処理システムを構成したハイスリット・システムを用い、特殊な光学系や素子を、一切利用することなく、試作した対話型画像処理システムの特徴をうまく生かした、画像強調のための処理法である。本論文、第7章において、このハイスリット画像処理について考察し、それによるいくつかの実験結果を提示する。

第2章 対話型画像処理システムの試作

2.1 緒言

従来、種々のディジタル画像処理が試みられてきているが、多くの場合、処理装置としては大型計算機を利用し、データ入出力機構とはオフ・ライン結合で、十分なターン・アラウンド・タイムを費して、処理が行なわれている。また、最近では、専用コンピュータを内蔵したオン・ライン処理システムも開発されつつあるが、⁴⁸⁻⁵⁰ それらは膨大な費用を投資したものが多く、物理的大きさもかなり大きく、画像処理センター的役割を担うような性格のものである。これに反し、著者の目的とする画像処理装置は、実験室内で、データ近傍に設置され、あるいは、結像機器内に内蔵され、実験者との対話による処理ができるような、小型で低価格の専用装置である。

本章では、このような目的の下に試作した対話処理用ディジタル画像処理システムについて、その設計概念、及び装置各部を詳述する！

2.2 設計概念

人間とコンピュータの対話による画像処理システムは、Fig. 1に示されるように、画像入力装置、処理装置、表示装置から成る通常のディジタル処理系と、人間の観察・認識・判断機構から成る、いわゆるHVS (Human Visual System) によるフィード・バック・ループから組成される。この系を用い

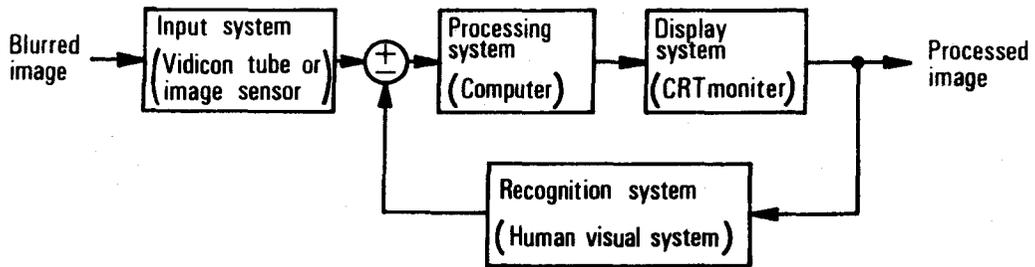


Fig. 1 Man-machine feedback looped image processing system.

2. 対話型処理は、以下の如く実行される。

- i 処理されるべき像は、画像検知系（TVカメラ等）を通して、処理系（コンピュータ）に入力される。
- ii 入力像はコンピュータによって処理され、直ちに画像表示系（CRTモニター等）に表示される。
- iii 実験者は、表示像を観察・確認し、それによって得られた情報・判断をコンピュータにフィード・バックする。
- iv コンピュータは、実験者の判断に基づいて補正した処理関数を用いて、処理をやり直し、CRTモニターに新しい処理結果を表示する。
- v 実験者は新しい処理結果像を観察する。納得のいく結果が得られれば処理を打ち切り、そうでなければ、再びiiiに戻る。

このような、マン・マシンの対話による処理を円滑に進めるためには、処理システムは、以下に述べる特殊な機能を持つことが要求される。

1. 画像入力系、処理系、及び表示系の各間におけるデータの転送が、自動的かつ高速であること。そのために、それぞれの装置はオンライン結合されていること。
2. 画像の入力、処理、及び表示の各動作が、極めて高速であること。特に表示系は、入力過程、処理過程において、あるいは処理遂行後、実験者が各像を肉眼でちらつき無く観察できるように、十分高速に、

リフレッシュ表示できること。

3. 表示中の像に対する人間の判断を、容易にコンピュータにフィードバックし、コンピュータは、表示像を容易に再処理できること。
 そのために、コンピュータのCPUは、検知像に対しても、表示像に対しても、即座にランダム・アクセスできること。

さらに、対話型画像処理システムは、2.1節で触れたように、小型かつ低価格であることが要求される。

これらの機能と要求を充たすために、著者は、ミニコンピュータのメインメモリを中心とした構成をもち、メモリ・アクセスの時分割動作を行なう、対話型処理用の画像処理システムを試作した。以下に、試作したシステムの構成と特徴を述べる。

2.2.1. 構成

通常のオン・ライン・ディジタル画像処理システムは、ミニコンピュータを中心に構成されているが、標準的な汎用の小型処理システムでは、Fig. 2(a)の如く、ミニコンピュータと画像入出力装置が、インタフェイスを介して、プログラム・コントロール・モード I/Oバスによって結合している。このようなシステムにおいては、処理結果はCRT上に出かし、それを写真撮影し、現像後、実験者に示されるため、ホータの出力転送速度は重要でないが、対話型処理への応用を考えれば、処理像は、肉眼で観察できる程高速に、CRTモニタ上にリフレッシュ表示される必要がある。しかし、プログラムモード I/Oバスを利用したこのシステムでは、それ程高速に画像情報をコンピュータよりCRTモニタに転送することはできない。

この、汎用の小型処理システムの転送速度の問題を克服するために、対話型画像処理を目的としたシステムの多くは、Fig. 2(b)に示されるように、画像入力装置とコンピュータとの間、及びコンピュータと表示装置との間に、一画面分の容量をもつバッファ・メモリ(画像メモリと呼ばれること

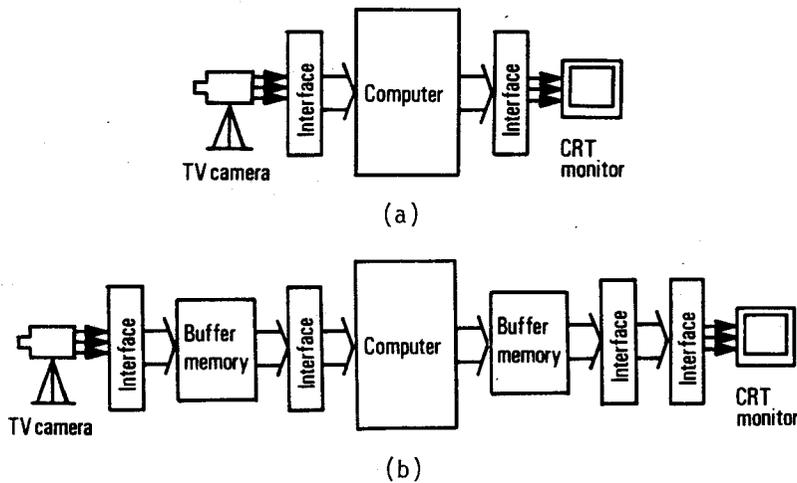


Fig. 2 Illustrations of conventional digital image processing systems based on minicomputers.

- (a) General-purpose small-size digital image processing system using program controlled I/O bus.
- (b) Digital image processing system equipped external buffer memories.

が多い)を有している^{51,52} Fig. 2(b)に示される2つのバッファ・メモリは1つに統合される場合も多い。このシステムでは、画像の高速入力、高速表示を可能とするが、

1. 画像の入出力に、専用の大容量バッファ・メモリが必要であること。
2. 表示像は、バッファ・メモリの内容であり、CPUによる処理過程を、絶えず監視することができないこと。
3. テータの転送回数が多くなり、テータ転送に煩雑さが伴うこと。例えば、表示中の像を観察しながら、実験者が、その修正をコンピュータに指令したときの、CPUの表示像に対するテータ・アクセスが不便である。

等の欠点を有している。

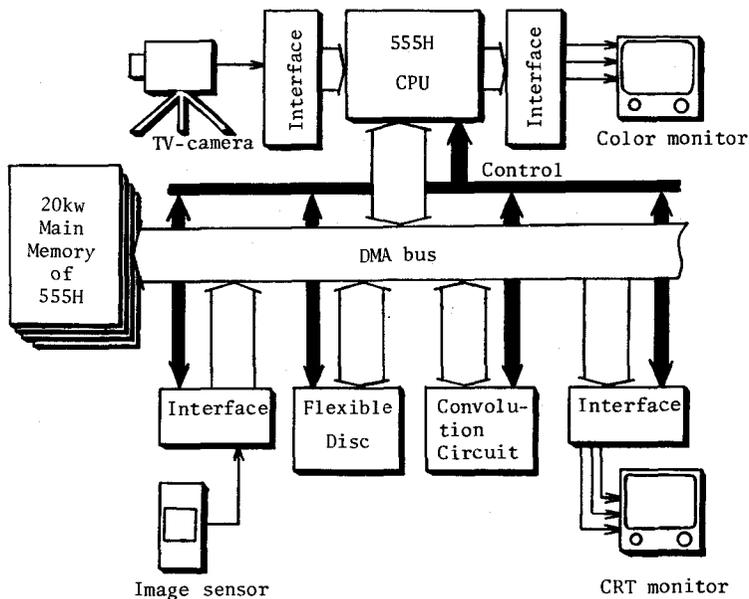


Fig. 3 Developed digital image processing system for man-machine interactive image processing.

Fig. 3 は、設計・試作した対話処理用デジタル画像処理システムである。このシステムは、ミニコンピュータ(CEC 555H)のメイン・メモリを中心とし、ミニコンピュータのCPU、イメージ・センサからの画像入力用インタフェース、CRTモニタへの画像表示用インタフェース、専用フーリエ変換/コンボリューション器等を、並列に、DMA(Direct Memory Access)バスを介して、メイン・メモリとリンクしている。この本システムの構成は、以下の利点をもつ。

1. ミニコンピュータのメイン・メモリを画像メモリとして代用し、一切のバッファ・メモリを省略したことにより、システムが小型、かつ安価なものとなる。
2. 次節で述べる時分割動作方式の採用により、CRTモニタは、処理結果像だけでなく、入力過程、処理過程の像をも、高速にリフレッシュ表示できること。

3. 表示中の像はコンピュータのメイン・メモリに格納されているため、CPUや専用フーリエ変換/コンポリューション器は、その像を、直接、ランダムにアクセスできること。
4. 高速のフーリエ変換/コンポリューション専用ハード・ウェアを内蔵しているため、処理の高速化が図れ、対話型処理に威力を発揮すること。

これらの利点により、本試作システムは、前述の、対話型処理システムに要求される機能を、十分、満足する。

2.2.2 動作

対話型画像処理においては、実験者は、入力過程像や処理過程像を観察し、それより得られる判断・情報をコンピュータへフィードバックする。この手続きを遂行するためには、画像の入力、処理、そして表示の3つの動作は、順次行なわれるのではなく、同時に、並列に、行なわれる必要がある。しかし、試作システムでは、入力用、表示用、あるいは処理用に、別々の画像メモリがあるわけではなく、メイン・メモリひとつだけである。ひとつのメモリを、同時に並列に、入力装置、CPU、表示装置等がアクセスすることはできない。

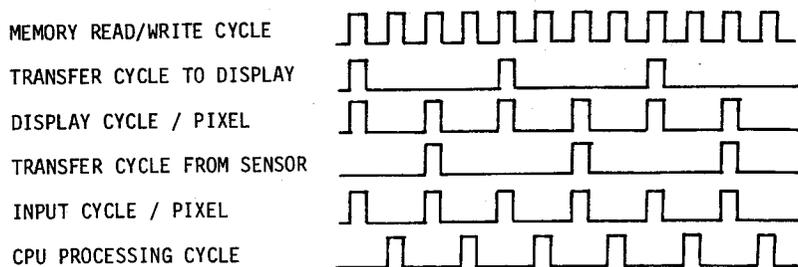


Fig. 4 Timing diagram of relative operations of the system.

この構成上の欠点を、本システムでは、メモリ・アクセスを時分割するという独特の動作方式によって解決した。Fig. 4に、メイン・メモリの読出/書込サイクル・クロックと、それを基準とした、入力装置(イメージ・センサ)、表示装置(CRTモニタ)、及びCPUの動作サイクル、及びこれらのメモリ・アクセスの関係を示すタイミング・チャートを示す。Fig. 4によれば、CPUは、メモリ・サイクルの1サイクルおきに利用して処理を実行する。残りのメモリ・サイクルは、入力装置と表示装置によって交互に利用され、メモリのアクセスが行なわれる。この、時分割メモリ・アクセスの動作方式により、3つの周辺機器の動作は、人間には、同時に進行しているように認識される。結局、実験者は、イメージ・センサによる画像入力の過程、あるいはCPUによる画像の処理の過程を、リフレッシュCRTモニタ上に、動画として、観察する。この方式により、CRTモニタは、処理過程のみならず、画像のCRTモニタへの入力過程をも表示するので、実験者は、焦点位置、絞り、ズーム、あるいは照明系等の光学系を、CRTモニタを監視しながら、調整することが出来る。このことは、Fig. 1の対話型処理システムのブロック図において、新たに、表示系から人間の認識系を通して入力系へのフィード・バック・ループが形成されていることを意味している。

2.3 装置各論

試作した対話処理用ディジタル画像処理システムは、汎用ミニコンピュータシステムを中心とし、CRTモニタ、ビデオコン・TVカメラ、イメージ・センサ、市販カラーテレビ、高速フーリエ変換/コンボリューション器、及び各装置とミニコンピュータとのインタフェイスから構成されている。本研究において、特に設計、試作した部分は、各インタフェイス、及びフーリエ変換

ノコンボリューション器である。このシステム全体のブロック図は、Fig. 3に示した。

2.3.1 ミニコンピュータ・システム

使用したミニコンピュータは、中央電子製の12ビット・マシン、CEC555Hであり、現在、20k語のコア・メモリと、2台のフレキシブルディスクを装備している。メイン・メモリに格納される画像データは、6ビット、64の濃淡レベルをもち、メモリ内では、1語に2画素(pixels)データをパックして、格納されている。70kラム領域を無視すれば、20k語メモリに対し、最大40k語(約200×200画素)の画像を格納できる。

2.3.2 画像表示システム

対話型画像処理において、画像表示システムの役割は重要である。著者は、ミニコンピュータに直結した2つの画像表示システムを設計・試作した。

2.3.2.1 高速画像表示システム

このシステムは、DMAバスを介して、コンピュータのメイン・メモリに直結し、メイン・メモリの内容を64の濃淡レベルでリフレッシュ表示する、高速の画像表示システムである。そのブロック図を、Fig. 5に示す。以下に、このシステムの機能と動作を簡単に説明する。

画像の表示開始と、その終了は、パネルにつけられたフラッシュ・ボタンを押すことにより、あるいは、コンピュータのプログラムのI/O命令によって実行される。コンピュータのメイン・メモリに格納されている画像データは、予めセットされた番地より、インタフェイス内、アドレス・カ

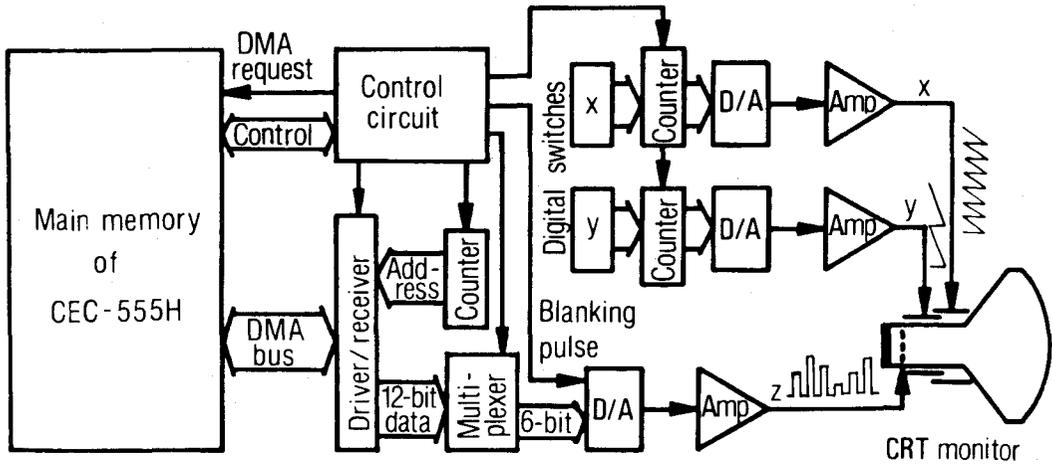


Fig. 5 Block diagram of the high-speed refreshable display system.

カウンタの要求に従って、メモリ・サイクルの4サイクルに1サイクル毎、2画素(12ビット)ずつ、DMAバスを介して出力される。アドレス・カウンタの内容は、1ずつ増加していき、予めディジタル・スイッチで指定した画素数に到達すれば、再び初期番地に戻り、この動作が繰り返される。転送されたデータは、マルチプレクサで6ビットずつに分割され、2倍の転送速度(メモリ・サイクルの2サイクルに1サイクル毎)で、D/A変換器へ送られる。D/A変換器では、データにブランキング・パルスを載せて、アナログ信号に変換する。この信号(図中、Z信号)は、ビテオ信号としてCRTモニタ(静電偏向型クラフック・ディスプレイ; Hewlett-Packard社製モデル1317A)のグリッドに印加される。このビテオ信号に同期して、インタフェイス内部のカウンタで作られる水平、垂直の各偏向用の信号は、D/A変換され、鋸歯状波電圧(図中、X信号及びY信号)として、CRTのそれぞれの偏向プレートに印加される。

これらの、同期した動作の繰返しによって、メイン・メモリの内容が、CRTモニタ上にリフレッシュ表示される。128×128画素から成る画像に対する1画面当りのリフレッシュ表示の繰返しは、最大120Hz、

200 × 200画素の画像に対しては、最大50 Hzである。したがって、この程度の画素数の画像は、ちらつき無しに、CRTモニタ上で観察することができる。

2.3.2.2 低速カラー画像表示システム

もうひとつの画像表示システムは、市販のカラーTVを改造した、疑似カラー画像の表示システムである。このシステムでは、プログラムI/Oモードでデータを転送するため、実時間の観察はできないが、12ビット、4096のカラーの濃淡レベルを表示できる。また、画面の大きさの制限も、コンピュータのメインメモリのサイズもなく、TVの走査本数(本システムではインタフェースからの同期信号の制御により、512本/画面)で決定され、512 × 約700画素の画像が表示できる。

2.3.3 画像入力システム

リアル・ライフな画像、あるいは、写真フィルム、写真プリント上の画像の入力を目的とした2つの画像入力システムを、設計・試作した。

2.3.3.1 高速画像入力システム

このシステムは、セルフ・スキャン型のイメージ・センサを画像検知器として使い、DMAバスによってデータ転送を行なう、高速の、画像入力システムである²。Fig. 6に、そのブロック図を示す。画像は、イメージ・センサによって光電変換され、各サンプリング位置に対応したフォトセル上で、照射光量に比例した電荷量を蓄積する。この電荷量は、メモリ・サイクルに同期して、2サイクルに1サイクル毎に、1画素おきの電荷量をゼネオ信号として取り出される。ゼネオ信号は、増幅され、サンプリング/ホールドさ

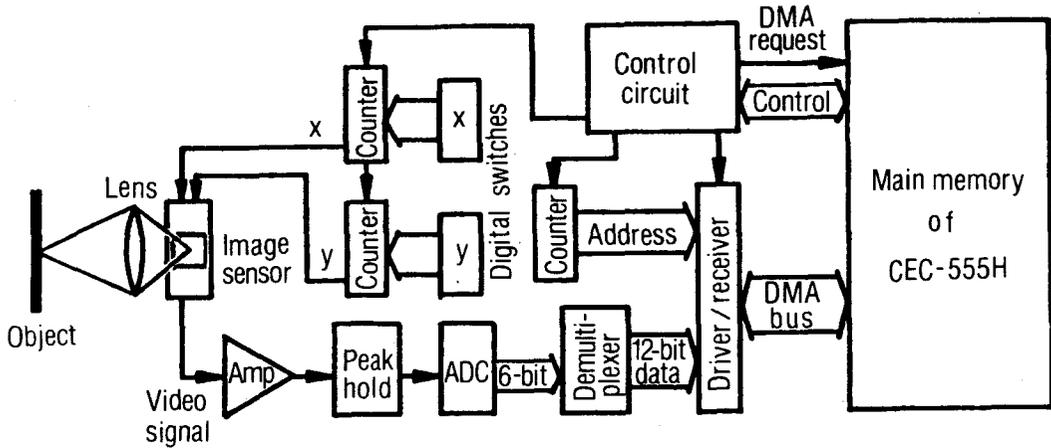


Fig. 6 Block diagram of the image-sensor input system.

れ、そして、6ビットのデジタリ信号にA/D変換される。6ビット・デジタリ信号は、デマルチプレクサにおいて、隣接する2画素ずつを1語(12ビット)にパックされ、アドレス・カウンタの内容に従って、DMAバスを介して、メイン・メモリに転送される。アドレス・カウンタの内容は、メモリ・サイクルに同期して、4サイクルに1サイクル毎に、1ずつ増していき、予め、X、Yのデジタリ・スイッチで設定した画素数に到達すれば、再び初期値に戻る。この動作は、パネル上のアッシュ・ボタンを押すか、あるいは、CPUからのI/O命令によって入力の停止が命ぜられるまで、繰返し続けられる。使用したイメージ・センサは、松下電器製MOSイメージ・センサ、MEL 64×64(64×64個のフォト・ダイオードのマトリックス・アレイから成る2次元センサ)、及び、同、MEL 512K(512フォト・ダイオード・アレイから成る1次元センサ)である。このシステムの、イメージ・センサをスキャンする速度は、最高、1MHz/画素である。したがって、64×64の2次元センサは、最高、240Hz/画面で、リフレッシュ走査され、また、512の1次元センサは、最高2kHz/行を走査される。1次元センサ使用の際は、Fig. 6のYカウンタは動作せず、センサ上に結像して

いる物体を、垂直方向に移動させることにより、物体像が入力され、CRTモニタ上に、その像が表示される。

2.3.3.2 低速画像入力システム

これは既に鈴木研究室において試作されたシステムで、³⁶ 標準TVカメラ（ビティコン・カメラ）と、プログラム・モードI/Oインタフェースから構成されている。この入力システムの動作はすべて、プログラムのI/O命令によって制御されている。この入力システムを利用して画像を入力する際は、メモリ・アクセスの時分割は、CPUとCRTモニタのみによって行なわれる。このシステムは、プログラムI/Oモードにより入力されるため、 128×128 画素の画像の入力に、2秒を要する。

2.3.4 高速 フーリエ変換/コンボリューション器

画像処理において、2次元のコンボリューション積分と、2次元フーリエ変換は、コンピュータのソフトウェアを利用すれば、最も長い計算時間を要する演算のひとつである。しかし、これらの演算は、画像修正や画像強調処理において頻繁に利用されるため、もし、これらの演算時間を大幅に短縮できれば、対話型処理の実現に大いに寄与するものと考えられる。著者らは、この2つの演算を含めた任意の線形演算が可能なハードウェアを設計・試作した³。

試作ハードウェアの最大の特徴は、後に述べる各機能を個別の回路によるのではなく、同一回路によって実現していることである。最近開発されている専用処理ハードウェア付の巨大なデジタル処理システム^{51,52}においては、各機能が別の回路構成になっているのに対し、本システムでは同一回路の利用によって、小型化、低廉化、さらに低消費電力化が実現できた。また、通常、フーリエ変換を離散的に計算する場合、演算時間の点で、FF

T (Fast Fourier Transform) を利用するのが常識であるが、本システムではこれを数式どおり計算させている。本システムのように、乗算速度が、そのハードウェア化によって高速であるとき、しかも、データ数が无程多くない(約 300×300 点以下) 場合、数式どおりの計算は、FFT を用いた場合と比べ2. 5 倍の実行時間が必要である。むしろ以下の利点をとつ。

1. 乗算の繰返しが無いので、丸め誤差による精度の低下の心配が少ない。
2. FFT アルゴリズムと比較して、データのアドレスが極めて簡単でハードウェアが簡単になる。
3. フーリエ変換の単能器にならず、多機能をもたせることができる。

試作した高速フーリエ変換/コンボリューション器は、ミニコンピュータ、CEC 555 H に内蔵され、そのメイン・メモリと、DMA バスを介して直結している。本ハードウェアは、以下の機能をとつ。

1. 基本演算として、次式の線形演算をハードウェア化している。

$$y_i = \sum_j a_{ij} x_j \quad (7)$$

ここで、 y_i , a_{ij} , x_j は、実数に限らず、複素数でもよい。(7) 式の応用により、

$$y_i = \sum_j a_{i-j} x_j \quad (8)$$

$$y_i = \sum_j a_{i+j} x_j \quad (9)$$

で示される、コンボリューション、相互相関の計算等が実行できる。

2. ROM (Read Only Memory) には、sin テーブル、cos テーブルが書き込んである。ハードウェアの制御により、自動的にこのROM をアクセスすることにより、ソフトウェアを使用せずに、コンピュータのメイン・メモリ内に連続して並べられたデータ系列 $\{x_n\}$

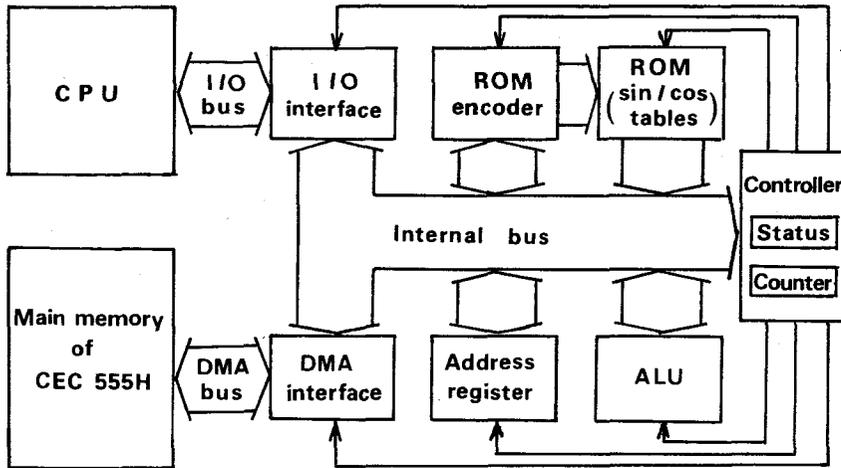


Fig. 7 Block diagram of the special purpose hardware for a Fourier transform/convolution.

のフーリエ変換。

$$y_k = \sum_{n=0}^{N-1} \omega_N^{kn} x_n \quad (10)$$

$$\omega_N = \exp[-2\pi j/N]$$

を実行できる。

3. 回路の一部を利用することによって、ミニコンピュータ、CEC 555Hでは、ソフトウェアによって計算していた複素乗算をハードウェアで実行できる。
4. フーリエ変換用にROMに記録されている sin, cos テーブルのメイン・メモリへの呼び出しが可能である。

Fig. 7に、試作した専用ハードウェアのブロック図を示す。

ALU (Arithmetic Logic Unit) は、(7)式をハードウェア化したもので、それは複素乗算用と12.4個の8ビット・バイポーラ・シリアル/パラレル

乗算器 (Advanced Micro Device 社; Am 25 LS14)、2つの加算器、シフトレジスタ等から成っており、20MHzのクロックで動作している。

本試作ハードウェアによる演算時間は、 $N \times N$ 点の画素から成る像のフーリエ変換に対し、約 $5.6 N^2 \mu\text{sec}$ 、 M 点の画素から成る像に対する N 点画素から成る重み系列のコンボリューションに対して、最大、約 $5.6 MN \mu\text{sec}$ である。また、このハードウェアのメモリ・アクセスは、CPUのメモリ・アクセスのタイミングにおけるメモリ・サイクル・ステール の形式実行される。すなわち、Fig. 4のタイミング図におけるCPUのメモリ・アクセスのタイミングにおけるメモリの読出/書込サイクルは、CPUか、高速フーリエ変換/コンボリューション器のいずれかが使用する。メモリ・アクセスの優先度は、高速フーリエ変換/コンボリューション器がCPUより高い。

2.4 システムの性能

システムの総合的な性能は、第4章～第7章における実際の実験結果を通して評価されるが、それらによれば、設計時における目標が十分達成されていると言える。本節では、各装置について評価する。

Fig. 8は、IEEEが作成したファクシミリ用のテストチャートの中の濃淡レベルを持つ部分を、TVカメラで撮像し、インタフェイスによつてサンプリング、入力し、CRTモニタ上にリフレッシュ表示した像 (Fig. 8(a)) と、コンピュータ内で積算平均を施して表示した像 (Fig. 8(b)) である。これらは、暗い照明の下で撮像されたものであるため、ビデオ信号は非常に小さいが、12ビットでコンピュータに入力された画像を、6ビットの表示レベル一杯に画像の強度が分布するように、コンピュータ内で強度変換して、表示している。そのため、Fig. 8(a)に示されるように、像は十分なコント

ラストをもつて表示されているが、そのSN比(信号対雑音比)は非常に低いと判断できる。一方、電気系によって重畳する雑音は加算的定常雑音であることより、16回の積算平均処理を施したFig. 8(b)は、1回の走査による入力像、Fig. 8(a)と比較して、SN比がほぼ $\sqrt{16} = 4$ 倍、向上している。⁵³

Fig. 9は、プログラムによって、コンピュータ内部で発生させた濃淡階調像を、CRTモニタ上に表示した結果である。Fig. 9(a)は、隣接す

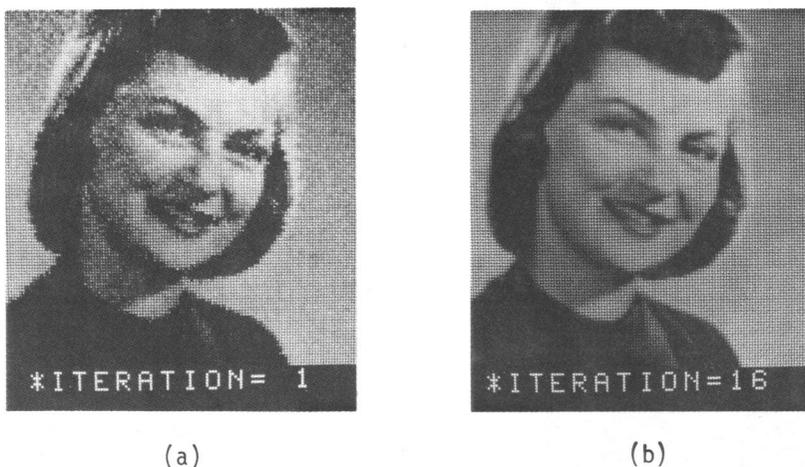


Fig. 8 Examples of images of the test-chart displayed on the CRT monitor, which are obtained by the TV camera and sampled into 128x128 pixels.

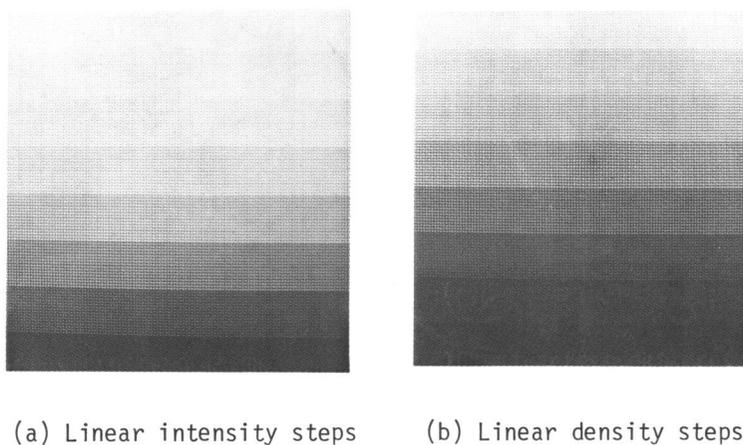


Fig. 9 Display of the gray scales generated by the computer.

るステップ間の強度差が一定の階調 (Linear intensity steps) のパターンであり、Fig. 9(b) は、強度が指数関数的に変化している階調 (Linear density steps) のパターンである。⁵⁴ しかし、それらを観察すれば、人間の log 視覚特性により、Fig. 9(b) の階調パターンにおいて、各ステップ間の強度差が一定に感じられる。

Fig. 10 は、1次元イメージ・センサから入力した 128×128 のリアル・タイム像であり、対話形式による結像光学系のフォーカス調整の様子を示す例である。画面上部においては、像はぼけているが、人間が表示像を観察しながらフォーカス調整をすることによって、画面下方では鮮明に像が表示されている。これにより、イメージ・センサからの画像入力系と、C



Fig. 10 Image displayed on the CRT monitor, which is detected by the 1-D image sensor in the course of focus adjusting.



Fig. 11 Image displayed on the CRT monitor, which is detected by the 2-D 64×64 image sensor.

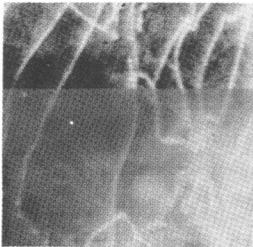


Fig. 12. Display of the image in the course of processing by means of contrast improvement.

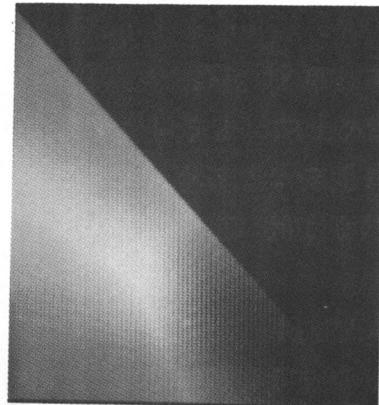


Fig. 13 Chromaticity triangle generated by the developed color display system. (Original is colored!)

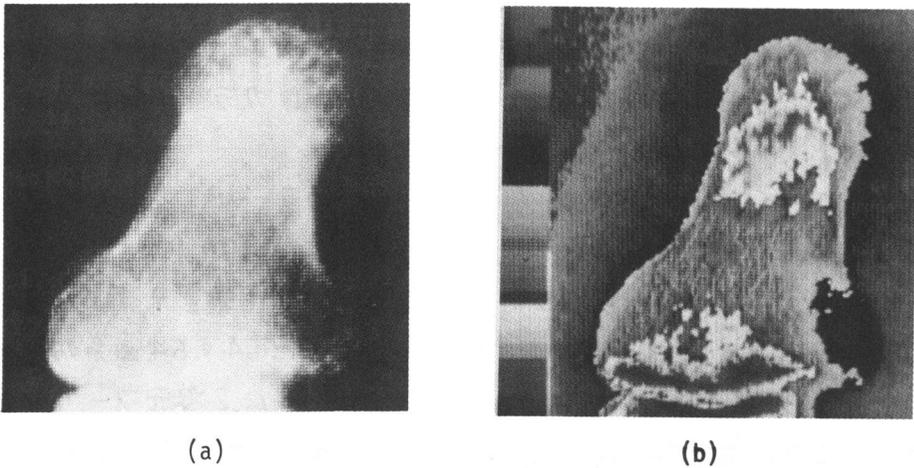


Fig. 14 (a) Monochromatic image of an x-ray photograph of a terminal phalanx displayed on the CRT monitor.
 (b) Pseudo-color image of the same photograph displayed on the color monitor. (Original is colored!)

RTモニタへの画像表示系が、時分割動作方式によりメモリ・アクセスを行ない、見かけ上同時に動作していることが示される。ただし、この実験においては、物体(文字の書かれている紙)を回転ドラム上に貼り付け、対話形式による焦点合わせの様子をわかりやすくするため、ドラムをあえてゆっくり回転させた。

Fig. 11は、2次元イメージ・センサから入力し、CRTモニタ上に表示した画素数 64×64 の写真像である。

Fig. 12は、TVカメラから入力した画像に対する、対話形式によるコントラスト向上の実験の過程である。画面下方 $2/3$ が、前回の処理パラメータによって処理された部分であり、非常にコントラストが低いが、上部 $1/3$ は、新しい処理パラメータによって、コントラストの改善が試みられている。

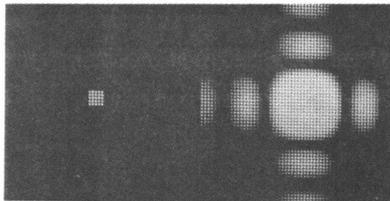
Fig. 13は、カラー画像表示系の性能を示す色度図である¹¹。これにより、試作したカラーTVを用いた表示系が、カラー画像表示に、十分な性能をもっていることが評価できる。

Fig. 14は、指骨X線写真の、CRTモニタに表示した白黒画像 (128×128 画素)と、カラーTVモニタ上に表示した同一写真の疑似カラー画

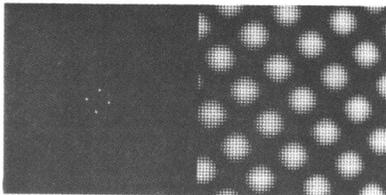
像(128×128)素)である。疑似カラー画像の左に示す階調パターンは、上から下へ、黒から白への入力濃淡レベルに対する、カラー・マップを示している。

Fig. 15、及び16は、試作した高速のフーリエ変換/コンボリューション器の性能を示す実験結果である。Fig. 15 (a)、(b)に、試作したハードウェアを用いた、2次元フーリエ変換の計算結果を示す。それぞれの画面左半分は、コンピュータによって発生させた64×64画素のパターンであり、画面右半分が、試作ハードウェアによる、その2次元フーリエ変換像である。この計算時間は約3秒である。Fig. 16は、同じハードウェアを用いた、2次元相関の計算結果である。64×64画素から成るパターン、Fig. 16 (a)と (b)との、相互相関像が、Fig. 16 (c)である。この計算時間は約2秒である。Fig. 15 及び16より、試作ハードウェアの動作が正常であることを確認できた。

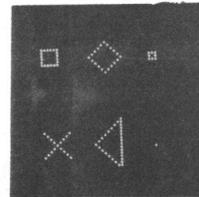
最後に、試作した画像処理システムの仕様をまとめて、Table 1に示す。



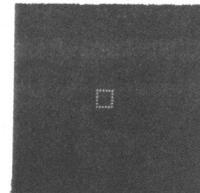
(a)



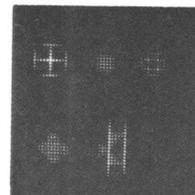
(b)



(a)



(b)



(c)

Fig. 15 Two test patterns and their Fourier transform images calculated by the developed special purpose hardware for Fourier transform/convolution.

Fig. 16 Two test patterns, (a) and (b), and their cross correlation, (c), calculated by the developed hardware.

Table I Specifications of the developed digital image processing system

Main memory of 555H	Pixels number	200x200 _{max} pixels for 20kW memory
	Memory cycle time	1μsec
Display system (CRT monitor)	Pixels number	256x256 _{max} pixels
	Gray levels	64 levels (6 bits)
	Repetition rate	120Hz _{max} /frame (for 128x128 pixels) 50Hz _{max} /frame (for 128x128 pixels)
Display system (Color monitor)	Pixels number	512x700 _{max} pixels
	Color levels	4092 levels (12 bits)
	Output time	2sec/frame (for 128x128 pixels) 3.3sec/frame (for 200x200 pixels)
Input system (image sensor)	Pixels number	512 pixels (1-D image sensor) 64x64 pixels (2-D image sensor)
	Gray levels	64 levels (6 bits)
	Repetition rate	2kHz _{max} /line (1-D image sensor) 240Hz _{max} /frame (2-D image sensor)
Input system (TV camera)	Pixels number	512x700 _{max} pixels
	Gray levels	4096 levels (12 bits)
	Input time	2sec/frame (for 128x128 pixels) 3.3sec/frame (for 200x200 pixels)
Fourier transform/ convolution hardware	1-D Fourier transform	92msec (for data with 64 pixels)
	2-D Fourier transform	3sec (for data with 64x64 pixels) 24sec (for data with 128x128 pixels)
	1-D convolution	5msec (for data with 128 pixels by the kernel with 7 pixels)
	2-D convolution	4sec (for data with 128x128 pixels by the kernel with 7x7 pixels)
		11sec (for data with 200x200 pixels by the kernel with 7x7 pixels)

2.5 考 察

マン・マシンの対話処理用のディジタル画像処理システムを、設計・試作した。本システムの特徴を以下に示す。

1. ミニコンピュータを中心とし、一切のバッファ・メモリを装備しないことにより、システムは十分、小型、低廉化した。
2. システムの各装置は、すべてオン・ライン結合している。特に、イメージ・センサを用いた画像入力系、CRTモニタへの画像表示系は、コンピュータのCPU、高速フーリエ変換/コンボリューション器と並列に、メイン・メモリに直接、リンクされており、画像モニタの高速の転送が行なわれる。特にCRTモニタは、メイン・メモリの内容を、人間の目にちらつきなくリフレッシュ表示する。
3. メモリ・アクセスを時分割することにより、入力過程や処理過程においても、CRTモニタ上に、これらの像をリフレッシュ表示できる。
4. フーリエ変換/コンボリューションをハードウェア化し、処理の大幅な高速化を実現した。

システムの設計開始当時(1975年)と現在では、エレクトロニクス技術の著しい発達により、利用できるエレクトロニクス素子が大きく変わり、現在では遙かに高性能なシステムが考えられる。特に、マイクロ・プロセッサ(例えば、Intersil社のマイクロ・プロセッサ、IM6100ファミリは、使用したミニコンピュータ、CEC555Hとソフトウェアに互換性をもっている)、ICメモリ(ROM、RAM)、A/D変換用IC(TRW社のAD1007Jは、30MHzでA/D変換(8ビット)を実行できるため、TVのビデオ信号を連続的にA/D変換できる)、高分解能のセルフ・スキャン固体撮像素子(MOSイメージ・センサ、CCD、BBD)等は、今後のディジタル画像処理システムの開発に多大な影響を与えよう。しかし、これらの素子の利用により、システムは外形を全く異にし、さらに、小型化、高速化が図られても、2.2節で述べた、その設計概念は、依然生き続くも

のと思われる。むしろ、そのようなエレクトロニクスの発達によって、2.1節で記述した、本研究の最終目標である“結像機器に画像処理器が内蔵され、円滑に対話型処理が行なえること”が、より現実となろう。

また、従来、コンピュータを用いたデジタル画像処理は、ソフトウェアの利用によって、プログラムミスがあることを大きな長所としていたが、今回試作した高速フーリエ変換/コンボリューション器のように、ソフトウェア処理技術がハードウェア化される傾向は益々高まり、ソフトウェアの負担は軽くなるであろう。その結果、従来のような、コンピュータ、または、コンピュータのCPU中心の処理システムではなく、試作したシステムのように、画像メモリが中心となり、CPUをも含めた各演算器や処理器も、メモリの周辺機器としての役割を担うようになっていくと思われる。

第3章 対話型画像処理に適した デジタル処理方法

3.1 緒言

マン・マシンの対話による画像処理を有効に行なうためには、前章で述べた処理システム（ハードウェア）の開発と共に、処理方法（ソフトウェア）の開発も重要である。本論文では、本章と、第6章において、対話型画像処理に適したデジタル処理方法の提案を行なう。本章では、従来、画像修正及び画像強調に盛んに用いられてきた空間フィルタリングを、対話型処理の立場から検討し、対話型画像処理に適した処理方法のひとつである微分、及び平滑化微分の特性を詳しく検討し、その画像修正、画像強調への応用を述べる。

対話型画像処理を円滑に行なうためには、その手段として用いるデジタル処理方法に、以下の2つの機能が要求される。

1. 処理時間が可能な限り短いこと。
2. 処理パラメータが、できる限り簡単であること。

1. の機能は、対話型処理における高速性、あるいは実時間性の要求より明らかである。2. は、対話型処理では、実験者が、コンピュータによって処理された結果の像を観察し、それを判断して、処理パラメータの補正をしなければならぬことから、当然必要とされる重要な機能である。

従来、画像修正及び画像強調の問題に対して最も多く試みられてきた手法は、空間周波数領域における空間フィルタリングである。これは、フーリエ光学系によって古くから試みられているが、デジタル処理においても、広く利用されており、各種のフィルタ関数が提案されている。^{26, 28, 55}

観測像、 $i(x, y)$ に対する空間周波数領域での空間フィルタリングは、次式で表わされる。

$$\hat{O}(f_x, f_y) = I(f_x, f_y) \cdot G(f_x, f_y) \quad (11)$$

ここで、 $I(f_x, f_y)$ 及び $\hat{O}(f_x, f_y)$ は、観測像 $i(x, y)$ 、及び処理結果の像 $\hat{o}(x, y)$ のフーリエ変換である。 $G(f_x, f_y)$ は、画像修正、あるいは画像強調のためのフィルタ関数である。

実際に空間フィルタリングを行なうときには、(11) 式の計算の前後で、2回の2次元フーリエ変換が必要である。しかし、全画面のデータに対する2次元フーリエ変換の計算は、FFTアルゴリズムを用いても、かなりの演算時間を要し、上記の機能1. を明らかに満足しない。また、フーリエ変換を行なうと、空間領域の実関数である像も、空間周波数領域では複素関数となるため、2倍のメモリ容量を要し、さらに、フィルタ関数のためのメモリを必要とするならば、データ格納のためのメモリ容量は実に3倍となり、試作したような、ミニコンピュータ・ベースのシステムでは、メモリ容量が不足である。これら、処理時間とメモリ容量の点で、空間周波数領域における空間フィルタリング処理は、対話型処理に対し、不適当であると考えられる。

一方、空間領域における処理は、空間周波数領域における処理と比較して、2回の2次元フーリエ変換が不用であり、処理PSFの広がり十分小さければ、対話型処理に応用できる可能性が高い。空間領域における空間フィルタリングは、(11) 式の両辺をそれぞれ逆フーリエ変換して、次式のコンボリューション積分の形で表現される。

$$\hat{o}(x, y) = i(x, y) * g(x, y) \quad (12)$$

ここで、 $g(x, y)$ は、フィルタ関数 $G(f_x, f_y)$ の逆フーリエ変換であり、処理PSF (processing PSF) と呼ばれる。実際には、コンピュータでは、(12) 式は、離散化した信号に対し、デジタル演算を行なわれる。(12) 式を離散表示すれば、

$$\hat{o}_{mn} = i_{mn} * \omega_{mn} \quad (13)$$

ここで、 $\{ \hat{o}_{mn} \}$ 及び $\{ i_{mn} \}$ は、 $\hat{o}(x, y)$ 及び $i(x, y)$ の標本化画像である。 $\{ \omega_{mn} \}$ は、 $g(x, y)$ を標本化した処理用の重み系列であり、通常、デジタルフィルタと呼ばれる。

さて、(13)式の計算は、標本化観測画像に重み系列をコンボリューションすることによって、直接、処理像が得られ、2次元フーリエ変換は不要である。しかも、重み系列 $\{ \omega_{mn} \}$ の要素数が十分少なければ、(13)式の演算時間も非常に短くなる。そこで、できる限り少ない要素で構成される重み系列を設計することができれば、それは、対話型処理に十分適用できると考えられる。特に対話型処理に限らなくとも、デジタル画像処理において、演算時間は短いことが望ましい。しかし、単純に、画像修正、あるいは画像強調用のフィルタ関数、 $G(f_x, f_y)$ を逆フーリエ変換して得られる処理PSF、あるいはその離散系列、 $\{ \omega_{mn} \}$ の広がり、小さいとは限らない。そこで、デジタルな画像修正の問題に関して、劣化系のPSFが既知であるという仮定の下に、要素数を制限した修正用重み系列 $\{ \omega_{mn} \}$ の設計法がいくつか提案されている。

Arguella⁵⁶ は、Hanning のウィンドウ関数等を利用することによって、修正用デジタルフィルタを、空間的に有限な広がりを持ち切ることとを提案している。また、Frieden は、修正されたPSFの原点以外の最大ピークを最小にするという評価基準の下で、できる限り空間的広がりの小さいデジタルフィルタを設計することを提案した⁵⁷。Riemer と McGillem⁵⁸ は、修正されたPSFの回転半径の空間的広がりを最小にするという評価基準の下で、デジタルフィルタを求める方法を提案し、Saleh,⁵⁹ McDonnell⁶⁰ は、それを、より具体的に考察した。それらによれば、修正されたPSF、 $s(x, y)$ の回転半径の広がり量を

$$r = \iint_{-\infty}^{\infty} (x^2 + y^2) s^2(x, y) dx dy \quad (14)$$

によって定義し、これを最小とするデジタルフィルタを設計する。これは、Backus と Gilbert の修正法⁶¹ と同等である。Swindell,⁶² Honda⁶³

も、各々、空間的拡がり小さいデジタル・フィルタの設計法を提案している。

しかし、対話型画像処理においては、重み系列の要素数が有限個である以上に、それが極端に少ないことが望まれる。例えば、Harrisによる流小写真に対する修正法⁶⁴は、特殊なケースに対してではあるが、現在においても、最も簡単で、かつ効果的な手法である。この方法は、画像の微分処理であり、重み要素は、2ないし3個である。そのため、この方法は、高速あるいは実時間の実行でき、また、そのパラメータも極めて簡単であることより、対話型処理に適した処理方法のひとつであるといえる。

著者は、この、微分演算の高速性、及びパラメータの簡単さに着目し、これを対話型処理に応用することを考案した。本章では、この微分演算による画像処理法(画像修正、画像強調、特徴抽出)を詳しく検討し、それを対話型画像処理へ適用する場合の具体的な手法を述べる。この手法による多くの実験結果は、第4章、及び第5章に示す。

3.2 画像の微分

パターン認識においては、得られる情報の中から、その特徴を成す成分だけを抽出する要求が多い。画像の中に、いくつかの異なるパターンが形成されていけば、その各パターンの輪郭を抽出したり、大きな濃度変化、あるいは、テクスチャの変化をその部分を強調することは、コンピュータによるパターン認識に限らず、人間が画像を認識する際にも無意識に行なっていることである。これらの操作は、コンピュータにおいても、人間の視覚系においても、情報を“微分”することによって達成される。人間の視覚系(実は、視覚に限らず、一般に感覚器であるか)における微分作用は、古く、1865年に、Machによつて発見、発表されているMach帯によつて、明らかに確認でき、

それは、1950年、Hartlineらによる神経生理学的な発見により証明されている⁶⁵。このような神経生理学的はたらきにより、絵画の教育を受けていない子供であっても、物の絵を画けと言えば、必ず、その物の輪郭を画く。このことは、画像処理という観点に立つと、大胆な情報圧縮を行なっていることに相当する。

画像の微分による処理を考察するにあたり、ここでは、まず簡単に、1次元信号に対する微分を考える。1次元の時間軸の連続信号に対する微分は、古くより電気回路を用いて、RCフィルタによって簡単に行なわれている。しかし、コンピュータで取扱う画像情報は、離散的な信号系列である。微分操作は、離散的信号系列に対しては、差分である。これを数式化すると、信号系列 $\{y_i\}$ の差分値系列 $\{f_i\}$ は、標本間隔を d とし、

$$f_i = \frac{1}{d} (y_i - y_{i-1}) \quad (15)$$

で表わされる。(15)式は、離散的コンボリューションに書き改めることができる。

$$f_i = \sum_j \omega_j y_{i-j}, \quad (16)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{d}$$

$$\omega_1 = -\frac{1}{d}$$

$$\omega_j = 0 \quad j \neq 0, 1$$

ここで、微分操作は、Fig. 17(a)に示すような、2点の要素から成る重み系列のコンボリューションとなり、Fig. 17(b)に示す伝達特性をもつ。

Fig. 17(b)に示されるように、微分操作は、零周波数成分を遮断し、高周波になる程、よく増幅するという、高周波フィルタ特性をもっている。した

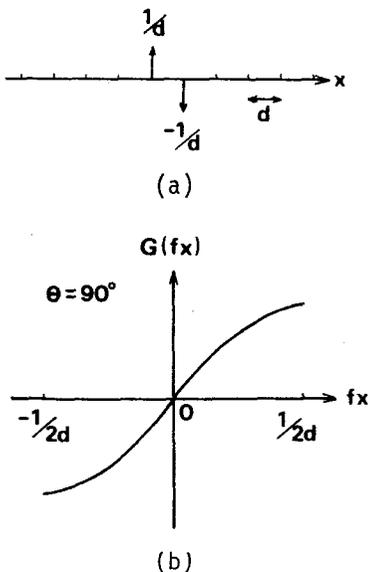


Fig. 17
(a) Weighting series, and
(b) its transfer function of
differential operation.

が、定常白色雑音の重畳した信号に対してこの微分演算を行なうならば、高周波数領域において、雑音成分の著しい強調がもたらされる。そこで、微分演算を行ないつつ、同時に、何らかの平滑化 (smoothing) の手法によって、高周波雑音の強調を抑制する処理方法が望まれる。

3.3 多項式曲線適合による平滑化及び微分

信号の微分演算を行ないつつ、高周波雑音の強調を抑える方法のひとつとして、最小自乗誤差評価に基づいた多項式適合 (polynomial curve fitting) が挙げられる⁶⁶。この方法は、分光データの処理等においては、既に広く利用されている手法であり、(16)式の微分用重み系列に代わる重み系列による離散的なコンボリューション法である⁶⁷。その重み系列は、観測信号系列と多項式曲線との最小自乗法によって求められるが、この重み系列は、観測信号に依存せず、予め計算して作表しておけば、任意の信号系列に対して同一の重み系列が利用できるという特徴を有している。以下に、この重み系列の決定の手続きを簡単に述べる。

等間隔に標本化された信号系列 $\{y_i\}$ における任意の1点、 y_0 を平滑化するために、 y_0 の前後の隣接する $(2m+1)$ 個の信号に対して、 n 次 ($n < 2m+1$) の i (整数) に関する多項式

$$f_i = \sum_{k=0}^n b_{nk} i^k, \quad (17)$$

を適合させる。今、求めたいのは、 $i=0$ において $\{y_i\}$ に適合した (17) 式 の 多項式 の 値、 f_0 、及びその s 次微分値 $(d^s f_i / di^s)_{i=0}$ である。 f_0 は y_0 の平滑値、 \bar{y}_0 と考えられる。また、 $(d^s f_i / di^s)_{i=0}$ は、 y_0 の平滑化 s 次微分値、 $(d^s \bar{y}_i / di^s)_{i=0}$ と考えることができる。

それらは(17)式より、

$$\begin{aligned} \bar{y}_0 &= f_0 = b_{n0} \\ \left(\frac{d^s \bar{y}}{d i^s}\right)_{i=0} &= \left(\frac{d^s f_i}{d^2 i^s}\right)_{i=0} = s! b_{ns} \end{aligned} \quad (18)$$

で与えられる。ここで、 y_i と多項式 f_i との差の自乗和が、 y_0 の隣接する前後 $(2m+1)$ 標本点、 $i=-m, \dots, 0, \dots, m$ の範囲で、最小となる係数、 b_{n0} 、あるいは b_{ns} を最小自乗法によって求める。すなわち、

$$\frac{\partial}{\partial b_{nk}} \left[\sum_{i=-m}^m (f_i - y_i)^2 \right] = 0, \quad (19)$$

$$k = 0, 1, \dots, n.$$

(19)式を変形して、

$$\sum_{k=0}^n b_{nk} S_{r+k} = F_r \quad (20)$$

$$r = 0, 1, \dots, n,$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} S_{k+r} &= \sum_{i=-m}^m i^{r+k} \\ F_r &= \sum_{i=-m}^m i^r y_i \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

この連立方程式を解くと、 $\{b_{nk}\}$ は、 $\{y_i\}$ の線形結合の形で求まる。すなわち、平滑値、及び平滑化微分値を表わす(18)式は、 $\{y_i\}$ を含んだままの形で求まり、 y_i の各係数は、重みとなる。

このようにして、重み系列は、観測信号に関係なく計算される。この重み系列と任意の観測信号とのコンボリューションは、逐次、信号を多項式に最小自乗近似して得られる平滑値、あるいは平滑化微分値と同一の結果を与える。実際には、直交多項式を利用することにより、この重み系列はより簡単に計算できるが、それについては、参考文献⁶⁶に詳述されているので、ここでは省略する。

Fig. 18に、3次の項式 ($n=3$) を 5点 ($2m+1=5$) 及び 7点 ($2m+1=7$) に適合した場合の、1次微分の重み系列とその周波数応答を示す。 Fig. 17と比較すれば、低周波数領域においては Fig. 17と同様の微分特性をもちながら、高周波数領域において、逆に減衰特性をもっている点が異なる。そのため、これらの重み系列を用いれば、高周波雑音の強調を抑制した微分操作が実行できる。

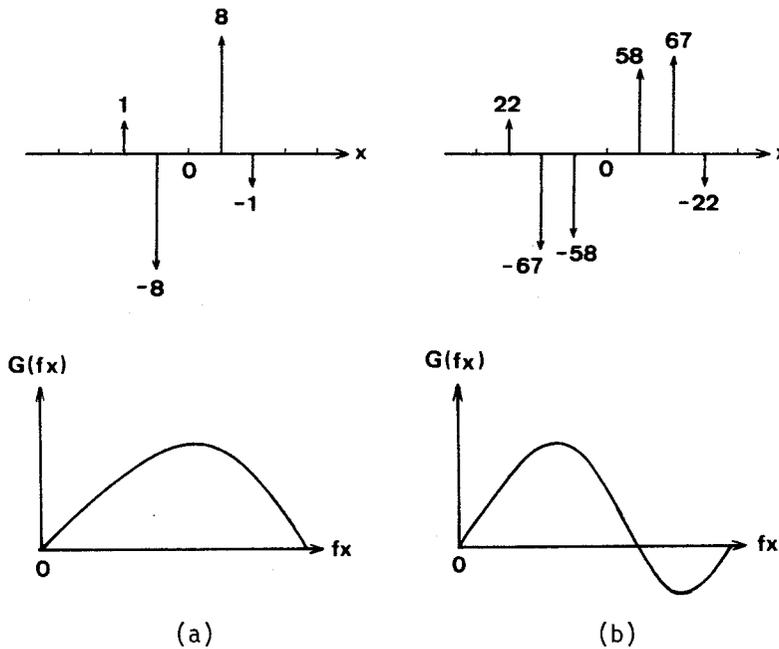
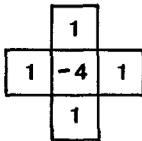


Fig. 18 Weighting series and transfer functions for first derivative of cubic polynomial determined from least square fit to (a) 5 points, and (b) 7 points.

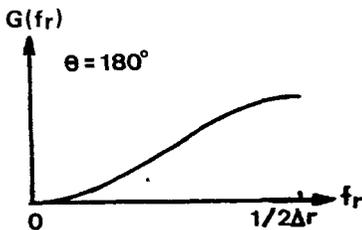
3.3.1 多項式曲線適合平滑化及び微分の2次元への拡張

最小自乗評価に基づく平滑化及び微分は、分光系一夕に対する雑音除去や、セーフ位置検出等においてよく用いられるが、これを画像処理に適用するために、2次元への拡張を検討する。

2次元情報に対する微分演算子の中で最も重要なものは、方向性をもたない、Laplacian演算子($\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$)である。これは、視覚系における刺激に対する応答がLaplacianであることから納得のいくことである。2次元のディジタル信号に対するLaplacian演算は、前述の1次元の場合と同様に差分演算となり、Fig. 19(a)に示す2次元重み系列との、2次元コンボリューションに変形される。その伝達特性は、Fig. 19(b)に示す高周波強調フィルタの形をもつ。



(a)



(b)

Fig. 19
(a) 2-D weighting series, and
(b) its transfer function for
Laplacian.

さて、多項式曲線との適合の概念を2次元化すれば、2次元信号系列 f_{ij} と 2次元 n 次多項式 $f_{ij} = \sum_{k=0}^n \sum_{l=0}^n b_{knl} x_i^k y_j^l$ との最小自乗法による適合の問題に発展する。しかし、Laplacian演算子は、 x による2次偏微分と、 y による2次偏微分の加算であり、 xy による偏微分が無い点を考慮し、ここでは、疑似的に、1次元重み系列を、 x 方向、 y 方向に並べ、それを足し合わせることで、簡単な十字成分から成る2次元重み系列を求めた。

Fig. 20に、2次式・3次式、及び4次式・5次式を、それぞれ、5点・7点に適合した場合の重み系列の、2次元的组合せによる、十字形重み系列とその伝達特性を示す。なお、2 微分の場合、2次式と3次式、あるいは、4次式と5次式の適合に対する重みは、同じになる。

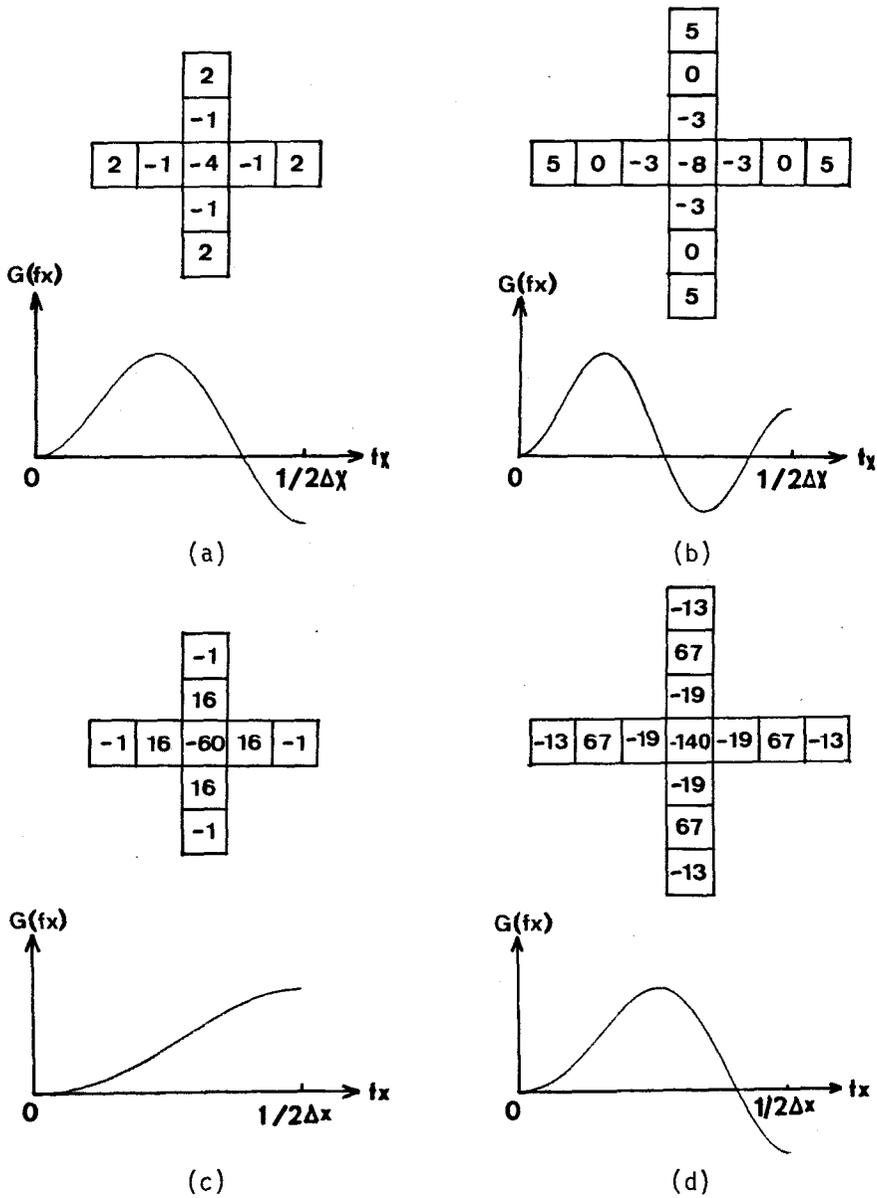


Fig. 20 2-D cross weighting series and transfer functions for Laplacian.

- (a) 5x5 points (quadratic/cubic curve fit).
- (b) 7x7 points (quadratic/cubic curve fit).
- (c) 5x5 points (quartic/quintic curve fit).
- (d) 7x7 points (quartic/quintic curve fit).

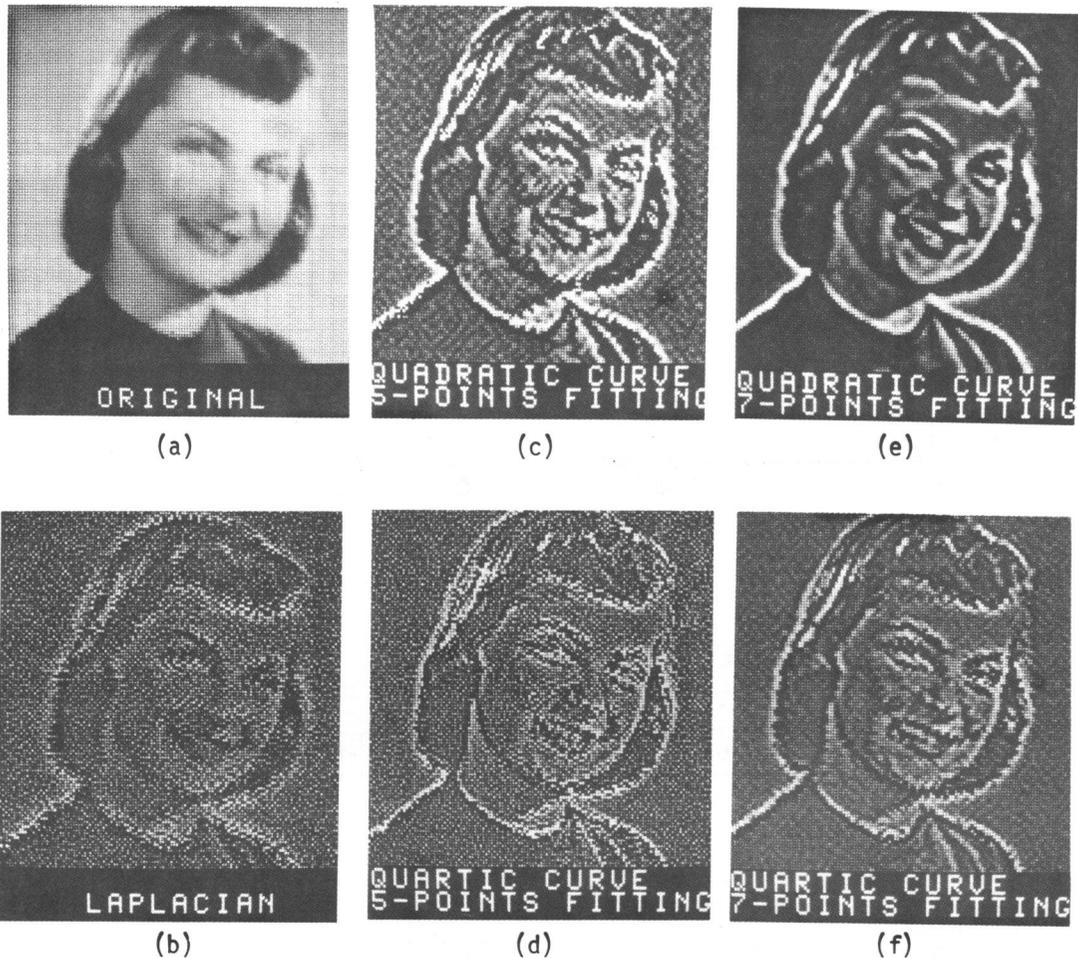


Fig. 21 Experimental results of smoothing and Laplacian of an image (128x128 pixels), in which the 2-D cross weighting series shown in Fig. 20 were used.

試作した対話型画像処理システムを用いて、この十字形重み系列をIEEが作成したファクシミリ用テスト・チャートの写真像にコンボリューションした結果を、Fig. 21に示す。Fig. 21(a)の入力像に対し、Laplacian像 (Fig. 21(b))は、輪郭の抽出が行なわれている以上に、雑音成分の増幅の効果が大きく表われている。それに対し、2次曲線7点適合の十字形重み系列のコンボリューション結果 (Fig. 21(e))においては、雑音は十分抑圧され、しかも、輪郭の抽出に成功していることが確認できる。なお、この十字重み系列のコンボリューション法は、垂直方向に2次偏微分した像と、水平方

向に2次偏微分した像との。2枚の微分像の加算に対応しており、全方向の微分ではないため、方向性をもつておる。Fig. 21 (c), (e), (f)をよく観察すれば、±45°度方向に、ランダムな格子縞を背景上に見ることが出来るが、これが、重み系列の方向性の存在を示すものである。この影響は、よりサイズの大きい重み系列を利用したとき程、強く表われると考えられるが、余程大きいサイズの重み系列を利用しない限り、Fig. 21に示したような輪郭の抽出においては、問題にならないと考えられる。

$M \times M$ 点から成る重み系列が2次元的にすべての要素に値をとっている場合と比べ、この十字形重み系列は、そのうち、 $(2M-1)$ の要素に値をとるにすぎず、演算時間を著しく短縮する。これは、対話型画像処理において非常に重要なことである。ちなみにFig. 21の実験において、 128×128 画素からなる標本化画像に対する処理時間は、TVカメラからの入力時間を含め、ソフトウエア利用で、Laplacian 処理に対して約10秒、 5×5 点十字形重み系列による処理に対して約20秒、及び、 7×7 点十字形重み系列による処理に対して約30秒であり、試作コンボリューションハードウエア利用で、それぞれ、2.6秒、3.0秒、及び3.5秒である。

3.3.2 2次元多項式曲面適合による平滑化と微分

多項式曲線と1次元信号との、最小自乗誤差評価に基づく適合による平滑化の方法を、2次元に拡張し、曲面と2次元信号との適合の問題に発展させる。このとき、評価式(19)は、次式に書き改められる。

$$\frac{\partial}{\partial b_{nkl}} \left[\sum_{i=-m}^m \sum_{j=-m}^m (f_{ij} - g_{ij})^2 \right] = 0 \quad (22)$$

$k=0, 1, \dots, n,$
 $l=0, 1, \dots, n.$

ここで、 f_{ij} は、2次元 n 次多項式、

$$f_{ij} = \sum_{k=0}^n \sum_{l=0}^n b_{nkl} i^k j^l \quad (23)$$

$k+l \leq n$

-13	2	7	2	-13
2	17	22	17	2
7	22	27	22	7
2	17	22	17	2
-13	2	7	2	-13

(a) Smoothing (5x5)

4	1	0	1	4
1	-2	-3	-2	1
0	-3	-4	-3	0
1	-2	-3	-2	1
4	1	0	1	4

(b) Laplacian (5x5)

-7	-2	1	2	1	-2	-7
-2	3	6	7	6	3	-2
1	6	9	10	9	6	1
2	7	10	11	10	7	2
1	6	9	10	9	6	1
-2	3	6	7	6	3	-2
-7	-2	1	2	1	-2	-7

(c) Smoothing (7x7)

10	5	2	1	2	5	10
5	0	-3	-4	-3	0	5
2	-3	-6	-7	-6	-3	2
1	-4	-7	-8	-7	-4	1
2	-3	-6	-7	-6	-3	2
5	0	-3	-4	-3	0	5
10	5	2	1	2	5	10

(d) Laplacian (7x7)

Fig. 22 Tables of 2-D weighting series for smoothing and Laplacian of quadratic polynomial fit to square areas. (Relative values)

である。ここで、平滑値、 \bar{y}_{00} 、及び、平滑化Laplacian値、 $\nabla^2 \bar{y}_{00}$ は、(23)式より、

$$\bar{y}_{00} = f_{00} = b_{n00}, \tag{24}$$

$$\nabla^2 \bar{y}_{00} = 1 \left(\frac{\partial^2}{\partial i^2} + \frac{\partial^2}{\partial j^2} \right) f_{ij} \Big|_{i=j=0} = 2(b_{n20} + b_{n02}),$$

となる。(22)式は連立1次方程式に変形され、1次元の場合と同様にして解くことが出来る。Fig. 22に、5×5点及び7×7点の、2次曲面適合の平滑化、及び平滑化Laplacianのための重み系列を示す。また、適合範囲を正方領域とするよりも、中心点からの円領域にある方が、重み系列に方向性を持たないことは、容易に想像出来る。そこで、適合範囲を円領域に

	-14	3	-14	
-14	37	54	37	-14
3	54	71	54	3
-14	37	54	37	-14
	-14	3	-14	

(a) Smoothing ($i^2+j^2 \leq 5$)

	37	16	37	
37	-26	-47	-26	37
16	-47	-68	-47	16
37	-26	-47	-26	37
	37	16	37	

(b) Laplacian ($i^2+j^2 \leq 5$)

		-71	-44	-71		
	-17	64	91	64	-17	
-71	64	145	172	145	64	-71
-44	91	172	199	172	91	-44
-71	64	145	172	145	64	-71
	-17	64	91	64	-17	
		-71	-44	-71		

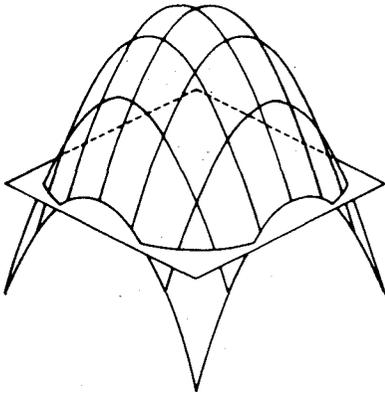
(c) Smoothing ($i^2+j^2 \leq 10$)

			154	117	154		
		80	-31	-68	-31	80	
154	-31	-142	-179	-142	-31	154	
117	-68	-179	-216	-179	-68	117	
154	-31	-142	-179	-142	-31	154	
		80	-31	-68	-31	80	
			154	117	154		

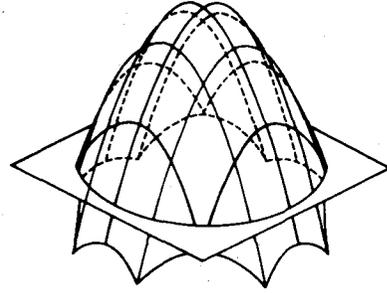
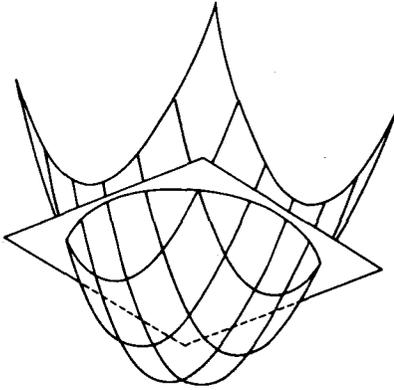
(d) Laplacian ($i^2+j^2 \leq 10$)

Fig. 23 Tables of 2-D weighting series for smoothing and Laplacian of quadratic polynomial fit to round areas. (Relative values)

にした場合の、重み系列についても計算した。 Fig. 23 に示す重み系列は、適合範囲が $i^2+j^2 \leq 5$ の場合と、 $i^2+j^2 \leq 10$ の場合の、2次曲面適合の平滑化、及び平滑化Laplacian用の重み系列である。正方形領域を適合範囲とした場合と比較して、方向性をもたないことを示すために、Fig. 24 に、7×7の重み系列と、 $i^2+j^2 \leq 10$ の場合の重み系列を、立体表示した。 Fig. 24 (c), (d) の円領域適合の重み系列は、回転対称性を示しており、また、Fig. 24 (a), (b) の正方形領域適合重み系列が、 $\pm 45^\circ$, $\pm 135^\circ$ 方向に、大きなスパイクをもつことを示している。



(a) Smoothing (7x7)

(c) Smoothing ($i^2+j^2 \leq 10$)

(b) Laplacian (7x7)

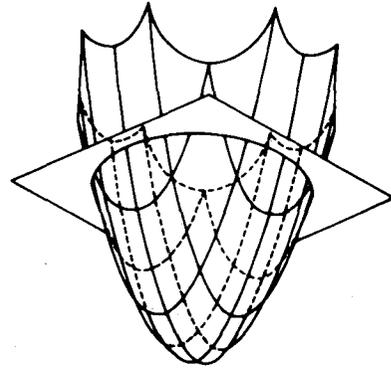
(d) Laplacian ($i^2+j^2 \leq 10$)

Fig. 24 Perspective drawings of the tables of weighting series of Fig. 22 (c), (d) and Fig. 23 (c), (d).

3.4 微分の画像処理への応用

3.4.1 微分による画像強調

画像の微分は、Fig. 21の実験例に示したように、零空間周波数成分を遮断し高周波成分を強調することによって、像の輪郭や微細構造を抽出するが、これを応用することによって、画像の強調を行なうことができる。



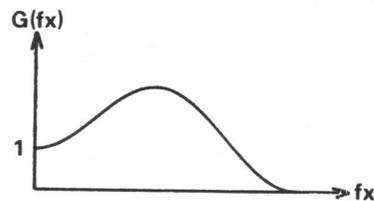
(a)



(b)

-2
1
-2 1 8 1 -2
1
-2

(c)



(d)

Fig. 25 Experimental result of edge-sharpening by the combination of an observed image and its Laplacian.

- (a) Original image (128x128 pixels).
- (b) Processed image.
- (c) Cross weighting series used to obtain (b).
- (d) Transfer function of (c).

観測画像より、その微分、あるいは平滑化微分画像を減算すれば、輪郭や微細構造が強調された。所謂、edge-sharpening の効果が表われる。Fig. 25は、その実験例である。Fig. 25(a)の入力像に対し、Fig. 25(b)の処理像では、目元、眉、歯並び等がシャープになっていることが確認できる。この処理結果は、入力像より、その平滑化Laplacian像を2:1の比率で減算して得られるが、実際には、それに対応するFig. 25(c)の重み系列を、入力像にコンボリューションした。この重み系列は、2次式5点適合の平滑化Laplacianの十字形重み系列の $-1/2$ 倍に、その中央要素にのみ、1を加えたものである。この重み系列の周波数応答は、Fig. 25(d)に示すように、零空間周波数では、1であり、周波数が高くなるにつれ増幅度も高まり、edge-sharpening効果をもたらし形となっておりながら、高周波数領域においては、緩やかなcut-off特性をもっており、高周波雑音の増幅を抑える。

3.4.2 微分による画像修正

微分演算の応用により、画像の強調ができるという事実をふまえて、ここでは、さらに、微分演算の応用による画像の修正について考察する。

簡単のために1次元を考えるなら、観測劣化像 $i(x)$ は、物体 $o(x)$ と劣化系のPSF、 $h(x)$ のコンボリューションに雑音 $n(x)$ が付加された形で与えられる。すなわち、

$$i(x) = \int_{-\infty}^{\infty} o(x') h(x-x') dx' + n(x) \quad (25)$$

あるいは

$$i = o * h + n \quad (26)$$

それぞれ関数のフーリエ変換を大文字で表わせば、(26)式の両辺をフーリエ変換すれば、

$$I(f_x) = O(f_x) \cdot H(f_x) + N(f_x) \quad (27)$$

となる。さて、劣化像 $i(x)$ に対し、0次微分から、 n 次微分まで行けり
 11. それらを線形結合すれば、処理結果像 $\hat{o}(x)$ は、

$$\begin{aligned}\hat{o}(x) &= \left(b_0 + b_1 \frac{d}{dx} + b_2 \frac{d^2}{dx^2} + \dots + b_n \frac{d^n}{dx^n} \right) i(x) \\ &= \sum_{k=0}^n b_k \frac{d^k}{dx^k} \cdot i(x).\end{aligned}\quad (28)$$

ただし、 b_0, b_1, \dots, b_n は定数であり、各微分像の係数である。これを空間周波数領域で考えるなら、(28)式の両辺をフーリエ変換して、

$$\hat{O}(f_x) = \left(\sum_{k=0}^n a_k f_x^k \right) \cdot I(f_x),$$

ただし、

$$a_k = (2\pi j)^k b_k.$$

(29)

(29)式は、微分演算が、多項式

$$G(f_x) = \sum_{k=0}^n a_k f_x^k \quad (30)$$

による空間フィルタリングであることを示している。すなわち、修正フィルタを多項式で表現することができれば、実際には、劣化像を微分演算によって修正することになる。ここで問題は、多項式の係数、 a_k をいかに決定するかということになる。

係数 a_k ($k=0, 1, \dots, n$) を決定するために、次式に示す最小自乗評価基準を採用する。

$$U = \int_{-1/2\Delta x}^{1/2\Delta x} \left| \sum_{k=0}^n a_k f_x^k \cdot H(f_x) - R(f_x) \right|^2 df_x \rightarrow \min. \quad (31)$$

ここで、 Δx は画像の標本間隔である。(31)式は、劣化系のOTF、 $H(f_x)$ と修正フィルタ、 $\sum_{k=0}^n a_k f_x^k$ の積を合成した伝達関数と、理想とする系の伝達関数、 $R(f_x)$ との差の全空間周波数での自乗和を最小にすることによって、修正された系の伝達関数を理想系の伝達関数に近似することを意味する。

ここで、対話型処理への応用を考慮すれば、多項式の次数（すなわち、微分の次数）、 n は、ふすぎるだけ低く抑えるべきである。等式拘束条件、

$$\begin{aligned} V_j(a_0, a_1, \dots, a_n) &= 0, \\ j &= 0, 1, \dots, J \end{aligned} \quad (32)$$

の下で、(31)式を最小にする $\{a_k\}$ は、Lagrange の未定乗数法により求まる。すなわち、目的関数を、未定乗数、 λ_j 、 $\{j=0, 1, \dots, J\}$ を用いて、

$$U' = U + \sum_{j=0}^J \lambda_j V_j \quad (33)$$

と表わせば、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U'}{\partial a_r} &= 0 & r &= 0, 1, \dots, n, \\ \frac{\partial U'}{\partial \lambda_j} &= 0 & j &= 0, 1, \dots, J, \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

なる $(n+J+2)$ 元連立方程式を解けばよい。

拘束条件としては、以下の条件が考えられる。

1. 修正前後において全光量が不変であること。すなわち

$$\left(\sum_{k=0}^n a_k f_x^k \right)_{f_x=0} = 1. \quad (35)$$

2. 雑音の強調を抑えるために、劣化系の伝達関数が零、もしくは殆んど零の空間周波数、 f_{x_p} を修正フィルタにおいて遮断すること。すなわち、

$$\left(\sum_{k=0}^n a_k f_x^k \right)_{f_x=f_{x_p}} = 0, \quad (36)$$

$$p = 0, 1, \dots, P.$$

また、(31)式の理想とする系の伝達関数、 $R(f_x)$ としては、

$$1. \quad R_1(f_x) = 1 \quad (37)$$

2. Hanning ウィンドウ関数

$$R_2(f_x) = \begin{cases} 1 & \text{for } |f_x| \leq \frac{1}{2\Delta x} - a, \\ \frac{1}{2} + \cos \frac{\pi}{a} \left\{ |f_x| - \left(\frac{1}{2\Delta x} - a \right) \right\} & \text{for } \frac{1}{2\Delta x} - a < |f_x| \leq \frac{1}{2\Delta x}, \end{cases} \quad (38)$$

3. Weiner フィルタによつて修正された系の伝達関数

$$R_3(f_x) = \frac{|H(f_x)|^2}{|H(f_x)|^2 + \frac{\sigma_n}{\sigma_s}}, \quad (39)$$

ただし、 σ_s 、 σ_n は、信号、及び雑音のパワー・スペクトルを表わす。

等が考えられる。 $R(f_x)$ として、1.を利用すれば、微分演算はインバーソ・フィルタに近似される。2.は、ウィンドウ関数の一種であり、高周波雑音を抑制し、エッジにおけるリングングの発生を抑える。ウィンドウ関数としては、2.のHanning関数に限らず、種々の関数が提案されている。⁶⁸ 3.は、多項式による、Weinerフィルタ⁵⁵への近似を意味する。流れ写真や焦点はおれ像の修正においては、高周波雑音に限らず、中間周波数領域の雑音の増幅が顕著であり、その抑制が必要である。この場合、 $R(f_x)$ として、3.の利用が望ましい。当然、Wienerフィルタに限らず、Homomorphicフィルタ²⁸や、Backus-Gilbertフィルタ⁶¹等の利用も可能である。

以下に、いくつかの計算結果を示す。Fig. 26は、大気のゆらぎによつて劣化した像に対して、その、2次、4次、6次、及び8次微分の線形結合による修正を施した結果の伝達特性(Fig. 26(a))と、PSF(Fig. 26(b))を示したものである。Fig. 26(a)において、劣化系のOTF(破線)はGauss関数であり、これに対し、近似すべき理想系の伝達関数(点線)を、 $R_1(f_x) = 1$ とした。また、拘束条件としては、修正前後の全光量が不変であることを導入した。Fig. 26では、当然、高次微分利用の結果の修正された伝達関数が、より理想系の伝達関数に近づいているが、それ以外の処理後

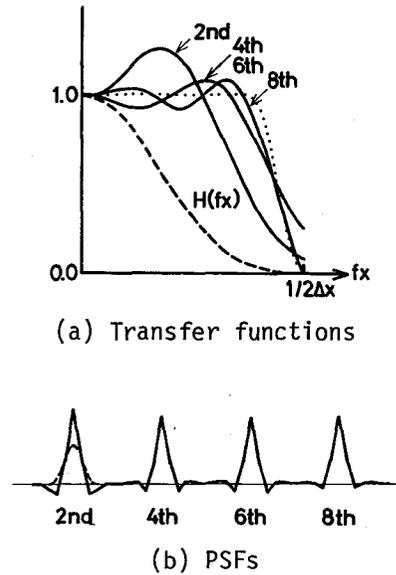
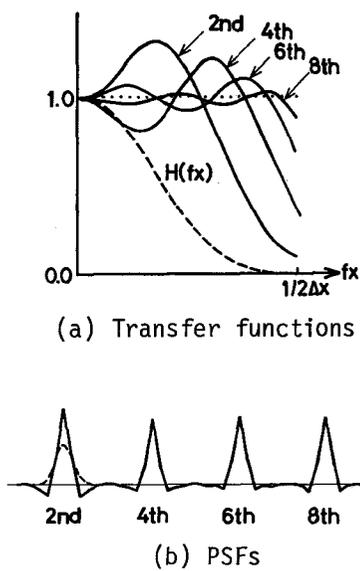


Fig. 26 Transfer functions and PSFs of a Gaussian blur system (broken line) and those for the systems restored by the Linear combinations of 2nd, 4th, 6th and 8th derivatives under the constraint of $f_0 = 1$, in which the transfer function of the desirable system (dot line) has unity all over entire spatial frequency region.

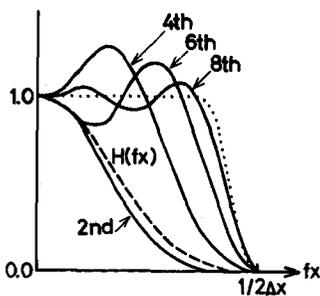
Fig. 27 Same as Fig. 26, but the transfer function of the desirable system is Hanning window function expressed by Eq. (38).

のPSFを比較すれば、その程変わらず、2次以下の微分の組合せによっても、かなりよく、修正されていることがわかる。Fig. 27は、Fig. 26と比べて、理想系の伝達関数だけを変えて、計算した結果である。理想系の伝達関数としては、前記、2. のHanning関数を用いた。修正結果のPSFは、Fig. 26の場合と殆んど変わらないが、これらの伝達特性は、高周波数領域において、減衰していることにより、高周波雑音の強調は、かなり抑えられる。

Fig. 28は、(35)、(36)式の2つの拘束条件の下で解いた結果である。ここで、(36)式の f_{xp} と12. 最大空間周波数、 $\pm 1/2\Delta x$ を選定した。

修正された伝達関数が、 $f_x = \pm 1/2\Delta x$ において必ず零であることより、高周波雑音は、Fig. 27の場合より完全に抑圧される。Fig. 28(b)において、2次微分以下の組合せによる処理結果は、雑音を考慮するあまり、劣化PSFよりさらに劣化してしまっている。しかし、4次微分、あるいはそれ以上の次数の微分を用いた結果では適正な修正が行なわれている。

雑音を考慮した微分演算として、もうひとつ、3.3で述べた、平滑化微分の利用が考えられる。Fig. 29は、Fig. 26と同様に、理想系として、 $R_1(f_x) = 1$ を用い、拘束条件として $f_0 = 1$ を導入しただけの修正例である。ただし、Fig. 26では、雑音の考慮が一切なされていないのに対し、ここでは、微分のかわりに平滑化微分（適合範囲7点、6次多項式適合）を利用して修正したことにより、その伝達特性に示されるように、高周波雑音が抑圧される。Fig. 30は、同様に、適合範囲9点の6次多項式適合の平滑化微分の利用による修正例である。その伝達特性より、Fig. 29と比べて、より一層、高周波数成分が抑圧されることが確認できる。この2つの平滑化微分利用の修正結果のPSFを観察すれば、Fig. 28に示した拘束条件導入による雑音抑制を考慮した修正法と比較して、低次（2次）微分の利用によって修正が行なわれていることがわかる。また、その伝達

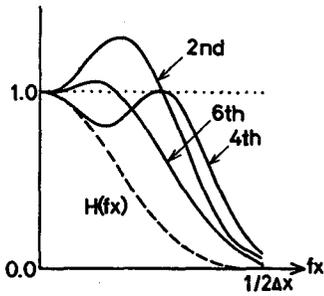


(a) Transfer functions



(b) PSFs

Fig. 28 Same as Fig. 27, but under two constraints of $f_0 = 1$ and $f_{\pm 1/2\Delta x} = 0$.

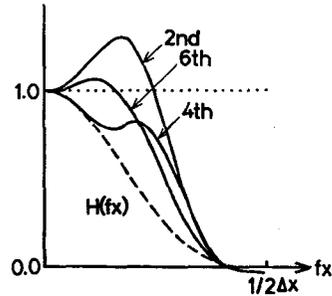


(a) Transfer functions



(b) PSFs

Fig. 29 Transfer functions and PSFs of a Gaussian blur system (broken line) and those for the systems restored by the weighting series for differentiations of 6-th degree polynomial curve fit to 7 points.



(a) Transfer functions



(b) PSFs

Fig. 30 Same as Fig. 29, but used weighting series are for the differentiations of 6-th degree polynomial curve fit to 9 points.

特性は、理想系の伝達関数を $R_1(fx) = 1$ としているにもかかわらず、Fig. 28と比較的類似した形を示している。平滑化微分を採用すれば、Lagrangeの未定乗数法による(34)式を解く必要が無く、対話形式によって、平滑化の適合範囲と適合すべき多項式を随時、選択してやればよい。その際、平滑化微分のための重み系列は、予め作表して、コンピュータのメモリが補助メモリに格納しておく。

以上、画像に微分演算を施すことによって画像修正が行なえることを示したが、これらの実験例及びその効果は、次節、並びに第5章において示す。そこを用いた手法は、最後に述べた平滑化微分を用いた処理であり、実験は、対話形式によって進めた。

なお、本節で計算した例では、すべて、劣化系モデルとして、大気の中らぎによる劣化を想定した。しかし、この手法は、劣化系の伝達関

数をそれに限定するものではなく、他の種々の劣化系の修正に対しても適用できる。ただし、流れ写真に関しては、Harris⁶⁴ 及び Swindell⁶² の提案したデジタル・フィルタが、本節の手法より優ると考えられる。しかし、これらの手法も、微分演算の一種であることは、注目に値する。

3.4.3 対話型処理への応用

3.4.1. 及び 3.4.2 節において、画像強調及び画像修正が、微分演算によって行なえることを述べたが、本節では、特に、微分演算が対話型画像処理に適していることについて、実験結果を通して示す。

直観的にも、微分処理は簡単な演算であるから、対話型処理に適することは予想される。事実、比較的低次の微分演算の組合せによる微分処理は、

1. パラメータは、各次微分に掛る係数、平滑化のための適合すべき次数、適合範囲だけをよく、非常に簡単である。
2. 対応する重み系列の要素数が非常に少ないため、処理時間が短くて済む。

という、2つの特長を有してあり、これは、3.1節で記述した、対話型処理に要求される機能と、完全に一致する。

Fig. 31に、微分演算による対話型の画像修正の実験例と、それに用いた重み系列を示す¹。Fig. 31(a)は、第2章で述べた、試作システムにおいて、ビティコン・カメラに付属しているカメラ・レンズをティフォーカス状態にして、テスト・チャートを撮像し、コンピュータに入力した像である。これは、128 × 128画素から成る。ここで、実験者のもつ、劣化に関する *a priori* な知識は、ティフォーカスであるということだけであり、そのティフォーカス量などの定量的なことは、一切知らない。この状態から、対話形式による修正を試みた。Fig. 31(a)を観察すれば、とにかく高周波成



(a)



$$\begin{array}{|c|} \hline -1 \\ \hline -1 & 5 & -1 \\ \hline -1 \\ \hline \end{array}$$

(b)



$$\begin{array}{|c|} \hline -2 \\ \hline 1 \\ \hline -2 & 1 & 8 & 1 & -2 \\ \hline 1 \\ \hline -2 \\ \hline \end{array}$$

(c)



$$\begin{array}{|c|} \hline -5 \\ \hline 0 \\ \hline 3 \\ \hline -5 & 0 & 3 & 14 & 3 & 0 & -5 \\ \hline 3 \\ \hline 0 \\ \hline -5 \\ \hline \end{array}$$

(d)

Fig. 31 Experimental results of interactive image restoration by the technique of smoothing and differentiation of an image.

(a) Defocused image (128x128 pixels).

(b) Processed result and used weighting series for the first trial.

(c) Intermediate processed result and used cross weighting series.

(d) Final processed result and used cross weighting series.

分の減衰が確認できるため、まず、観測像から、その Laplacian を減算することに対応する重み系列を入力像にコンボリューションする。その結果を Fig. 31(b) に示す。Fig. 31(b) を観察すれば、高周波雑音の強調が見られるが、信号成分の回復は見られない。これは、もともと原像にどれ程高周波な情報が含まれていなかったためか、あるいは、レンズの OTF によって原像の高周波成分が非常に減衰してしまったためと考えられる。いずれにしろ、観測像の中には、どれ程高周波の信号成分は殆んど含まれていない。Fig. 31(b) で、信号成分が殆んど強調されなかったことを確認して、今度はむしろ、中間周波数成分を強調して、雑音成分の増幅を防ぐため、高周波成分を抑えることを考え、Laplacian のかわりに、3次式5点適合の平滑化微分を利用した。Fig. 31(c) に、その処理結果と、用いた重み系列を示す。雑音の強調は軽減し、口元、目元等、僅かに修正され、シャープになっているのが観察できる。さらに、より大幅な修正を望むため、伝達関数の空間周波数領域におけるセークがより低周波数側にある、3次式7点適合の平滑化微分を利用した。その結果、Fig. 31(d) に示すように、弱くないリングを伴いながら、Fig. 31(a) の入力像から遙かに修正された処理像を得た。この修正において費した処理時間は、ソフトウェアを利用して、1回の処理に対し、10秒から1分であった。ここを強調すべきことは、Fig. 31(a) の劣化像から、その劣化に関する *a priori* な知識がほとんど無い状態で、Fig. 31(d) の修正像が得られたのは、人間の判断能力と、コンピュータの計算能力の相互の協力による対話型処理を行なった結果であるという点である。

3.5 考 察

対話型処理に要求される機能を述べ、それに適したディジタル処理方法のひとつとして、微分演算の応用を考察した。

微分演算による処理は、

1. パラメータが極めて少なく、またそれぞれのパラメータの果たす役割が明らかであるので、実験者による、その選択が容易である。
2. 演算時間が短く、メモリ容量を余分に必要としないので、小型システムによる高速処理が可能である。

という特徴をもつ。その実際の実験への応用例は、第4章、及び第5章で数例、示す。

3.4.2節で述べた画像修正法において、フィルタ関数を多項式近似するのでなく、フーリエ級数で近似すれば、一般的な画像修正のための、ディジタル・フィルタの設計法として応用できる。⁶⁹ すなわち、フィルタ関数を、

$$G(f_x, f_y) = \sum_{k=-m}^m \sum_{l=-n}^n \omega_{kl} \exp[-2\pi j(k\Delta x f_x + l\Delta y f_y)], \quad (40)$$

とし、

$$U = \int_{-1/2\Delta x}^{1/2\Delta x} \int_{-1/2\Delta y}^{1/2\Delta y} |G(f_x, f_y) \cdot H(f_x, f_y) - R(f_x, f_y)|^2 df_x df_y, \quad (41)$$

の評価式を、 ω_{kl} ($k = -m, \dots, -1, 0, 1, \dots, m$, $l = -n, \dots, -1, 0, 1, \dots, n$) について、適当な拘束条件の下で最小化する。

また、拘束条件として、3.4.2節で記述した等式条件以外に、不等式で表現される条件の導入も可能である。そのような条件としては、以下の条件等が考えられる。

1. 修正像において、リンギングが生じないように、修正されたPSFが負値をもたないこと。すなわち、

$$h * g \geq 0 \quad (42)$$

より、それぞれを離散的に表現して、

$$s_{k\ell} = \sum_{k'=-m}^m \sum_{\ell'=-n}^n \omega_{k'\ell'} h_{k-k', \ell-\ell'} \geq 0 \quad (43)$$

$$k = -m, \dots, -1, 0, 1, \dots, m,$$

$$\ell = -n, \dots, -1, 0, 1, \dots, n.$$

2. 修正された系の伝達関数の値が、特定の周波数、 (f_{x_p}, f_{y_p}) における範囲内に制限されること。すなわち、

$$c \leq H(f_{x_p}, f_{y_p}) \cdot G(f_{x_p}, f_{y_p}) \leq d \quad (44)$$

$$p = 0, 1, \dots, P.$$

特に、伝達特性に位相の反転をもたらしなすために、 $c = 0$ の拘束条件を、できるだけ多くの周波数にわたって設けることは、意味あることである。

これらの拘束条件の下で、(41)式の \mathcal{D} を最小化するためには、線形計画法を用いればよい。あるいは、さらに拘束条件として、非線形な式を導入するならば、各種非線形計画法を用いることができる。このように、種々の拘束条件下で、(41)式の \mathcal{D} を最小化することにより、3.1節で述べた、従来の提案されている手法によって解かれた、有限な広がりをもつ重み系列より、一般的で、かつ実用的な重み系列を得ることができるようである。

実際の実験では、ディジタル・フィルタは、予め、種々の劣化系に対して計算し、テーブル化しておき、対話型処理において、実験者は、そのテーブルの選択を行なうことになる。

本章では、従来の手法と同様に、重み系列の広がりをも、できる限り小さくすることを目的としていたが、正しくは、重み系列を構成する要素数が少ないことが望ましい。通常、要素数が少ないことは、重み系列の広がりが小さいことに対応するが、流れ写真等、その伝達関数が、空間周波数領域において周期性をもっている場合は、その周期に対応した空間面との間隔毎に値をもつ重み系列を利用する方が妥当であると考えられる。すなわち、それは、空間的広がりは大きいが、値をもつ重みが、とびとびに並び、残りの重みは、すべて零値をとるような系列であり、Swindell⁶²、Harris⁶⁴の、流れ写真に対する独特のディジタル・フィルタも、丁度この形である。しかし、それらは、Swindellがその論文⁶²中に記しているように、“発見的な”重み系列であり、一般化した考案は行なわれず、今後のディジタル・フィルタ設計の一つの残された主題であると考えられる。

本章で述べたディジタル処理法は、すべて、コンボリューション演算を利用しており、画像修正の問題にあてはめれば、修正系は、線形で、スペース・インバリアントである。1.4節で述べたように、LSI系で修正されるべき劣化系は、やはりLSIに限定される。実際に、観測される劣化像は、LSI系によるものもあるが、そうでない場合も十分多い。第6章において、著者が提案する画像修正法は、この制限を緩和し、より一般化した、しかも、対話型処理に適した手法である。

第4章 医用画像への対話型画像処理の応用

4.1 緒言

医学関係は、画像処理の応用研究の最も盛んな分野のひとつであり、CT (Computed Tomography)、超音波診断をはじめとし、多くの実用的成果をあげている。⁷⁰⁻⁷⁵ しかし、観測対象(人体)が3次元構造を成していること、人体に損傷や衝撃を与えることが許されないため、撮影条件が不十分であること、等の要因によって、その画質は悪いことが多い。そこで、画像の改善の要求は、医用画像処理にとって、最も基本的でありながら、かつ、重要な意義をもっている。本章では、第2章、並びに第3章の応用例として、試作した画像処理システムを用いた、対話形式による医用画像(X線写真像、顕微鏡像、電子顕微鏡像)の改善処理について記述する。

4.2 微分による微細構造抽出処理

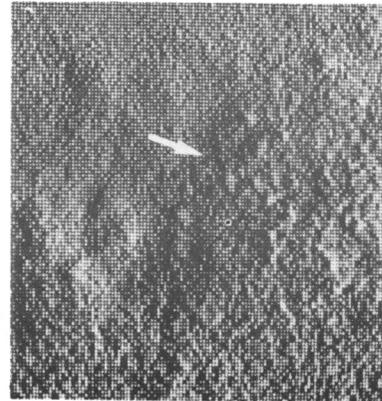
第3章を考察したように、画像の微分は、画像に含まれる高周波の情報を強調し、低周波から成る背景の情報を消滅させる。そこで、画像を微分すれば、試料の輪郭や微細構造が抽出され、実験者は、その試料に対する認識・判断を深めることができる。本節では、3.3節で記述した平滑化微分処理を医用画像に応用した実験例を示す。

4.2.1 乳癌X線写真の微分処理

Fig. 32は、女子胸部X線写真像の微分処理の実験結果である。被処理像 (Fig. 32(a)) の矢印方向に点在する十数個の小粒子群が、乳癌であるが、それは、画面内では非常にコントラストが低く、上から下に向って、黒から白へ緩く変化する背景に埋もれている。これを肉眼で検出するためには、高度な技術と繊細な注意が要求され、時には勘に頼って誤まった判断をする可能性もある。Fig. 32(b)は、Fig. 32(a)を水平方向に1次微分した結果に、画面全体に一定のバイアスを足して、表示した像である。ここでは、背景を形成していた低周波の情報は完全に消滅し、人間の認識に必要な高周波情報のみが通過し、しかも増幅されている。そのため、高周波の情報のコントラストが高くなり、乳癌の検出が容易になっている。なお、ここでは、Fig. 17で示した単純な差分を行なったので、高周波雑音が強調され、処理像のSN比を低下させる危険性がある。そのため、この実験では、前処理として、32画の積算平均を行なった。



(a)



(b)

Fig. 32 Experimental result of extraction of mammary cancer from an x-ray photograph.

(a) Original sampled image (128x128 pixels).

(b) 1st derivative image of (a)

4.2.2 指骨X線写真の微細構造抽出処理

Fig. 33は、人間の左足親指のX線写真の微細構造の抽出を試みた実験例である。128×128に標本化された被処理像 (Fig. 33(a)) の白い部分が骨であり、下方の切れ目か。その第1関節である。 Fig. 33 (b) & (c) は、その平滑化

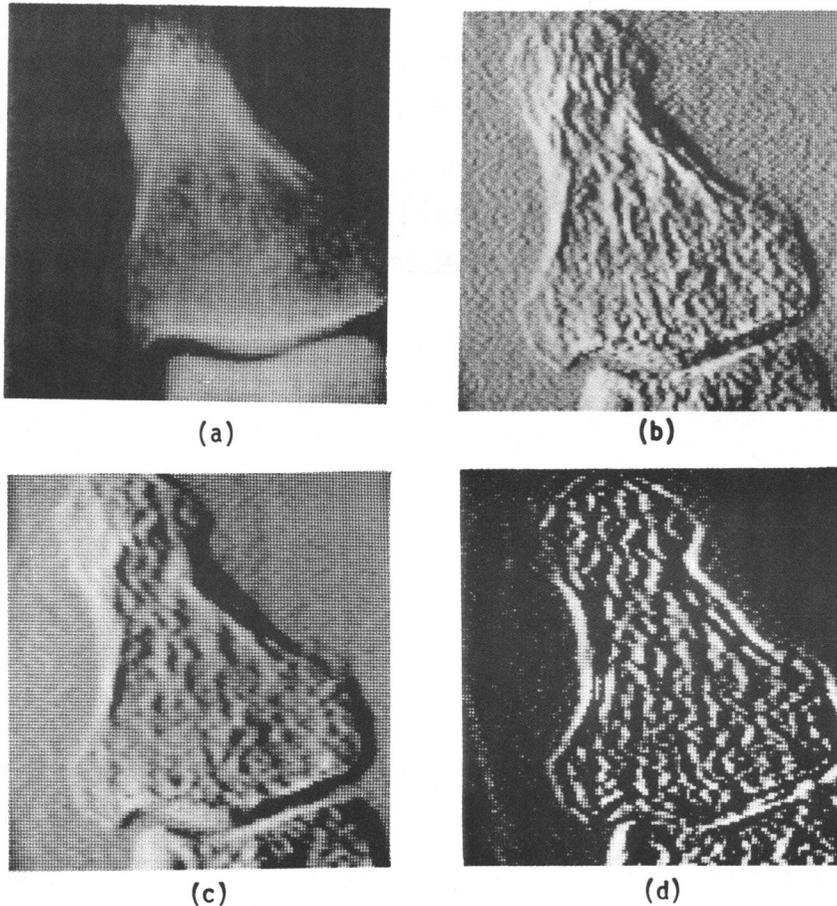


Fig. 33 Experimental results of feature extraction in an x-ray photograph of a terminal phalanx.

- (a) Original image (128x128 pixels).
- (b) 1st derivative of (a) convolved with the weighting series shown in Fig. 18(a).
- (c) Same as (b), but with the weighting series shown in Fig. 18(b).
- (d) 2nd derivative of (a) by the technique of smoothing and differentiation.

1次微分像である。微分結果は一般に負値をもつため、Fig. 32(b)と同様に、画面全体にバイアスを足して表示した。これら1次微分像は、人間の目には、写真左方からの光線に照明された立体像のように観察される。また、その立体像の高さが、強度に比例して観察されるため、骨全体が、背景より浮き上がって見え、結局、失われたのはその低周波成分が、人間の目、すなわちHVSによって、うまく補なわれ、HVSを積極的に利用した対話型処理への有用性を示している。Fig. 33(b)を得るための処理には、3次多項式を5点に適合させる平滑化1次微分の重み系列(Fig. 18(a))が、また、Fig. 33(c)では、3次多項式7点適合の平滑化1次微分の重み系列(Fig. 18(b))が用いられた。Fig. 18の伝達特性が示すとおり、Fig. 33(c)の方が、Fig. 33(b)より高周波成分が抑圧されていることが、図より観察できる。Fig. 33(d)は、3次多項式7点適合の1次元(水平方向)平滑化2次微分像である。2次微分像においては、輪郭、微細構造のみが高い強度をもって現われる。対話型処理の特徴は、このように、1枚の原画像から、コンピュータが種々の変換像を即座に観測者に提供し、観測者は、1枚の原画像だけでなく、複数枚の異なる処理結果から、総合的に、原画像を認識・判断できる点にある。

4.2.3 顕微鏡像の微分処理

X線写真像における処理と同様の処理を、光学顕微鏡像についても試みた。Fig. 34(a)は、鼠、頭部の顕微鏡像を、直接、ゼティコン面に結像して入力した像(128×128画素)である。試料の像コントラストが非常に低いため、Fig. 34(a)では、前処理として、画像の強度が、システムのもつダイナミック・レンジ(6ビット=64濃淡レベル)一杯に表現されるように、コントラストの改善を施している。Fig. 34(b)は、その1次微分像であり、処理には、3次多項式7点適合の重み系列が用いられた。Fig. 34(a)と比較して、左上部等における低コントラストの微妙な変化(図中、矢印)についても、容易に確認することができる。

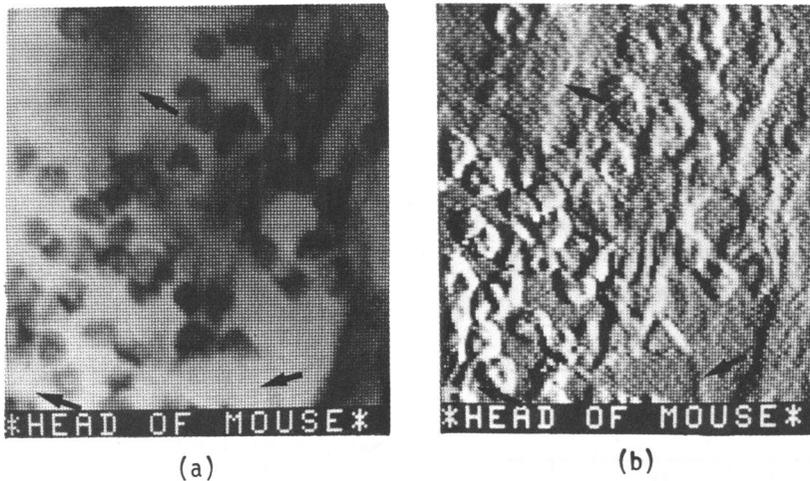


Fig. 34 Experimental result of contrast enhancement in a microscopic image of cells of the head of a mouse.
 (a) Original image (128x128 pixels).
 (b) Processed image by the technique of smoothing and differentiation.

4.2.4 局所平均減算処理

ある像の Laplacian とは、像の各点において、その強度と、その周りの微小な領域の強度の平均値との、差をとることである。ここでは、“微小な領域”をもう少し一般化して考え、各点の強度と、その近傍（微小ではなく、ある程度の広がりをもつ）の平均値（これを、局所平均 (local average)¹⁹⁾と呼ぶ）との差を求める処理を行なった。

Fig. 35 は、局所平均減算処理の実験結果の一例である。Fig. 35 (a) は、骨盤近傍の X 線写真の標本化入力画像 (128 × 128 画素) である。この像に対して、各点において、その周囲、7 × 7 画素の局所平均を求め、それを、Fig. 35 (a) の原像から減算した結果が、Fig. 35 (b) である。骨盤の輪郭や、血管がよく抽出されている様子が観察できる。実際には、これは、Fig. 35 (c) に示す重み系列のコンゾリューションによって実行される。この処理は、その効果が、多項式適合の平滑化微分処理に類似しているが、

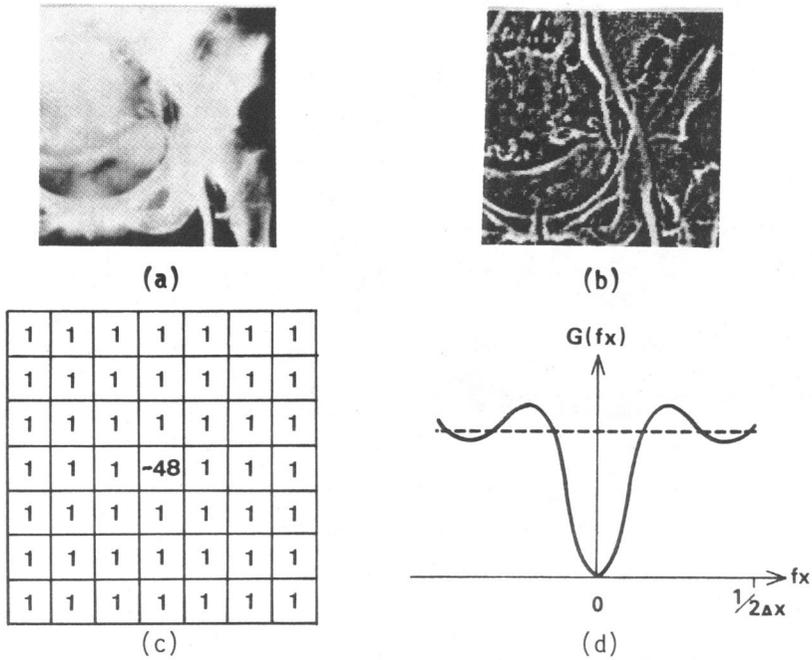


Fig. 35 Experimental result of local average subtraction of an x-ray photograph.

(a) Original image (128x128 pixels).

(b) Result of local average subtraction from (a).

(c) Weighting series (7x7 pixels) for local average subtraction.

(d) Transfer function of the weighting series of (c).

実際には、局所平均減算は、Fig. 35 (d) に示すように、低周波成分のみを遮断する、高周波フィルタ特性をもっている。

4.3 非線形な強度変換処理によるコントラストの改善

非線形な強度変換 (intensity mapping) とは、像の各位置の強度を、あるスレイ・スケールから、他のスレイ・スケールに変換する非線形非記憶 (non-linear memoryless²⁵) な処理法である。これは、コンピュータにとっては、余りにも簡単すぎるため、フィルムのガンマ補正、log/exp 変換等、一部の物理的意味のある処理を除いて、見失われがちであるが、その積極的利用は、多くの意外な効果を与える。Andrews は、いくつかの非線形強度変換の画像強調への応用を考察している。^{12,17} この処理は、point-to-point 処理であるため、画像の入力速度に追従して行なうことが可能であり、また、パラメータの変更も簡単であるため、試作したシステムを用いて、ほぼ実時間で実行できる。対話形式によつてこの処理を行なえば、種々の変換テーブルによつて強度変換された画像を、即座に、観察者に提供することが出来る。

4.3.1 Bits removal によるコントラストの強調

緩かにその濃度に変化する画像の濃度分布の認識は、HVS によつて非常に不得手である。MSB (Most Significant Bits) removal 処理¹⁷ は、ディジタル・コンピュータによつては、極めて簡単な処理であり、しかも、HVS に対しても効果的な結果を与える。

一般に、強度変換処理は、非線形非記憶関数、 $I\{\cdot\}$ を用いて表わされ、入力像、 $i(x, y)$ と、処理像、 $\hat{i}(x, y)$ は、次式の関係で与えられる。

$$\hat{i}(x, y) = I\{i(x, y)\} \quad (45)$$

ここで、MSB removal を行なう $I\{\cdot\}$ は、入力像の最大強度値よりも十分小さい整数、 B (ただし、 B は、2 のべき乗) に対して、次式で表現される。

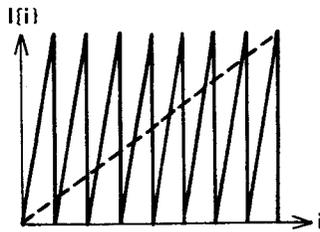


Fig. 36 Characteristic curve for 3 most significant bits removal.

$$I\{i(x,y)\} = i(x,y) - k(x,y)B \quad (46)$$

ただし、 $k(x,y)$ は、次の条件を満足する整数関数である。

$$\left. \begin{aligned} i(x,y) - k(x,y) \cdot B &\geq 0 \\ i(x,y) - \{k(x,y) + 1\} \cdot B &< 0 \end{aligned} \right\} \quad (47)$$

Fig. 36は、(46)式及び(47)において、 $B=8$ とした場合の、MSB removalの特性曲線を示している。この図によれば、 i 座標における僅かな強度変化が、新しい座標、 I というでは大きな強度変化に対応しており、MSB removal処理が、微妙なコントラストの変化をもつ像に対するコントラストの強調をもたらすと考えられる。この処理は、コンピュータ内では、各画素の上位3ビットを捨てることにより、極めて簡単に実現できる。

Fig. 37は、Fig. 36の特性曲線による、3MSB removal処理の実験結果である。Fig. 37(a)の入力像(女子乳房側面のX線写真像)に対し、コンピュータ内で、各画素に対して最上位3ビットを捨てることにより得た結果が、Fig. 37(b)である。Fig. 37(a)では観察が困難であった微妙な濃度変化が、Fig. 37(b)では、大きな強度変化をもって表示されている。また、Fig. 37(a)での広域にわたる濃度差は、Fig. 37(b)では縞の本数により定量的に確認できる。Fig. 37より実験結果より、MSB removal処理によるコントラストの強調処理の、HVSへの多大の効果が認識できると思われる。

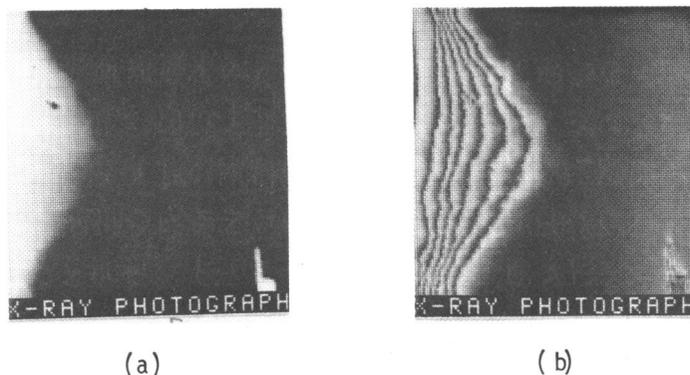


Fig. 37 Experimental result of 3MSB removal of an x-ray photograph.
 (a) Original image (128x128).
 (b) Processed image.

4.3.2 Histogram equalization による画像強調

画像の濃淡レベルに関する統計的性質に依存した強度変換法として知られる histogram equalization^{75,76}は、像に含まれる情報のエントロピーを最大にする画像強調処理法として、極めて効果的な手法である。その原理を、Fig. 38の説明図によって簡単に説明する。入力画像の強度分布は、一般に Fig. 38(a)のヒストグラムに示されるように、その強度レベルに偏りがある。これに対して、Fig. 38(b)に示されるような、入力像のヒストグラムに依存した特性曲線によって、非線形な強度変換を施す。こうして得られる像は、Fig. 38(c)に示されるような、各強度レベルの出現頻度が一定であるヒストグラムをもつ。Fig. 38(b)の特性曲線は、Fig. 38(a)の入力画像のヒストグラムを積分することによって簡単に得られ、累積ヒストグラム (cumulative histogram) と呼ばれる。この特性曲線を用いれば、入力画像の、出現頻度の高い強度レベルに対しては細分され、出現頻度が低い強度レベルに対しては荒く分割されて、新たな、各強度レベルの出現頻度が等しいヒストグラムをもつ処理像が得られる。この処理結果像は、ハイナミック・レンジ一杯に表現され、強度レベルに偏りのない像となる。また、その強度レベルに対する確率が一定であることより、処理結果の像は、最大エントロピーをもつことになる。⁷⁷

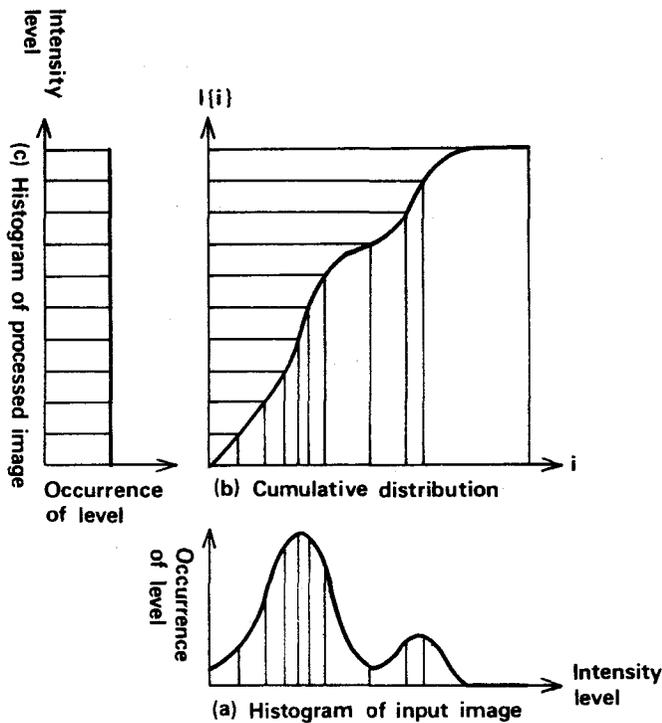


Fig. 38 Illustration of nonlinear intensity mapping by histogram equalization.

Fig. 39. 及び Fig. 40に、histogram equalization 処理の実験結果を示す。 Fig. 39(a)は、パラインフレエナ・ウィーレスの電子顕微鏡写真(加速電圧 75kV、倍率 66,000X)の入力像(128 × 128画素)と、そのヒストグラムを表示したものである。 Fig. 39(a)に対して、histogram equalizationを行なった結果と、その像のヒストグラムを、Fig. 39(b)に示す。 Fig. 39(b)では、Fig. 39(a)と比較して、コントラストの改善が適正に行なわれていることが観察できる。 試作システムにおいては、各画素は、TVカメラより 4096 (12ビット)の濃淡レベルの精度で入力されるのに対し、CRTモニタ上には、64 (6ビット)の精度で表示される。 Fig. 39(a)は、入力像の上位6ビットで表示した像であり、Fig. 39(b)は、入力画像より12ビット精度のヒストグラムをつくり、これを積分した特性曲線によって、入力画像を6ビットに変換して表示した像である。

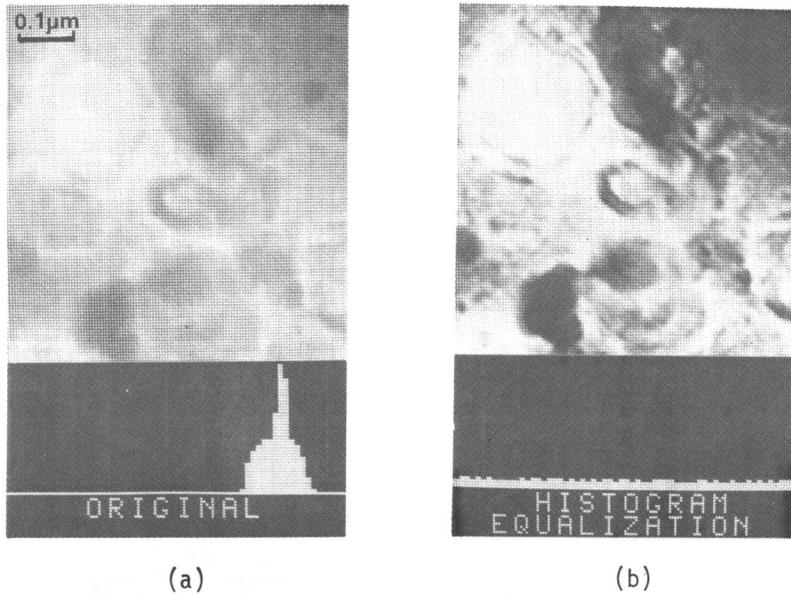


Fig. 39 Experimental result of histogram equalization of an electron micrograph of parainfluenza virus type I taken at 75kV, 66,000X.

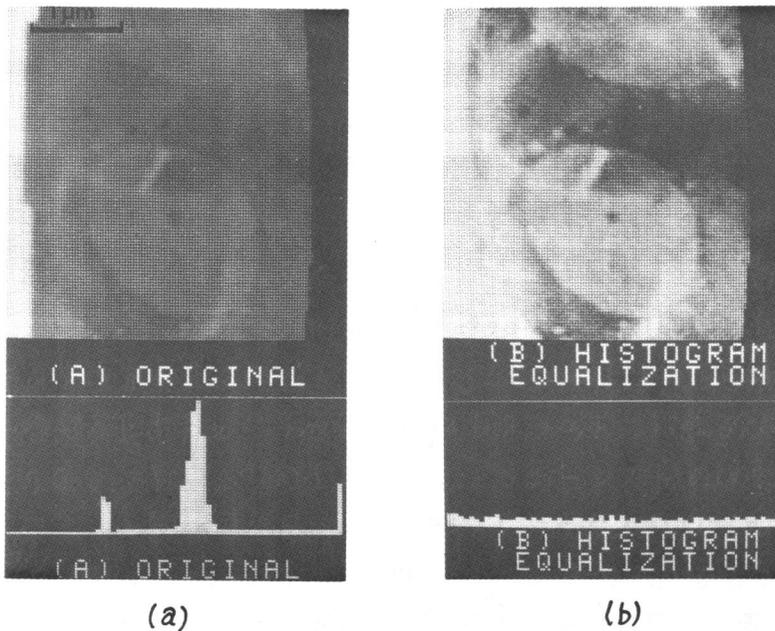


Fig. 40 Experimental result of histogram equalization of an electron micrograph of erythrocyte.

Fig. 40は、赤血球厚片の電子顕微鏡写真(加速電圧75kV, 倍率14,000×)の標本化像(128×128画素)と、そのヒストグラムである。これは、中央部の低コントラストの試料像と、その両側の、強度レベルが各々大きく隔った白と黒の像から成っている。このFig. 40(a)において、両側の情報を飽和させることなく、しかも、中央部の像のコントラストを改善するために、histogram equalizationを行なった。処理結果、Fig. 40(b)においては、Fig. 40(a)と比べて、両端の情報を失なうことなく、中央部のコントラストが十分改善されしており、その微妙であったコントラストの変化も、容易に観察することが出来る。

4.3.3 局所的histogram equalizationによる画像強調

Histogram equalizationは、強度レベルに対しては、情報のエントロピーを最大にするが、画像の空間的位置に対しては、何ら考慮されていない。そのため、各強度レベルが、等確率で出現しても、空間位置的には、それが偏在している可能性があり、その場合、空間位置に関しては、情報のランダム性は低い。この欠点を克服するために、Ketchamは、局所的なhistogram equalization処理を提案した¹⁸。これは、各画素値を、それを中心とする近傍の小領域において、histogram equalizationしたときの処理値に変換する方法であり、これによれば、画面内、どの小領域においても、その範囲内のヒストグラムは一定であり、情報のエントロピーは最大である。

Fig. 41に、局所的histogram equalizationの実験例を示す。Fig. 41(a)は、胃近傍のX線写真を入力した画像(128×128画素)である。Fig. 41(b)は、Fig. 41(a)の画面全体に対して、histogram equalizationを行なった結果であり、コントラストが改善しているが、局所的に見れば、等強度、あるいは強度の似かよった情報が偏在している。これに対して、局所的なhistogram equalizationを行なった結果が、Fig. 41(c)-(f)である。Fig. 41(c)は、3×3画素の正方領域内での、局所的histogram equalization

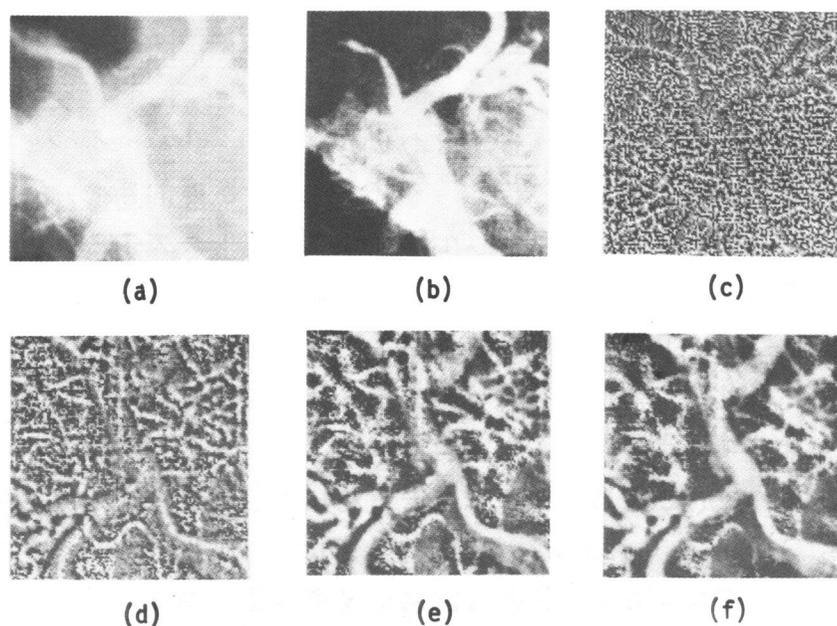


Fig. 41 Experimental results of local area histogram equalization of an x-ray photograph.

- (a) Original image (128x128 pixels).
- (b) Processed image by full frame histogram equalization.
- (c) - (f) Processed images by local area histogram equalization in the local area with; (c) 3x3 pixels, (d) 7x7 pixels, (e) 17x17 pixels and (f) 31x31 pixels, respectively.

を行なった結果である。同様に、Fig.41(d)では、 7×7 画素、(e)では、 17×17 画素、そして、(f)では、 31×31 画素の正方領域を用いた。それらにおいては、Fig. 41(b)のように、強度レベルの近い情報の空間的偏在はなく、像の空間的なランダム性の高揚が観察できる。また、局所領域のサイズによって、得られる結果は大きく異なり、どれが最良であるか、一概には云えない。観測者が強調を望む情報の種類によって、最適な結果は異なる。そこで、ひとつの処理結果のみを提示するよりも、こゝら、種々の処理結果を示し、対話型処理によって、観測者が総合的に判断できるようにすることが望ましいと考えられる。

4.4 Edge-sharpening 処理

観測画像と、その Laplacian 像の組合わせが、edge-sharpening の効果をもたらすことは、3.4.1 節で述べた。本節では、その医用画像への応用例を示す。また、この処理は線形フィルタリングのみとつづがあるため、コントラストの改善はなされない。そこで、非線形非記憶な histogram equalization を後処理として行なった。

Fig. 42 に、その実験結果を示す。Fig. 42 (a) は、腰骨 2 番近傍の、少しぼけた X 線写真像 (128×128 画素) である。この像から、その平滑化 Laplacian (3 次多項式 7 点適合) 処理像を、2 : 1 の比で減算することによって、edge-sharpening 処理を行ない、さらに histogram equalization を行なった。Fig. 42 (b) がその結果である。骨の輪郭や微細構造がよく強調されており、コントラストの向上も伴って、Fig. 42 (a) より、はるかに観察しやすい像となっている。また、3 次元的に、骨が後方に突起している部分 (図、中央) も、Fig. 42 (b) においては、鮮明に観察される。

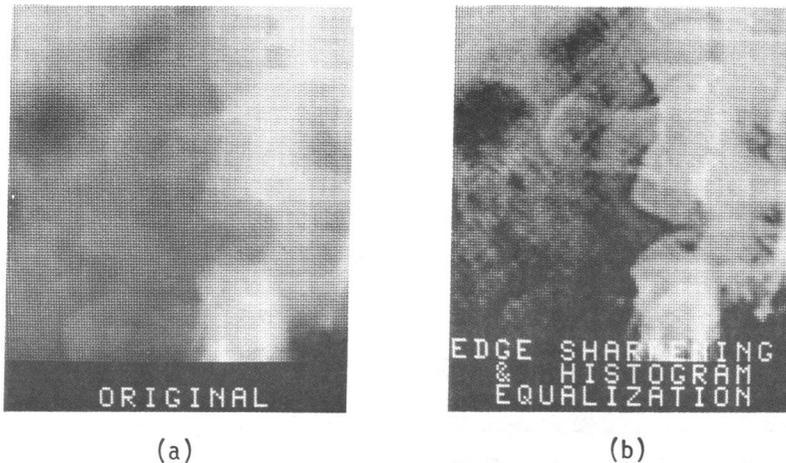


Fig. 42 Experimental result of edge sharpening and histogram equalization of an x-ray photograph.
 (a) Original image (128x128 pixels).
 (b) Processed image.

4.5 考 察

医用画像への対話型画像処理の応用性を、実験結果を通して示した。線形な空間フィルタリング処理として、平滑化微分を、また、非線形非記憶な処理として、histogram equalizationを用いた処理結果を主に示した。コントラストの改善、及び、非線形な特徴抽出処理については、記述した以外の多くの実験を試みたが、ここでは割愛する。微分処理に要する時間は、重み系列の要素数と、画像の画素数で決定されるが、本章で示した実験は、TVカメラからの被処理像(128×128画素)の入力時間(2秒)を含めて、2秒(差分処理)から、45秒(8回の積算平均と、7×7画素の十字形重み系列のソフトウェアによるコンボリューション処理)である。一方、非線形な強度変換処理は、準実時間で行なえる。Bits removalなど、予め変換テーブルを計算機内に設定できる処理は、画像の入力速度に追従して処理できるため、128×128画素の画像に対して処理時間は2秒であり、histogram equalization処理は、1度目の入力を12ビット精度の変換テーブルを設け、2度目の入力時に、そのテーブルに従って強度変換するため、処理時間は4秒である。ただし、局所的histogram equalizationは、画面内の各画素毎に変換テーブルをつくり直す必要があるため、局所領域を、7×7画素とした場合、40秒、31×31画素とした場合、2分の処理時間を要した。これは、本節で示した実験は、メモリとして12k語のメイン・メモリしか無い場合に行なったため、12ビット精度で画像データをメモリ内に格納できず、各画素を強度変換するテーブルをつくる度に、その周囲小領域の入力を行なったためであり、処理時間の多くを、画像入力に費している。一画面分の12ビット精度の画像を、予めメモリ内に格納しておくことができれば、局所的histogram equalization等の処理も、十分高速化できることになる。

第5章 超高電圧電子顕微鏡写真の画像処理

5.1 緒言

電子顕微鏡の加速電圧を相当に高めれば、電子ビームの照射力が強まり、その結果、従来の電子顕微鏡を用いては観察できなかった厚い試料の像を観察することが可能となる。また、通常の電子顕微鏡では、真空中に置かれて死んだ状態ではしか観察できない生物試料に対しても、超高加速電圧の電子顕微鏡を用いれば、電子ビームの強い照射によって、試料をガス（空気）の入ったカマセルに入れたまま、生存状態で観察できる。このように、超高電圧電子顕微鏡（以下、超高圧電顕）は、人間に観察できる“ミクロ”の世界を広げてくれ、医学・生物学・物理学・化学等、多くの科学分野にわたって、応用されつつある。

しかし、実際に超高圧電顕によって得られる像は、かなり劣化している場合が多く、研究者にとって、これらの像の解釈は、困難を伴う。例えば、厚みに変化のある試料を超高圧電顕で観察すれば、超高電圧で加速された電子ビームが試料の薄い部分を貫通してしまうことより、その部分の像は、バック・グラウンドの強度が非常に高く、コントラストが低下してしまう。その結果、観察される試料像のコントラストは、場所によって大きく変化する。また、超高圧電顕を用いれば、厚い試料の観察が可能となるが、試料の3次元構造が、像面では各々、ティフォーカス値の異なった、何枚もの焦点はおかれ像の重ね合わせとして得られるため、種々の構造の重畳した、見づらい画像となる。さらに、ガスを封入したカマセル中の試料の超高圧電顕写真は、照射電子ビームが、ガス粒子によって散乱されるため、著しく劣化している。

このように、超高圧電顕は、従来の電子顕微鏡からは得ることのできない情報を我々に与えてくれるが、それはしばしば大きく劣化しており、

観察者は、像に含まれる情報の抽出を逸したり、その解釈を誤ったりするおそれがあると思われる。そこで、本章では

1. 画像処理技術の利用によって、研究者、または観察者の超高压電顕写真の解釈・判断、あるいは、必要な情報の抽出、認識を助けること。
2. 1. の結果として、超高压電顕の有用性を上げること。

の2点を目的として、試作したシステムを用い、対話形式によって、画像修正、画像強調、特徴抽出の研究を行なった。^{4,5} 本章で示す実験で用いた電顕写真は、世界で最高の加速電圧をもつ超高压電顕のひとつである。大阪大学超高压電子顕微鏡センター設置の、3 million voltsの超高压電顕電子顕微鏡⁷⁸によって撮影されたものである。

5.2 弯曲した金属結晶の転位像のコントラストの改善

金属結晶の転位像は、電子顕微鏡においては、Bragg条件を満足する回折ビームによって結像し、転位の生じている部分だけが電子ビームを回折しないため、像面において、その形を観察できる。しかし、実際には、金属結晶が僅かに弯曲していれば、試料全体において、Bragg条件を満足することができない。結晶格子列が、弯曲していることにより照射電子ビームとBragg角を満足しない部分では、Bragg角を満足している部分と比べ、その転位像のコントラストは著しく低くなる。通常、このような問題の解決には、試料を少しずつ傾斜させて撮影した何枚もの転位像の電顕写真を、後に貼り合わせて合成する方法がとられる。しかし、それは、非常に時間と労力を要する方法であると考えられる。

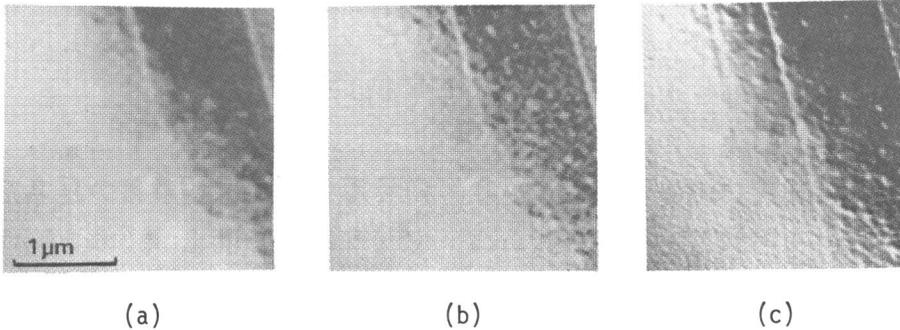


Fig. 43 Experimental results of contrast enhancement of an electron micrograph of copper taken by the HVEM (High-voltage Electron Microscope) at 2MV.
 (a) Original image (128x128 pixels).
 (b) Intermediate result processed by edge-sharpening operation.
 (c) Final result obtained by histogram equalization.

著者は、試作したシステムを用い、2種のディジタルな手法により、このコントラストが画面内各部で著しく異なる転位像の、コントラスト改善を試みた。

最初の実験で用いた手法は、4.4節で用いた手法と同一であり、第3章で提案した微分演算による線形フィルタリングと、histogram equalizationによる統計的な強度変換を組合わせた、2ステップの画像強調法である。Fig. 43にその実験例を示す。Fig. 43(a)は、加速電圧2MVで撮影した銅の電顕写真を、128×128画素にサンプリングし、最良のコントラストで、CRTモニタ上に表示した像である。画面右上半部において、2本の転位線が観察できるが、中央部分の転位線は、下方にいくに従って、コントラストが低下しており、画面下半分では、完全にそのコントラストを失っている。そこで、この観測像より、転位線のコントラストを画面全体にわたって向上させることが、望まれている。

まず、転位線情報を強調するために、Fig. 43(a)の観測像から、その平滑化Laplacian(3次多項式5点適合)を、2:1の比率で減算することにより、edge-sharpening処理を試みた。この処理に実際に用いた手法は、5×5画素の十字形重み系列と観測像とのコンボリューションである。Fig. 43(b)に、その処理結果を示す。Fig. 43(b)においては、転位

線は非常に尖鋭になったが、その伸長が見られないため、未だ処理は不十分であると考えられる。そこで、この中間処理結果に対し、今度は、histogram equalizationを応用した。その結果、得られた処理像、Fig. 43 (c)では、中央の転位線が尖鋭で、かつ十分伸長している。さらに、Fig. 43 (a)では観察できなかった超低コントラストの転位線が、画面、左上方に、十分なコントラストをもって現われているのが観察できる。

画面内の場所によって、コントラストが大きく変化している像に対しは、線形フィルタリングのみによる処理は、一般に、あまり効果が期待できないが、Fig. 43の実験のように、histogram equalization等の、非線形な処理を付加することにより、望ましい処理結果を得ることが可能となる。

画面内の場所によってコントラストが変化している転位像の、特徴抽出処理として、効果的なもうひとつの処理実験は、以下に示すような、簡単な手順を用いた、非線形処理である。Fig. 44は、その原理を示す説明図である。Fig. 44 (a)は、転位像のある断面の濃度分布であり、大きく強度が変化する背景に、4本の転位線が存在している様子を示している。これに対し、線形な処理によって転位線を抽出した結果が Fig. 44 (b)である。ここで、線形な処理とは、例えば、平滑化の手法を用いて、Fig. 44 (a)の破線で示される背景像を求め、それを転位像から減算することである。Fig. 44 (b)では、転位線のみが抽出されている。しかし、そのコントラスト

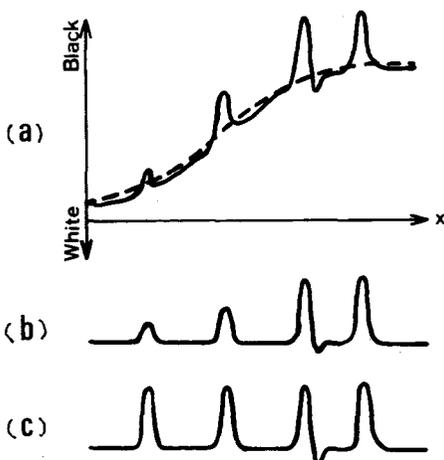


Fig. 44 Illustrating diagram of extraction of dislocation lines in a dislocation image under the variable background level.
 (a) Cross section of the dislocation image (solid line) and the background image (broken line).
 (b) Cross section of the result processed by a linear filtering.
 (c) Cross section of the result processed by the proposed nonlinear filtering.

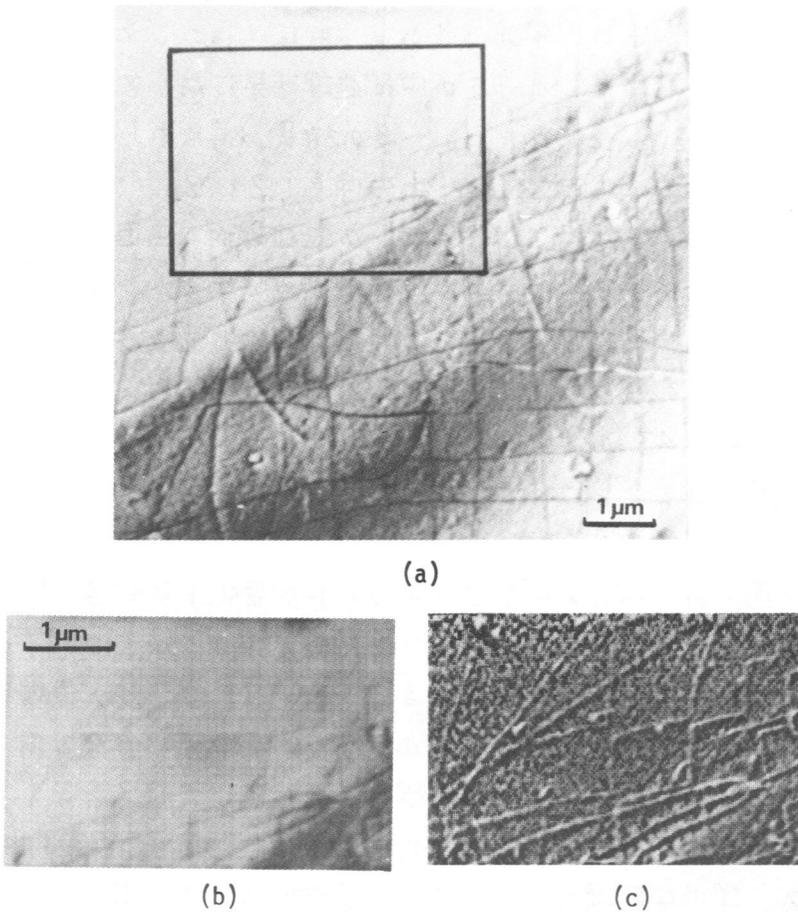


Fig. 45 Experimental result of contrast enhancement of a dislocation image by the nonlinear filtering.

(a) Original electron micrograph of aluminum taken by the HVEM at 2MV.

(b) Dislocation image of the square area enclosed by the solid line in (a) (128x192 pixels).

(c) Processed result.

トは、場所によって、依然大きく異なっている。この問題を解決するために、簡単な非線形フィルタリングを考えた。もし、Fig. 44 (a) の実線で示される転位像から、破線で示される背景像を引くのではなく、転位像を背景像で割れば、Fig. 44 (c) に示されるように、転位線のみが抽出される上に、高コントラストの転位線は、Fig. 44 (b) と変わらず、低コントラストの転位線は、Fig. 44 (b) より、増幅される。その結果、Fig. 44 (c) では、どの転

位線も同等のコントラストをもって、明確に観察できる。

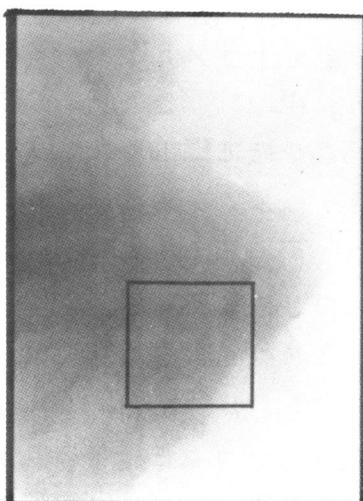
Fig. 45 に、この簡単な非線形処理、すなわち、除算による、彎曲した金属結晶の転位線抽出の実験結果を示す。Fig. 45(a) は、加速電圧 2MV、倍率 4,000X で撮影した、アルミニウムの超高圧電顕写真である。Fig. 45(b) は、Fig. 45(a) の図中の線が曲った部分を、128×192 画素にサンプリングして入力した像である。Fig. 45(b) では、画面右下方の転位線は鮮明であるが、その他の部分の転位線は、極端にコントラストが低下しており、殆んど観測できない。Fig. 45(c) は、Fig. 45(b) の観測像に、上述の除算による非線形処理を行なった結果である。Fig. 45(c) では、画面全体にわたって、転位線が十分なコントラストをもって抽出されており、この手法の正当性を示している。なお、この実験において、背景像は、Fig. 45(b) の観測像に、第 3 章で記述した、最小自乗評価に基づく多項式近似による平滑化を行なうことにより求めた。

5.3 ガスを封入したカプセル中の試料像の強調

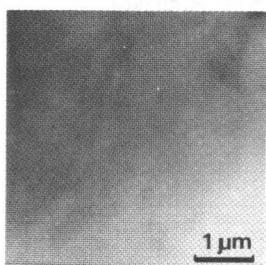
生物試料を真空中に置くことにより、それが破壊したり、変形するのを避けることを目的として、あるいは、金属結晶のガス中における結晶成長を観察することを目的として、試料を、ガスを封入したカプセル内に入れたままの状態に、電子顕微鏡によってその像を観察したいという要求は多い。超高電圧顕像を用いれば、その高い加速電圧により、照射ビームがカプセル内を通過し、カプセル中の試料の像を観察することが可能となる。しかし、照射する電子ビームがガスによって散乱するため、得られる像は、不明瞭で、微細構造が失われることが多い。通常、このような劣化像から、微細な情報を回復したいときは、硬調フィルムへの密着反転を繰り返すことにより、徐々に、必要な情報を強調していくという、写真技術が、後処理として



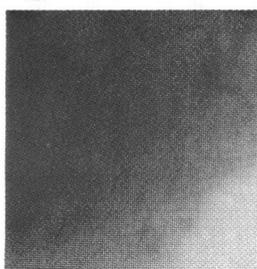
(a)



(b)

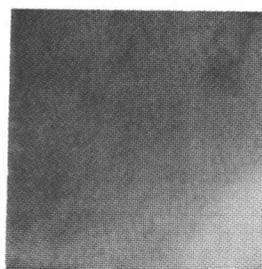


(c)



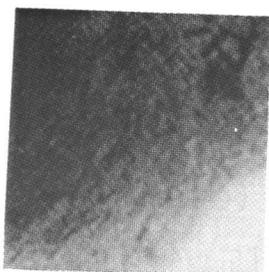
-1
-15 -1
-1

(d)



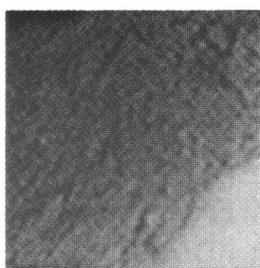
-2
1
-2 1 8 1 -2
1
-2

(e)



-5
0
3
-5 0 3 14 3 0 -5
3
0
-5

(f)



-5
0
3
-5 0 3 10 3 0 -5
3
0
-5

(g)



-6 3 0 3 -6

(h)

行なわれる。しかし、コンピュータを用いたデジタル処理を利用すれば、簡単にこの劣化像を処理することが出来る。また、マン・マシンの対話形式で処理を行えば、実験者は、種々の処理結果を観察することが出来る。

Fig. 46 に、カプセル内のガスによって劣化した超高圧電顕写真の対話型画像強調処理の実験例を示す。Fig. 46 (a)は、真空中において、加速電圧2MV、倍率4,000Xで撮影された、18-8 stainless steelの超高圧電顕写真である。Fig. 46 (b)は、同一試料を、Ar 90%、H₂ 10%の1気圧のガスが入ったカプセル内に入れ、同一条件で撮影した電顕写真である。Fig. 46 (b)では、Fig. 46 (a)と比較して、試料に含まれている微細な情報が殆んど失なわれている。Fig. 46 (c)は、Fig. 46 (b)において実線で囲まれた部分を128×128画素にサンプリングした入力像である。この入力像

Fig. 46 Experimental results of image enhancement of an electron micrograph blurred by the gas in a capsule.

- (a) Original electron micrograph of 18-8 stainless steel in vacuum taken at 2MV.
- (b) Same as (a), but in the capsule with 90% Ar and 10% H₂ gas.
- (c) Input image of the square enclosed with a solid line in (b) (128x128 pixels).
- (d) - (f) Three intermediate processed results by image enhancement and the used processing weighting series.
- (g) Final processed result and the used weighting series.
- (h) Smoothing and first derivative of (c) and the used weighting series.

に対し、対話形式によって、種々の線形フィルタリングを行ない、画像強調の実験を試みた。ここに用いた手法は、第3章で述べた、平滑化微分による画像強調の手法である。

Fig. 46(d)は、Fig. 46(c)の観測像から、そのLaplacian像を減算した結果である。処理に実際に用いた重み系列を、写真の下に示す。この処理結果を観察すれば、高周波の雑音成分のみが増幅されており、微細構造の回復は見られない。そこで、Fig. 46(d)を観察した結果、著者は、Fig. 46(c)において僅かに残っている転位の情報は、それ程高い空間周波数をもつおらず、より低周波数領域に存在していると判断した。そこで、Laplacianのかわりに、平滑化微分を利用することによって、その周波数応答が、ある周波数においてピークをもつような、バンド・パス・フィルタ特性をもつ重み系列のコンボリューションを行なった。Fig. 46(e)及び(f)は、その途中の処理結果であり、Fig. 46(g)が、最終の処理結果である。それと併せて示した表は、実験に用いた重み系列である。Fig. 46(e)及び(f)は、各々、Fig. 46(c)の観測像と、その、5点適合の3次多項式のLaplacian像、及び7点適合の3次多項式のLaplacian像との組合せである。Fig. 46(g)は、Fig. 46(f)と比べ、Fig. 46(c)から減算するLaplacianの強度を3倍にした点だけが異なる。一方、Fig. 46(h)は、Fig. 46(c)の平滑化1次微分(2次多項式5点適合)像である。Fig. 46(h)では、微細構造は立体的に観察される。

このように、対話型処理を行なうことにより、実験者は、一枚の処理結果のみから、すべてを判断することなく、多くの処理結果から、総合的に、その試料に対する認識・判断を行なうことができるため、雑音の影響や、不適正な処理パラメータを用いたことによって生ずる、正しくない処理結果から、誤った結論を下してしまう危険性を避けることができる。

5.4 Latex の焦点はずれ電子顕微鏡写真の処理

本節では、ディフォーカスな結像系によって撮影された電顕写真の、対話形式による画像修正の実験について述べる。

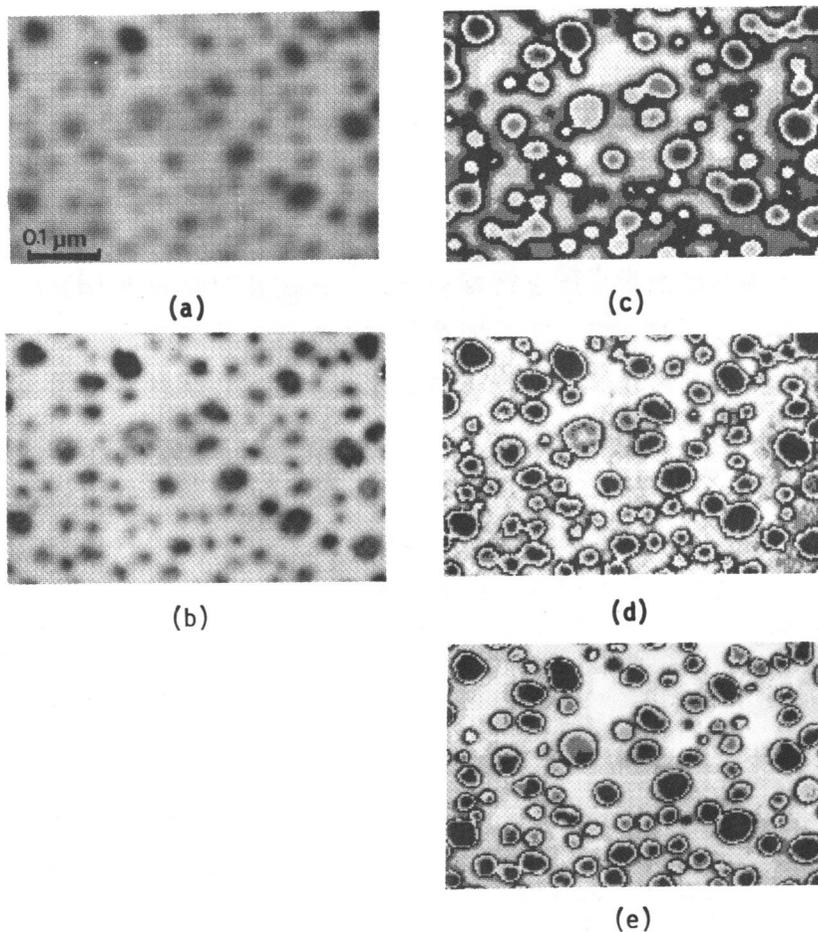


Fig. 47 Experimental results of deblurring of a defocused electron micrograph of latex taken at 100kV.

- (a) Image of the defocused electron micrograph photographed at the position $8\mu\text{m}$ under the visual best focal plane (128x192 pixels).
- (b) Final processed result, which is obtained by subtraction of two third of Laplacian of the input image of (a) from (a).
- (c) - (e) Mapped patterns of (a), (b) and the image in the visual best focus, which are mapped by the intensity mapping curve shown in Fig. 48.

Fig. 47(a)は、加速電圧100kV、倍率70,000Xで、最良フォーカス面から $8\mu\text{m}$ 下方の位置で撮影した latex の、電顕写真の入力像(128×192画素)である。この像に対し、対話型処理による数回の、コンピュータによる処理と、実験者による処理パラメータの補正を行なった後、Fig. 47(b)に示す、満足いく処理結果を得た。この最終処理結果は、Fig. 47(a)の劣化像より、7点適合の3次多項式の Laplacian の2/3倍を減算することによって得られた。Fig. 47(b)の処理結果においては、Fig. 47(a)では重なってしまっていたスポットが分離しており、また、Fig. 47(a)では確認できなかったスポット内部の情報も、よく強調されている。

この最終結果の正当性を評価するために、Fig. 48の特性曲線を示される、非線形な強度変換を行なった。Fig. 47(c)及び(d)は、Fig. 47(a)及び(b)を、Fig. 48に従って、強度変換した結果である。また、Fig. 47(e)は、同一試料を最良フォーカス面を撮影して得られた電顕写真の強度変換像である。各強度変換像では、各原像の濃度分布の比較が容易に行なえ、Fig. 47(c)と(e)の類似性から、この修正処理の妥当性が評価できる。Fig. 48の強度変換は、実際には、6ビットに量子化された各画素に対して、コンピュータ内で、最上位ビットと、最下位3ビットを捨てることによって簡単に実現できる。

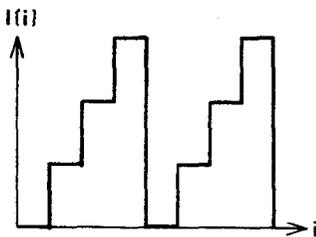


Fig. 48 Characteristic curve for MSB and 3LSB removal.

5.5 考 察

本章では、試作した画像処理システムを用いた、超高電圧電子顕微鏡写真の画像改善について述べた。本章における実験結果は、対話型画像処理が、電子顕微鏡写真の改善に非常に有用であることを示したと思われる。ここでは、超高電圧電子顕微鏡という特殊な結像系が、*a priori* な処理系として、通常の電子顕微鏡では観察できない試料の像を可視化し、さらに、対話型画像処理システムが、*a posteriori* な処理系として、超高電圧電子顕微鏡写真の改善を行ない、全体として、非常に価値ある画像を我々に提供する。この事実を積極的にとらえるならば、超高電圧電子顕微鏡と、対話型処理用のデジタル画像処理システムを緊密に結合することによって、新しい、より高性能な電子顕微鏡システムが構成されたと考えることができよう。そして、そのとき、超高電圧電子顕微鏡の有用性は、より一層広がるものと思われる。

本章の実験において最も注意しなければならない点は、対話型処理における人間の、処理への介入の程度である。計算機のみによる処理結果の過信は極めて危険であるけれども、一方、必要以上の実験者の処理への介入も同様に誤った結論を下す恐れがある。対話型処理は、実験者の判断能力と広い知識を利用するものであるが、本章に示すような電顕像は、実験者がその画像に対して十分な知識をもっていない場合が多い。そのような際には、人間の判断は極めて慎重にし、勘に頼ることは厳しく避けねばならない。そこで、本章の実験を行なったように、処理結果をうのみに行なうことなく、入力像や他の処理結果を参考にして、それを判断していくことが望ましい。

第6章 反復法による線形劣化像の修正

6.1 緒言

1970年、MacAdamが提案した、constrained deconvolution による画像修正法³⁰は、HVSを初めて積極的に利用した、マン・マシンの対話型処理であるが、その発想の卓越性から、その後の画像修正の研究の進むべき道を示唆したかのように見えた。しかし、その方法には、HVSの負担が余りに重すぎることや、コンピュータの演算時間が膨大なものとなること等、実用上、致命的な欠点があり、その後の進展は見られなかった。

本章では、MacAdamと、同じく、対話型処理という発想を基にし、かつ、それより遙かに実用的な画像修正として、多元連立1次方程式の数値解法のひとつである反復法を応用した、新しい修正法を提案し、シミュレーション結果を通して、その有用性を考察する⁶。

この方法は、LSI、LSVのいずれの系による劣化像をも取扱うことができ、また、線形に劣化した像に対して、雑音の影響を考慮した非線形な修正を行なうことも可能である。したがって、第3章で述べた方法等と比較して、極めて一般的かつ実用的な画像修正法である。また、実行する演算が簡単であり、演算時間が短く、メモリ容量が少なく済むので、ミニコンピュータが十分利用できること、像は、空間面において処理され、逐次回復していく様子を観察できるため、実験者の修正に対する判断、評価が容易なこと、等の特長により、最も実用性の高い、対話型の画像修正法のひとつであるといえよう。

6.2節では、まず、線形劣化像に対する画像修正法の数学的準備を行ない、6.3節で、連立1次方程式の反復解法を説明する。6.4節では、その画像修正への応用を論じ、6.5節において、いくつかのシミュレーション実験を示し、それより、この手法の有用性を確認する。

6.2 線形劣化像の離散的表現

反復法による線形劣化像の修正法を考察するにあたり、まず、数学的準備を行なう。線形結像系を通して得られる像は、(1)式で示したように、連続関数の形で与えられる。ここで、(1)式を再び表わせば、

$$i(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} h(x, y; x', y') o(x', y') dx' dy' \quad (48)$$

しかし、コンピュータには、これを標本化して、離散的な系列、 $\{i_{mn}\}$ が入力される。本章では、入力像だけでなく、PSF、 $h(x, y; x', y')$ 、及び物体、 $o(x, y)$ も同様に、離散的な系列、 $\{h_{mn, m'n'}\}$ 、及び、 $\{o_{m'n'}\}$ に置き換えを取扱う。標本間隔 $\Delta x, \Delta y$ が、2次元標本化定理²⁴⁾を満足するならば、 $\Delta x, \Delta y$ で標本化した各系列を用い、(48)式は、離散的に、次式で表現できる。²⁵⁾

$$i_{mn} = \sum_{m'=-\infty}^{\infty} \sum_{n'=-\infty}^{\infty} h_{mn, m'n'} o_{m'n'} \quad (49)$$

物体と、PSFの広がりか有限ならば、各系列の要素(画素)数も、有限個となり、(49)式は行列表示して、

$$\mathbf{i} = [\mathbf{H}] \mathbf{o} \quad (50)$$

と表わせる。ここで、ベクトル \mathbf{i} 、 \mathbf{o} 、及び、行列 $[\mathbf{H}]$ は、

$$\mathbf{i} = \begin{pmatrix} i_{00} \\ \vdots \\ i_{mn} \\ \vdots \\ i_{MN} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{o} = \begin{pmatrix} o_{00} \\ \vdots \\ o_{m'n'} \\ \vdots \\ o_{M'N'} \end{pmatrix}, \quad [\mathbf{H}] = \begin{pmatrix} h_{00,00} & \dots & h_{00,M'N'} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{mn,00} & \dots & h_{mn,M'N'} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{MN,00} & \dots & h_{MN,M'N'} \end{pmatrix} \quad (51)$$

である。すなわち、観測像、及び物体は、それぞれの標本化された画素を成分とするベクトルで表わされる。行列 $[H]$ は、PSF を標本化した成分から成り、その個々の列ベクトルは、物体の各位置に対する結像系の PSF を表わすベクトルに対応する。

さて、画像修正とは、観測される劣化像から、系の性質、すなわち、PSF を既知として、真の像を推定する問題である。これは、(51)式において、劣化像ベクトル \hat{i} より、PSF 行列を既知として、物体ベクトル θ を求めることであり、数学的には、 θ を未知数ベクトル、 $[H]$ を係数行列とした、連立1次方程式の解法問題となっている。

取扱う劣化結像系のとつ、いくつかの物理的な性質や制約は、(50)式において、以下の数学的な特徴として表われる。

1. \hat{i} , θ , $[H]$ は、強度で表わされるから、各々、すべての要素は零、または正值である。
2. エネルギー保存則より、 \hat{i} と θ の各々の要素の総和は等しい。このことより、 $[H]$ の各行ベクトルの総和は1である。
3. (50)式は、膨大な次元の連立方程式である。例えば、 200×200 画素から成る画像に対しては、40,000 元連立1次方程式となり、 $[H]$ は、 $40,000 \times 40,000$ の要素をもつ。
4. $[H]$ は、著しく疎 (sparse) な行列である。すなわち、大部分の要素が零である。しかも、それは規則的な形で並んでいる。これは、実際の問題とする劣化結像系においては、そのPSFの広がりか、像の広がりとは比べて十分小さく、また、物体の各画素に対応する位置を中心とした広がりをもっていることによる。

(50)式は、物理的には、必ず θ の解が存在する。しかし、実際には、PSF の測定、推定の誤差や、計算上の丸め誤差の影響により、数学的に解かれた解が、実際の物体像と一致するとは限らず、また、数学的に解がユニークに求まらない可能性もある。そこで、上記の劣化結像系のとつ特徴を拘束条件として利用すれば、(50)式だけをユニークに解が求まらない場合でも

真の解を求めることができ、また、実際の物体像と全く異なった結果が生ずることを防ぐこともできる。

6.3 連立1次方程式の反復解法

本節では、画像修正に応用しようとする連立1次方程式の反復解法を、数値解析の立場から、簡単に説明する。

連立1次方程式を解く場合、一般的には、Gaussの消去法のような直接的な解法が用いられる。しかし、前節で記述したような何万元の方程式を解くのに、行交換や列交換を伴う、Gaussの消去法を適用すると、膨大な計算時間と記憶容量を費し、大型計算機を使っても、実際には、計算不可能に近い⁸⁰。反復法は、反復回数1回につき、行列の零でない要素数と同じ回数だけの乗算を行えばよい。したがって、非常に大きな元をもち、係数行列が極めて疎な連立方程式を解く際、反復法を利用すれば、計算時間を極端に短縮でき、記憶容量も節約できる。以上のことから、反復法は、前節で記述した画像修正問題に、実用上、極めてよく適合すると考えられる。

一般によく用いられる反復法は、同時置換法(Jacobi法)、逐次置換法(Gauss-Seidel法)、及び、過剰緩和法(SOR(Successive over-relaxation)法)である^{80,81}。これらの方法では、初期解、 $\hat{o}^{(0)}$ を適当に選んで、(51)式に対する k 回の反復後の推定解、 $\hat{o}^{(k)}$ は、

$$\hat{o}^{(k)} = [M] \hat{o}^{(k-1)} + [N] i \quad (52)$$

の形で表現される。但し、 $[M]$ 及び $[N]$ は、 $[H]$ に依存する行列であり、特に $[M]$ は、反復行列と呼ばれ、反復法の収束性を決定するものである。ここで、係数行列、 $[H]$ を、3つの行列、 $[D]$ 、 $[E]$ 及び $[F]$ に分解して、

$$[H] = [D] + [E] + [F] \quad (53)$$

と表わせば、それぞれの方法は、次式で表現される。

$$\text{同次置換法: } \hat{\theta}^{(k)} = -[D]^{-1}([E] + [F])\hat{\theta}^{(k-1)} + [D]^{-1}i \quad (54)$$

$$\text{逐次置換法: } \hat{\theta}^{(k)} = -([D] + [E])^{-1}[F]\hat{\theta}^{(k-1)} + ([D] + [E])^{-1}i \quad (55)$$

$$\text{SOR法: } \hat{\theta}^{(k)} = ([I] + \alpha[D]^{-1}[E])^{-1}\{(1-\alpha)[I] - \alpha[D]^{-1}[F]\}\hat{\theta}^{(k-1)} + \alpha([D] + \alpha[E])^{-1}i \quad (56)$$

ただし、 $[D]$ は、 $[H]$ の対角要素のみから成る対角行列、 $[E]$ は $[H]$ の対角より下側の要素から成り、かつ対角要素が零の下三角行列、 $[F]$ は、 $[H]$ の対角より上側の要素から成り、対角要素が零の上三角行列である。また、 $[I]$ は単位行列である。 α は、加速係数、あるいは緩和係数と呼ばれるパラメータである。(54)式より(55)式、さらに(56)式の方が複雑に見えるが、実際の計算は同程度に簡単であり、しかもその収束性は、後の方法ほど速い。

これらの反復法の収束のための必要十分条件は、(52)式で示した反復行列 $[M]$ のすべての固有値、 μ_i が、

$$|\mu_i| < 1 \quad (57)$$

を満足することである。^{*)} 各反復法における反復行列 $[M]$ は、以下に示される行列である。

$$\text{同次置換法: } [M_J] = -[D]^{-1}([E] + [F]) \quad (58)$$

$$\text{逐次置換法: } [M_G] = -([D] + [E])^{-1}[F] \quad (59)$$

$$\text{SOR法: } [M_S] = ([I] + \alpha[D]^{-1}[E])^{-1}\{(1-\alpha)[I] - \alpha[D]^{-1}[F]\} \quad (60)$$

これらの反復法を画像修正に応用する際に、特に注意しなければならないことは、反復法は、(57)の収束条件を満足するときのみ解が求まり、それ以外のときは解が発散してしまうということである。

(58) - (60)式で示される反復行列は、各々、 $[H]$ を分解した行列と、 α とから構成されている。そこで、これらの反復法が収束するか否かは、 $[H]$ 、すなわち劣化系のPSFの形と、加速係数、 α の値とを決定される。概して、対角要素が非対角要素と比べて十分大きい値をもつときに収束条件を満足するといえるが⁸⁰ 物理的には、必ずしも、対角要素が十分大きいとは限らない。

6.4 反復法の画像修正への応用

6.2節で列挙した劣化結像系のもつ物理的性質が、6.3節で記述した連立1次方程式の反復解法に非常によく合致するにもかかわらず、現在まで、反復法を実際の画像処理に適用した例は無い。これには、2つの理由が考えられる。ひとつは、この方法と、光学研究者の歴史的な画像や結像系に対する数学的取扱いとの違いにあると思われる。従来の多くの画像修正法は、空間フィルタリングによる修正であり、原理的には光学系を用いても修正できる方法を、コンピュータに置き換えて離散的に取扱っているだけである。一方、反復法のような数値的解法は、光学系では行なえず、したがって、一般に、従来行なわれてきた空間周波数領域における解釈ができないため、これまでの画像修正の研究で得た経験が生かしくい。しかし、最近では、前節で述べた以外の反復法(Projection method⁸², 共役傾斜法⁸³)による像修正の提案も行なわれつつあり、今後の魅力的な画像修正の方向を示唆するものと考えられる。

連立1次方程式の反復解法が画像修正に応用されなかつたのもこの理由は、収束性の問題にある。反復法は、収束条件を満足すれば、線形劣化像を、非常に高速に、しかも大容量のメモリを必要とせずに、修正することが出来る。しかし、実際の劣化結像系のPSFは、この収束条件を満足しない場合が多く、その場合、画像修正に反復法を利用することができない。そこで、反復法は、現在まで画像処理に対しては応用されなかつたと思われる。

著者は、劣化像の再劣化という考え方を提案し、それによって、画像修正における反復法の収束性の問題を解決した⁶。本節では、以下、連立方程式の反復解法を画像修正へ応用した場合について考察し、特に収束性と拘束条件の導入について論ずる。

6.4.1 同次置換法 (Jacobi 法) の応用

最も基本的な反復法である同時置換法の画像修正への応用を考える。(54)式を簡単な形に書き改めると、

$$\hat{o}^{(k)} = \hat{o}^{(k-1)} + [D]^{-1} (i - [H] \hat{o}^{(k-1)}). \quad (61)$$

この方法では、 k 回目の推定像、 $\hat{o}^{(k)}$ は、真の劣化像 i から、1 回前の推定像、 $\hat{o}^{(k-1)}$ を用いて計算された劣化像、

$$\hat{i}^{(k-1)} = [H] \hat{o}^{(k-1)} \quad (62)$$

を引いた残差を、補正ベクトルとして、前回の推定解、 $\hat{o}^{(k-1)}$ に加えることによつて得られる。(61)式をその要素で表現すれば、

$$\hat{o}_{mn}^{(k)} = \hat{o}_{mn}^{(k-1)} + \frac{1}{h_{mn, mn}} (i_{mn} - \sum_{m'} \sum_{n'} h_{mn, m'n'} \hat{o}_{m'n'}^{(k-1)}). \quad (63)$$

ここで劣化係数 L S I であれば、その P S F は、

$$h_{mn, m'n'} = h_{m-m' n-n'} \quad (64)$$

となり、(63)式は次式に書き改められる。

$$\hat{O}_{mn}^{(k)} = \hat{O}_{mn}^{(k-1)} + \frac{1}{h_{00}} (i_{mn} - \sum_{m'} \sum_{n'} h_{m-m' n-n'} \hat{O}_{m'n'}^{(k-1)}), \quad (65)$$

あるいは、

$$\hat{O}^{(k)} = \hat{O}^{(k-1)} + \frac{1}{h_{00}} (i - \hat{O}^{(k-1)} * h). \quad (66)$$

さらに、緩和係数 α を導入すれば、(61)式は、

$$\hat{O}^{(k)} = \hat{O}^{(k-1)} + \alpha [D]^{-1} (i - [H] \hat{O}^{(k-1)}), \quad (67)$$

と書き改められ、L S I な劣化に対する反復法は、(66)式のかわりに

$$\hat{O}^{(k)} = \hat{O}^{(k-1)} + \frac{\alpha}{h_{00}} (i - \hat{O}^{(k-1)} * h) \quad (68)$$

となる。分光素の補正の目的に、1930年、van-Cittert が提案した類似系、コンボリューション法⁸⁴は、(68)式において、 $\alpha/h_{00} = 1$ とした場合に対応する。

一方、初期値 $\hat{O}^{(0)}$ の選択は、数学的には全く任意であり（よく設定されるのは $\hat{O}^{(0)} = 0$ である）、その選択如何によって収束条件が変化することはない。しかし、画像修正の問題においては、6.2節で記述したように、 $[H]$ の要素が、すべて、零または正値であり、その各列ベクトルの総和が1である。さらに、 $[H]$ は非常に疎である。これらより、数学的には、 0 と i は全く独立な値をとり得るにもかかわらず、実際には、かなり類似した形を持つことが予想される。したがって初期ベクトル $\hat{O}^{(0)}$ を、

$$\hat{\theta}^{(0)} = i \quad (69)$$

と設定すれば、少ない反復回数で修正が行なわれると考えられる。

6.4.2 収束条件の緩和

連立1次方程式の反復解法を画像修正へ応用する上で、一番問題となるのはその収束性である。演算が高速に行なえ、メモリ容量が小さく済んでも、収束しなければ、反復法は利用できない。そこで、本節では、反復法を画像修正へ応用した場合の収束性について論じ、その緩和の方法の提案を行なう。

反復法の収束性は、6.3節で述べたように、反復行列の固有値で決定する。しかし、反復行列の固有値を求めることは、その連立方程式の解を求めるのと、同程度の労力を費す。そこで、ここでは、劣化系がLSIである場合の、同時置換法の収束性を考察し、その収束条件を緩和する方法を提案する。

劣化系がLSIである場合、(68)式の両辺をフーリエ変換して、空間周波数座標で反復法を表現できる。すなわち、

$$\hat{\theta}^{(k)}(f_x, f_y) = \hat{\theta}^{(k-1)}(f_x, f_y) + c \{ I(f_x, f_y) - \hat{\theta}^{(k-1)}(f_x, f_y) \cdot H(f_x, f_y) \}, \quad (70)$$

ただし、

$$c = \frac{\alpha}{h_{00}}. \quad (71)$$

ここで、大文字で表わされる関数は、それぞれ、小文字で表理した関数のフーリエ変換を示す。(69)式は、フーリエ変換して、

$$\hat{\theta}^{(0)}(f_x, f_y) = I(f_x, f_y) \quad (72)$$

(72)式を用いて、(70)式は、次式に書き改めることができる。

$$\hat{O}^{(k)}(f_x, f_y) = \frac{|1 - \{1 - H(f_x, f_y)\} \{1 - cH(f_x, f_y)\}^k}{H(f_x, f_y)} \cdot I(f_x, f_y). \quad (73)$$

(73)式より、収束条件は、

$$|1 - cH(f_x, f_y)| < 1 \quad (74)$$

であることがわかる。 $\hat{O}^{(k)}(f_x, f_y)$ は、 $k \rightarrow \infty$ に対して $I(f_x, f_y)/H(f_x, f_y)$ となり、無雑音の場合、それは物体のフーリエ変換、 $O(f_x, f_y)$ に収束する。

(74)の収束条件は、画像修正においては、非常に厳しい条件である。インコヒーレント結像系のOTF、 $H(f_x, f_y)$ が全空間周波数において、

$$0 \leq H(f_x, f_y) \leq 1 \quad (75)$$

の範囲にあるときは、緩和係数を $0 \leq c \leq 2$ に設定することによって、(74)は満足する。OTFが全空間周波数にわたって、(75)の範囲内にある例としては、大気のゆらぎによる劣化（そのOTFは、Gauss関数で表現できる）等が挙げられる。しかし、一般にはインコヒーレント結像系のOTFは(75)の範囲内に収まるとは限らない。画像修正の要望が非常に多い。流れ写真や大きな焦点はおれによる像等は、 $H(f_x, f_y)$ が負値をとつために、どのような c に対しても、(74)を満足せず、(73)式は発散する。

著者は、この収束条件を緩和する方法を提案し、どのようなOTFをもつ系による劣化像に対しても、反復法を適用することを可能とした。

提案した収束条件の緩和の方法は、反復法に、入力像の再劣化という極めて簡単な手続きを付け加えるだけの手法である。すなわち、(66)式、あるいは(68)式において、 i のかわりに $i \star n$ を、 k のかわりに $k \star n$ を代入する。ここで、 \star は相互相関を表わし、PSF、 k が偶関数であれば、それは*（コンボリューション）と等価である。これはつまり、入力した劣化像をコンピュータ内で劣化系と同一のPSFで再劣化し、それを劣化像として、劣化系のPSFを、その自己相関 $k \star n$ に置き換えて、

(68)式を用いて、反復修正していくことになる。再劣化すれば、当然のことながら劣化像はより大きく劣化するが、反復法を用いればこの再劣化像は発散することなく、必ず回復する。その理由は以下の如くである。

劣化系のOTF, $H(f_x, f_y)$ は、再劣化することによって $H^2(f_x, f_y)$ に置換される。すると収束条件(74)は

$$|1 - c H^2| < 1 \quad (76)$$

となる。これを満たす $H^2(f_x, f_y)$ の範囲は、 $0 < c \leq 2$ に対して、

$$0 \leq H^2(f_x, f_y) \leq 1 \quad (77)$$

ここで、 $H(f_x, f_y)$ がインコヒーレント結像系のOTFであることを考えれば、(77)は、どのような劣化結像系に対しても満足する。例えば先例の流し写真や焦点はおぼろげ、あるいは二重ぶれ露光の像等に対しても、 $H^2(f_x, f_y)$ は全空間周波数領域で、零、または1以下の正値であり、(77)の範囲内に収まる。結局、この再劣化の操作により、反復法はどのような劣化像に対する画像修正に応用しても収束することが証明できる。

6.4.3 逐次置換法(Gauss-Seidel法)の応用

この方法は、同時置換法と比べ、収束が速くメモリ容量が少なく済むので、対話型処理によりよく適合すると思われ。 (55)式を簡単な形に書き直すと、

$$\hat{o}^{(k)} = \hat{o}^{(k-1)} + ([D] + [E])^{-1} \{i - [H] \hat{o}^{(k-1)}\}, \quad (78)$$

あるいは、

$$\hat{o}^{(k)} = \hat{o}^{(k-1)} + [D]^{-1} \{i - ([D] + [F]) \hat{o}^{(k-1)} - [E] \hat{o}^{(k)}\}, \quad (79)$$

和係数を導入した方法である。この方法は、(56)式を簡単に書き直して、

$$\hat{o}^{(k)} = \hat{o}^{(k-1)} + \alpha ([D] + \alpha [E])^{-1} (i - [H] \hat{o}^{(k-1)}), \quad (82)$$

あるいは、

$$\hat{o}^{(k)} = \hat{o}^{(k-1)} + \alpha [D]^{-1} \{ i - ([D] + [F]) \hat{o}^{(k-1)} - [E] \hat{o}^{(k)} \}, \quad (83)$$

で表される。(79)式と(83)式を比較すれば、SOR法は、緩和係数 α を1より大きい値に設定してやることにより、逐次置換法より収束を速めることができることがわかる。しかし、6.3節、(60)式で示したように、 α は反復行列の式の中に含まれているため、 α の選び方によつて、この方法が収束するか発散するかが決定する。 α に、大きい値を選ぶほど、発散し易い。

逐次置換法では、LSIな劣化像に対しては、スアーズ・バリアント⁸⁶⁾の修正が行なわれるため、収束性の緩和に、6.4.2節の議論は使えない。しかし、結論的には、やはり再劣化によつて、反復法は常に収束する。この点については、6.5.2節でのシミュレーション実験をもとに、6.6節で考察する。

6.4.4 拘束条件の導入

これまで、(48)式、あるいは(49)式の結像式が正確に成立するとして、劣化像から、劣化系のPSFを既知として真の物体を推定する方法を述べた。しかし現実には、コンピュータに入力される劣化像には雑音が加わっており、また、劣化系のPSFの推定にも誤差を伴う。さらに、反復法においては、繰返し、演算を行なうため、丸め誤差の影響も無視できない。これらの誤差は、反復法の収束の可否を左右[†]し、理論的には収束が予想される場合で

[†]参考文献⁸⁶⁾に依れば、反復の各回で発生する丸め誤差のノルムが十分小さいと仮定できる場合に限り、反復法は収束するとみこさすかえなく、また、係数行列の推定誤差が十分小さいと仮定できる場合に限り、改良反復法によつて、真の解に収束させることが可能である。

も、実際の実験では、これらの誤差のために解が発散することがある。

そこで、著者は、画像修正における反復法の収束性を良好にするために、拘束条件をそれに導入した。この拘束条件は、一般の数値解析における連立1次方程式の反復解法には導入できない。画像修正の問題においては、劣化結像系が、6.2節で列挙した物理的性質をもっていることから、それを拘束条件として導入することが可能である。これと類似な拘束条件の導入は、分光データの分解能向上問題においては、既にJanssonらが試み、良好な結果を得ている⁸⁷。

拘束条件は、緩和係数、 α に導入する。すなわち、 α のかわりに各反復回毎にその要素の値が可変である対角行列 $[R^{(k)}]$ を用い、 $[R^{(k)}]$ に拘束条件を導入する。Janssonらの拘束条件は、緩和係数によってかわる対角行列、 $[R^{(k)}]$ の対角要素を、 $r_{mn, mn}^{(k)}$ とすると、次式で表現できる。

$$r_{mn, mn}^{(k)} = \alpha \left(1 - 2 \left| \hat{o}_{mn}^{(k-1)} - \frac{1}{2} \right| \right) \quad (84)$$

これは、分光吸収スペクトルは、0% (0) ~ 100% (1) 以外の値をとることはない、という物理的制約から導かれたものである。 $r_{mn, mn}^{(k)}$ は、(84)式より、50% (1/2) の吸収のとき最大値をとり、0%、100% のとき、零となる。この拘束条件式により、0%以下、あるいは100%以上の物理的に無意味な結果の発生を防ぐことができる。

画像修正における物理的制約のうち、拘束条件に採用できるものとしては、6.2節より、以下の2つが考えられる。

1. \hat{o} のすべての要素 (物体の強度) が非負であること。
2. i の要素と、それに対応する o の要素は、比較的類似した値をもつ (これは、 $[H]$ の要素がすべて非負であり、その列ベクトルの総和が1であること、及び、 $[H]$ が非常に疎であることより説明される)。

1. の制約は種々の拘束条件式に表現することができる。例えば、次式は、 $\hat{o}_{mn}^{(k-1)}$ が定数 d 以下の値になれば拘束性を發揮し、零以下の値をとることを

防ぐ。

$$r_{mn, mn}^{(k)} = \begin{cases} d & \text{for } \hat{\sigma}_{mn} > d \\ d \left\{ 1 + \frac{1}{d} (\hat{\sigma}_{mn}^{(k-1)} - d) \right\} & \text{for } 0 \leq \hat{\sigma}_{mn} \leq d \\ 0 & \text{for } \hat{\sigma}_{mn} < 0 \end{cases}, \quad (85)$$

あるいは、次式は、 $\hat{\sigma}_{mn}^{(k)}$ を、零からある制限値 d の範囲内に拘束する。

$$r_{mn, mn}^{(k)} = \begin{cases} d \left\{ 1 - \frac{2}{d} \left| \hat{\sigma}_{mn}^{(k-1)} - \frac{d}{2} \right| \right\} & \text{for } 0 \leq \hat{\sigma}_{mn} \leq d \\ 0 & \text{for } \hat{\sigma}_{mn} < 0, \hat{\sigma}_{mn} > d \end{cases}. \quad (86)$$

これは Jansson らの方法と同等である。

2. の制約は、次式の拘束条件で表現できる。すなわち、適当な定数 d に対して、

$$r_{mn, mn}^{(k)} = \begin{cases} d \left\{ 1 - \frac{1}{d} \left| \hat{\sigma}_{mn}^{(k-1)} - i_{mn} \right| \right\} & \text{for } 0 \leq \hat{\sigma}_{mn} \leq d \\ 0 & \text{for } \hat{\sigma}_{mn} < 0, \hat{\sigma}_{mn} > d \end{cases}. \quad (87)$$

これは、 $\hat{\sigma}_{mn}$ を、 $i_{mn} - d$ と $i_{mn} + d$ の間に拘束する。この式の利用においては、制限値 d の設定に十分な注意が必要である。 d が小すぎれば、その拘束により、 $\hat{\sigma}_{mn}^{(k)}$ は永遠に真の解 σ_{mn} に到達できず、また逆に大きすぎれば、拘束の効果が表われない。(87)式は、劣化像と物体の類似性を根拠にしているのだから、 d は、その類似性を決める [H] によつて、即ち、劣化の種類や劣化量の違いによつて、可変にすべきであろう。また、反復途中において、各反復回毎に d を変更していく必要も生ずるかも知れない。 d の設定、あるいは反復途中における変更は、人間が行なうことであり、ここにおいても、HVS を積極的に利用した対話型処理の重要性は大きいと考えられる。

なお (86) 式及び (87) 式と同等の拘束条件式は, Frieden によっても提案されている。²⁶ これらの拘束条件式の導入は, 線形な劣化像に対する非線形な修正法であるという点において, 従来の Wiener フィルタに代表される線形な修正法と比べ, 画期的な修正法であるといえよう。

6.5 実 験

6.4 節では, 連立 1 次方程式の反復解法が, 若干の改良を加えることにより, 実用的な, 対話形式による画像修正に適した方法となり得ることを明らかにした。本節では, コンピュータ・シミュレーションを行なうことにより, この手法の画像修正への適用性を確かめ, かつ, その有用性を示す。

6.5.1 アルゴリズム

反復法を改良した画像修正法は, 以下の手順で対話形式を進められる。ただし, ここでは, LSI 系による劣化像に対する同時置換法による修正について示す。また, 各行列及びベクトルは, その要素を表わす。

- i 劣化像, i_{mn} を入力する。
- ii コンピュータ内で劣化像 i_{mn} 及び PSF h_{mn} を再劣化させる。

$$\begin{aligned} i_{mn} &= i_{mn} \star h_{mn} \\ h_{mn} &= h_{mn} \star h_{mn} \end{aligned}$$

iii 初期推定値を設定する。

$$\hat{\sigma}_{mn}^{(0)} = i_{mn}$$

iv 拘束条件式 $r_{mn, mn}^{(k)}$ と、それに含まれる定数 α を設定する。

$$r_{mn, mn}^{(k)} = \alpha \left\{ \left| 1 - \frac{1}{\alpha} \right| \left| \hat{\sigma}_{mn}^{(k-1)} - i_{mn} \right| \right\}$$

v k 反復回における推定解 $\hat{\sigma}_{mn}^{(k)}$ を求める。

$$\hat{\sigma}_{mn}^{(k)} = \hat{\sigma}_{mn}^{(k-1)} + r_{mn, mn}^{(k)} \{ i_{mn} - \hat{\sigma}_{mn}^{(k-1)} * h_{mn} \}$$

vi 実験者は、推定解 $\hat{\sigma}_{mn}^{(k)}$ を観測し、各パラメータを評価し、不都合があれば再設定して、コンピュータに変更を命ずる。

vii $k \rightarrow k+1$ とし、ivに戻る。

ここで、ステップ ii は、劣化系の OTF, $H(f_x, f_y)$ が負値を持たないとき省略できる。また、雑音があると無い場合、ステップ iv における拘束条件式は、緩和係数 $r_{mn, mn}^{(k)} = \alpha$ (constant) に置換してよい。逐次置換法を応用する場合は、ステップ v において逐次求められる $\hat{\sigma}_{mn}^{(k)}$ を、即座に $\hat{\sigma}_{mn}^{(k-1)}$ に代入し、同一反復回の以降の要素の計算に利用する。ステップ vi は、コンピュータでなく、実験者によって行なわれる。実験者は、各反復回において、ステップ vi で計算された処理結果 $\hat{\sigma}_{mn}^{(k)}$ を CRT モニタ上の表示像として観測し、拘束条件式の効果の評価し、必要に応じて α , α を変更し、拘束性を制御する。また、劣化系の PSF の推定の誤まり等も $\hat{\sigma}_{mn}^{(k)}$ より検出でき、その場合は、 h_{mn} を再設定して、ステップ ii へ戻る。実験者は、十分満足できる結果が得られれば、次回以降の反復を打ち切る。劣化系が LSV 系の場合は、 h_{mn} は、 $h_{mn, n'n'}$ で表わされ、 $\hat{\sigma}_{mn}$ の位置によって劣化 PSF の形は異なる。このとき、ステップ ii 及びステップ v では、コンボリューション、コリレーションのかわりに一般の線形演算を行なう。

こうした手順を円滑に進めるためには、普通の画像処理装置は不適であり、特殊な、対話型処理用の装置の使用が望ましい。第2章で述べた著者が試作したシステムは、この処理法に極めてよく適合すると思われる。

6.5.2 1次元計算シミュレーション

反復法による画像修正の効果を定量的に評価するために、コンピュータによる1次元シミュレーション実験を行なった。

Fig. 49は、反復法を用いた修正のシミュレーション結果であり、修正による点像分布の変化の様子を示している。Fig. 49(a)は、空気のゆらぎによる劣化の点像分布関数である。劣化を特徴づけるPSFは、

$$h_g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right] \quad (88)$$

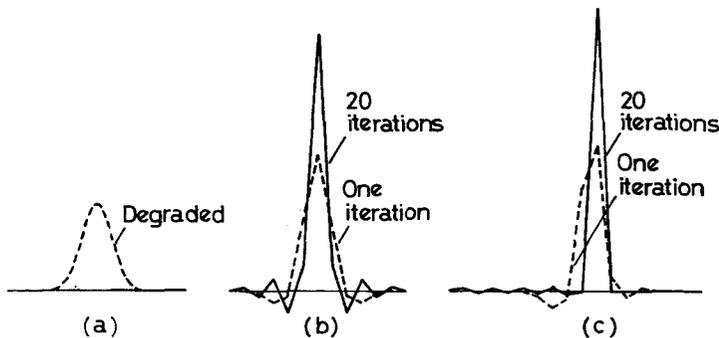


Fig. 49 Simulation results for the Gaussian degraded PSF by the iterative image restoration method.

- (a) Gaussian degraded PSF expressed by Eq. (88) where the standard deviation is $\sigma = \Delta x$.
- (b) Processed results by Jacobi's method.
- (c) Processed results by Gauss-Seidel's method.

であり、その標準偏差は丁度標本間隔に等しく、 $\sigma = \Delta x$ である。これに対し同時置換法を修正した結果が Fig. 49(b)、逐次置換法を修正した結果が Fig. 49(c) である。緩和係数 c (ただし、 $c = \alpha / h_{00}$) は、同時置換法 (Fig. 49(b)) では、最加速を与える $c = 2.0$ を、逐次置換法 (Fig. 49(c)) では、 $c = 3.7$ を選んだ。Fig. 49(b) 及び (c) より、逐次置換法の方が、同一置換法より速く修正できることがわかる。また、Fig. 49(c) においては、修正像の左側より右側の方が回復が速い。これは、逐次置換法による修正を行なう際、各反復回において、常に左側の要素から求めていき、右側の要素の計算に直ちにその値を利用していったからである。Fig. 50 は、Fig. 49 の実験における各反復回での修正 PSF のピーク値と、反復回数 k との関係を示した図である。元の点物体の高さ 1.0 に対して、劣化 PSF のピーク値は、(88) 式より 0.40 である。Fig. 50 より、逐次置換法の収束は、同時置換法よりはるかに速いことがわかる。

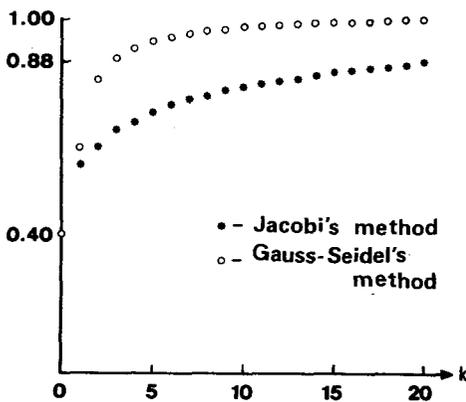


Fig. 50 Peak height values of processed PSFs for the simulations shown in Fig. 49.

Fig. 51 は、点物体の、流れ写真の焦点はずれ像 (ただし、幾何光学的近似内での) の、逐次置換法による修正の 1 次元シミュレーション結果である。流れ写真を特徴づける PSF は、次式の rect 関数[†] で与えられる。

$$h_r(x) = \frac{1}{a} \text{rect} \left(\frac{x}{a} \right). \quad (89)$$

またその OTF は、sinc 関数^{††} で表現できる。

$$H_r(f_x) = \text{sinc} (af_x). \quad (90)$$

[†] rect 関数を次式で定義する。

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1 & |x| < 1/2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (91)$$

^{††} sinc 関数を次式で定義する。

$$\text{sinc}(x) = \sin \pi x / \pi x. \quad (92)$$

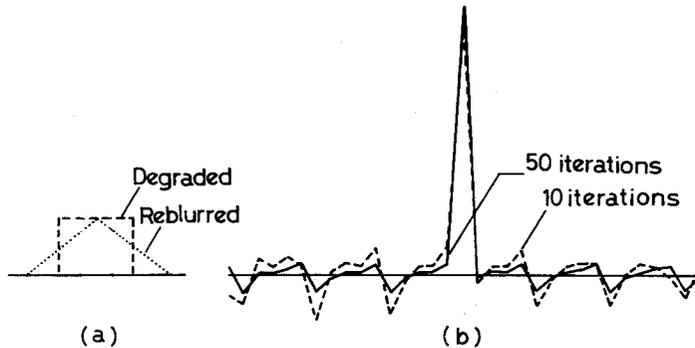


Fig. 51 Simulation results for the rectangularly degraded PSF by the iterative image restoration method.

- (a) Rectangularly degraded PSF expressed by Eq. (89) where the amount of linear motion is $a = 5\Delta x$, and its reblurred PSF.
- (b) Processed results for the reblurred PSF by Gauss-Seidel's method.

(90)式の $H_r(f_x)$ は、負値をもつため、そのまま反復法を使用すると解は発散する。そこで、解を収束させるためには再劣化が必要である。再劣化することにより、劣化系の OTF は $H_r^2(f_x) = \text{sinc}^2(af_x)$ と変形され、これが負値をもたないことより、流れ写真を修正することが出来る。

Fig. 51(a) に流れ写真の劣化 PSF と、それを再劣化した PSF を示す。ここで、流れ量 a は、標本間隔 Δx に対し、 $a = 5\Delta x$ である。Fig. 51(b) は、Fig. 51(a) の再劣化像に対する逐次置換法による修正結果である。10 回の反復(破線)でゼークはほぼ回復しているが、両側の振動を十分抑えるためには 50 回程度の反復(実線)が必要である。この振動は、流れ量である $5\Delta x$ を周期として生じており、それは、(90)式の OTF が零交互している周波数に対応する。これを完全に除去するためには、無限回の反復が必要である。しかし、拘束条件(例えば(85)式に示した拘束条件式は修正結果を非負に拘束する)を導入することによつて、この収束を速めることは可能である。

6.4.2 節において、LSI 系による劣化像の同時置換法による修正像のフーリエ変換を、(73)式で示した。また、収束条件を満足しておれば、雑音の無い場合、無限回の反復により必ず真の物体に収束することも示

した。そこで、ここでは、有限回の反復による修正の効果と空間周波数領域において検討する。Fig. 52(a)は、Fig. 49のシミュレーションで示した、Gauss関数で表現される劣化系のPSFと、それを有限回の反復回数で修正した結果のPSFの、空間周波数応答である。Fig. 52(a)より、反復回数が増加するにしたがって、低周波数成分から徐々に修正されていくことがわかる。また、少ない反復回数において像の回復は顕著で、反復回数が増加するにつれて、その回復の速度は落ちる。同様に、Fig. 52(b)に、Fig. 51のシミュレーションで示した、rect関数で表現される劣化PSFを再劣化したPSFと、それを有限回の反復回数で修正した結果のPSFの空間周波数応答を示す。Fig. 52(b)より、修正は、反復回数が増加していきにしたがって、低周波成分から徐々に行なわれていくのではなく、劣化系（ここでは再劣化系）のOTFの減衰率の低い（すなわち値の大きい）空間周波数成分から徐々に行なわれていくことが確認できる。このことより、有限回の反復を打ち切れば、劣化像のSN比の高い空間周波数成分の修正は完了し、

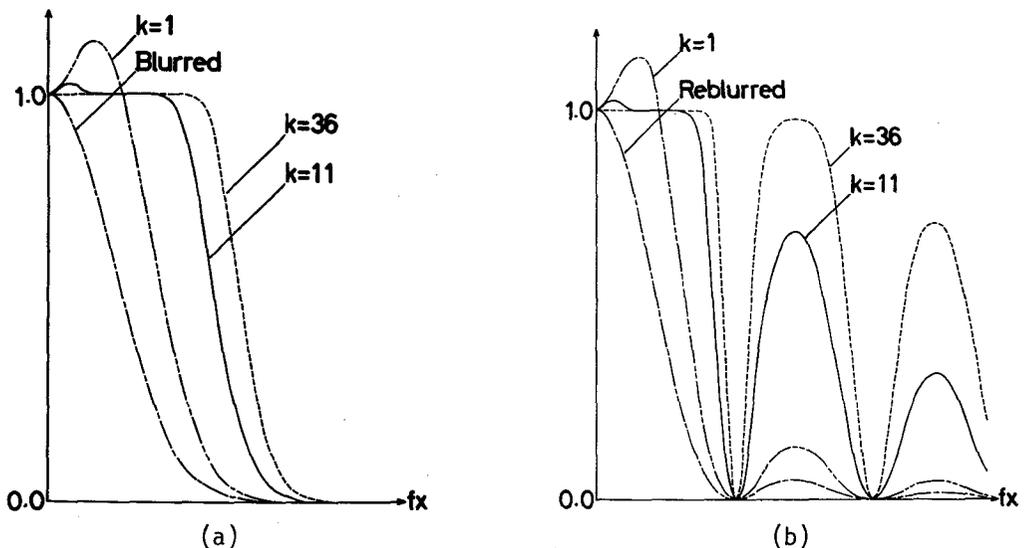


Fig. 52 Spatial frequency responses for the PSFs restored by the iterative restoration method on finite number ($k=1, 11$ and 36) of iterations.
 (a) Frequency responses for the Gaussian PSF and its restored PSFs.
 (b) Those for the reblurred PSF for rectangularly PSF and its restored PSFs.

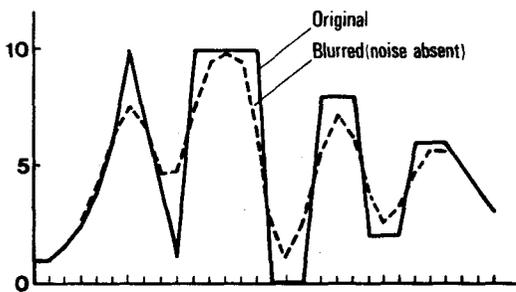
SN比の低い帯域の回復は途中で止めることができ、雑音成分の増幅を抑制した修正を実行することが可能となる。実際の実験においては、実験者が対話形式で、各反復回における修正像を観察し、信号成分の回復より雑音の増幅が顕著になりつつあると判断したとき、コンピュータに反復の停止を命じてやればよい。

次に、適当な劣化像モデルを設定し、それに対する反復法による画像修正の1次元シミュレーションを試みた。Fig. 53(a)は、30点の標本点から成る物体(実線)と、その空気のゆらぎによる劣化像(破線)である。劣化系のPSFは(88)式で示したGauss関数であり、その標準偏差は、標本間隔 Δx に対し、 $\sigma = \Delta x$ である。Fig. 53(b)は、同時置換法による50回の反復結果の修正像であり、Fig. 53(b)は逐次置換法による40回の反復による修正結果である。いずれの処理結果においても十分な回復が行なわれていることが確認できるが、これは、雑音の無い場合であるから、当然の結果である。

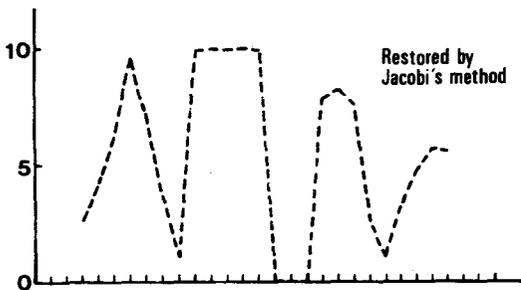
Fig. 54に、雑音が付加した劣化像の反復法による修正のシミュレーション結果を示す。Fig. 54(a)は、Fig. 53(a)と同一の物体と、Fig. 53(a)の劣化像に雑音を付加した観測像である。付加雑音は白色で標準偏差0.07のガウス分布をもつ。SN比を、信号の標準偏差/雑音の標準偏差で表わせば、50(34dB)である。Fig. 54(a)の劣化像に対して無拘束で逐次置換法によって解いた結果が、Fig. 54(b)及び(c)である。Fig. 54(b)は、30回の反復結果、Fig. 54(c)は、70回の反復結果である。いずれの結果においても、画面中央部の矩形的な2つの山と、その間の谷において激しい振動が生じており、Fig. 54(a)に実線で示した真の物体と、大きくかけ離れた形をもっている。反復回数を増加させると、この振動はさらに顕著になり、解は発散する。

これに対し、Fig. 54(a)の、雑音の重畳した劣化像を、拘束条件付で逐次置換法で修正した結果(反復回数10回)が、Fig. 54(d)である。使用した拘束条件式は、(87)式であり、許容値を $\alpha = 2.0$ 、緩和係数を $\alpha = 1.0$ と設定した。これは、修正像を、劣化像 ± 2.0 の範囲内に拘束する。Fig. 54(d)の修正結果(実線)は、劣化像(破線)と比較して、十分に修正されFig. 54(a)の真の物体に近づいている。また、Fig. 54(b)及び

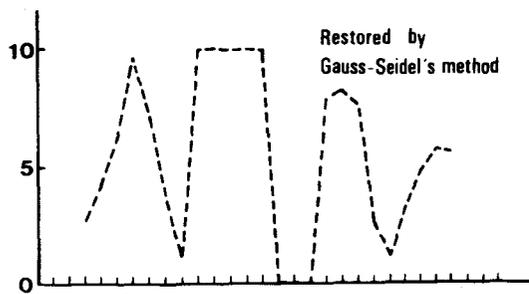
(c)に示した無拘束な場合の処理結果と比較して、振動は完全に抑えられ、解が収束していることが確認できる。この処理結果は、反復回数がまだ10回における結果であるが収束はほぼ完了している。これらの処理結果は、拘束条件導入の有効性と必要性を、強く示すものと思われる。



(a)



(b)



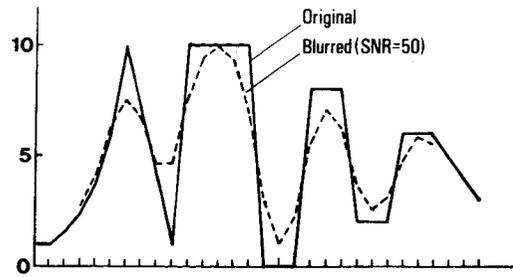
(c)

Fig. 53 Simulation results by the iterative image restoration method in the absence of noise.

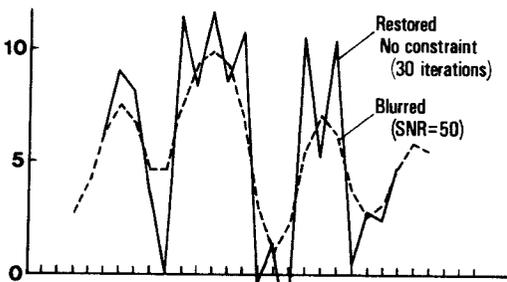
(a) Original image and Gaussian blurred image.

(b) Processed result in 50 iterations by Jacobi's method.

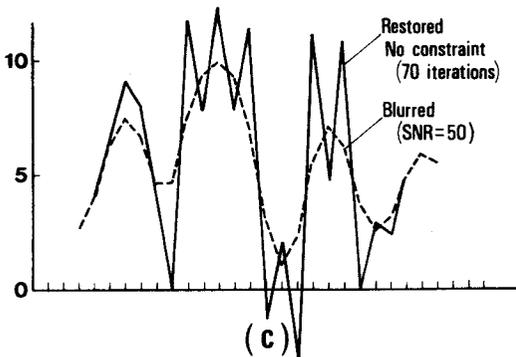
(c) Processed result in 40 iterations by Gauss-Seidel's method.



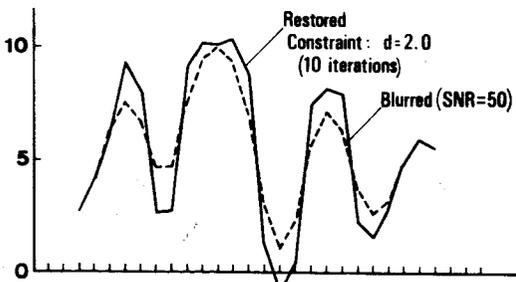
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 54 Simulation results by the iterative image restoration method (Gauss-Seidel's method) in the presence of noise.

- (a) Original image and Gaussian Blurred noisy image (SNR = 50).
- (b) Processed result under no constraint in 30 iterations.
- (c) Same as (b), but in 70 iterations.
- (d) Processed result in 10 iterations under the constraint of Eq. (87), where $d = 2.0$ and $\alpha = 1.0$.

6.5.3 2次元画像への応用

試作した対話型画像処理システムを用い、反復法による実際の2次元画像の修正のシミュレーション実験を試みた。Fig. 55. 及び Fig. 56 にその結果を示す。

Fig. 55(a)は、IEEE が作成したファクシミリ用のテストチャートの劣化像である。この像は 162×144 画素から成る。劣化系はLSIで、そのPSFは次式に示す2次元のGauss関数である。

$$h(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right] \quad (93)$$

ただし、その標準偏差は、標本間隔 $\Delta x, \Delta y$ ($\Delta x = \Delta y$) に対して、 $\sigma = 1.25 \Delta x$ ($= 1.25 \Delta y$) である。この劣化像に対し、初期解を $\hat{O}^{(0)} = i$ とし、緩和係数を $c = 4.0$ として逐次置換法によって修正した結果が、Fig. 55(b) 及び(c) である。Fig. 55(b) は、反復回数1回の処理結果であるが、既にかなり良様に修正されている。Fig. 55(c) は、反復回数6回の処理結果である。Fig. 55(c) では、Fig. 55(b) と比較して、高周波数成分がより回復しており、目元、歯並び、服の輪郭等、非常によく回復され、鮮明になっている。しかし、一方、そこでは、丸め誤差の影響により若干の高周波

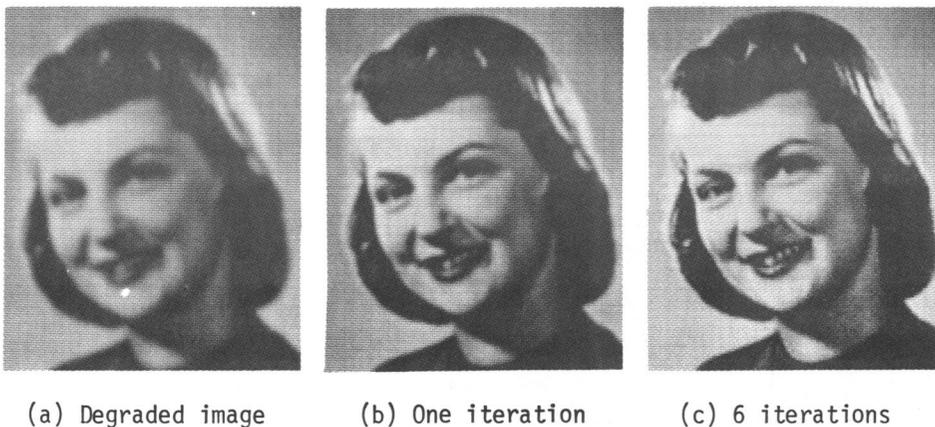
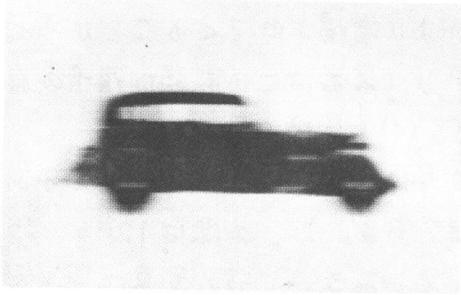


Fig. 55 Experimental results by the iterative image restoration method for the image blurred by the PSF of Gaussian.

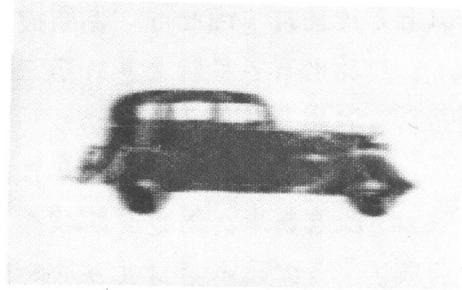
雑音の分布が観察される。この実験では拘束条件を付加していないため、これ以上反復回数を増せば、高周波雑音がより増幅されてくることが予想される。対話形式で実験を進めることにより、著者はこの微弱な雑音の存在を検出し、反復を6回打ち切り、Fig. 55(c)を最終結果とした。

Fig. 56は、流れ写真に対する反復修正法による処理結果である。Fig. 56(a)は自動車の等速直線流れ写真像である。この像は 128×192 画素から成り、その流れ量は水平方向に $134x$ である。流れ写真は、そのOTFが負値の領域をもつため、反復法の収束条件を満足せず、その修正には、再劣化の手続きが必要である。Fig. 56(b)は、Fig. 56(a)の劣化像を再劣化した像であり、Fig. 56(a)よりさらに劣化している。この再劣化像を0回目の推定解として、逐次置換法で修正した結果が、Fig. 56(c)-(f)である。Fig. 56(c), (d), (e)は、それぞれ反復回数が1回、2回及び3回の修正結果である。これらは逐次置換法によって、各反復回において、画面右側の画素から順に求めたため、その結果、Fig. 56(e)を観察すれば、自動車の前部より後部の方がよく回復している。Fig. 56(f)は反復回数10回の修正結果であり、Fig. 56(a)と比較して非常によく回復していると思われる。

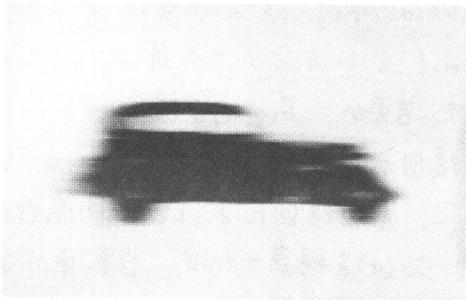
Fig. 55及びFig. 56の実験結果は、著者の提案した反復修正法の対話型画像処理への有用性を示していると思われる。これらの実験結果は、試作した対話型画像処理システムを用い、対話形式で行なわれたが、特に計算の殆んどを占めるコンポリューション、コリレーションは、試作した専用フーリエ変換/コンポリューション・ハードウェアで行なった。したがってこれらの実験における1回の反復当りの処理時間は、フレキシブル・ディスクのアクセス・タイムを除いて、10~30秒である。



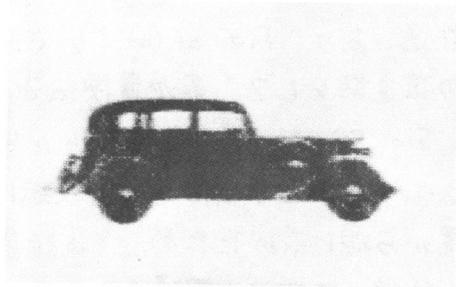
(a) Blurred image



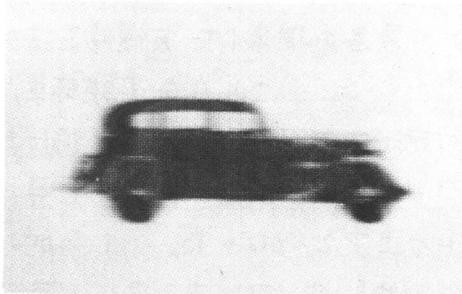
(e) 3 iterations



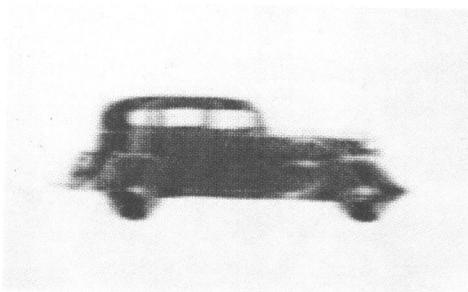
(b) Reblurred image



(f) 10 iterations



(c) One iteration



(d) 2 iterations

Fig. 56 Experimental results by the iterative image restoration method for the image blurred by a linear motion.

6.6 考 察

連立1次方程式の反復解法を改良した反復画像修正法を提案し、シミュレーション実験を通し、その手法の有用性を示した。この修正法は、従来の手法と比べ、最も実用的なもののみとつてあると考えられる。また、劣化系をLSIに限定しないこと、雑音の重畳した画像をも修正できること等、一般的な修正問題に適用できる。以下に、提案した反復画像修正法の特徴を列挙する。

1. 劣化像が逐次回復していく過程を観察できるので、実験者は、その判断を反復計算の途中に入れることができ、対話型処理に適している。
2. メモリ容量が極めて少なく済む。例えば、逐次置換法では画像データとして、入力像 i と修正像 $o^{(k)}$ の2画面分のメモリ容量が必要だけで、計算過程にバッファ・メモリを全く必要としない。これは、2次元フーリエ変換、あるいは直接的な行列演算等の計算を行なうときに必要なメモリ容量と比較すれば極端に少ない。
3. 使用する演算は線形演算(劣化系がLSIのときは、コンボリューション)だけであるので、試作した高速フーリエ変換/コンボリューション器を利用すれば、演算時間を著しく短縮できる。
4. 劣化系をLSIに限定せず、LSVの劣化像も修正できる。
5. コンピュータによる劣化像の再劣化という手法により、この反復法は、原理的には常に収束する。
6. 各反復回において、前回の修正像に依存した拘束条件を緩和行列として導入することにより、この修正法は非線形な処理法となり、雑音の影響による誤まった解が生ずる危険性を防ぐことができる。
7. 6.5.2節、Fig. 52に示したように、反復回を有限で打ち切ることにより、雑音の増幅を抑えることができる。

1.の対話形式による処理への適用性に関して、実験者の仕事としては、具体的に以下の3つが挙げられる。

1. 劣化PSF, $h(x, y)$ の推定誤差の補正: 最初に推定した $h(x, y)$ が実際の劣化PSFと違っておりおれば, 像は回復するどころか, より劣化していくので, 1~2回の反復によって実験者はその誤差を処理像から簡単に発見できる。また, その補正は, PSFの種類さえ既知であれば, 推定劣化量を変化させその1~2回の反復結果を観察していくことにより, 実際の劣化PSFに近づけていくことができる。
2. 拘束条件の変更: 実用上, 拘束条件は非常に重要である。これは, 可能ならば反復回毎に変更していくことが望ましい。一般に初期においては厳しい条件を用い, 回復がほぼ収束し終わった時点で, その条件を除々に緩和していくのが良いと思われる。
3. 反復打ち切り回数決定: 回復が十分完了したと思われる時点で, あるいは, それ以上の反復は, 雑音成分の増幅を招くと判断した時点で, 実験者は, 反復を打ち切る。

Table II Largest eigenvalues for iterative matrices $[M]$ in magnitude for the rectangularly blurred PSFs expressed by Eq.(89) (where $a = 7\Delta x$) and the reblurred PSFs.

Point simultaneous (Jacobi's) method		
Elements number of $[H]$	Largest eigenvalues for the blurred PSFs	Largest eigenvalues for the reblurred PSFs
20 x 20	1.365	0.979
30 x 30	1.419	0.993
40 x 40	1.437	0.995
50 x 50	1.445	0.997
Point successive (Gauss-Seidel's) method		
20 x 20	3.781	0.843
30 x 30	4.440	0.995
40 x 40	4.672	0.972
50 x 50	4.766	0.986

上記の3点は、コンピュータのみに実行させることが殆んど不可能であるかあるいは実行させても、その信頼性の低いものである。そこに、実験者の判断を導入することは、実用的にも、処理結果の信頼性においても妥当なことであると考える。

反復画像修正法の特徴の5. の再劣化による収束条件の緩和に関しては、LSI系の劣化に対する同時置換法に関してのみ証明した。しかし、6.5節のシミュレーション結果では、逐次置換法においても、流れ写真の劣化像を再劣化することにより、解は収束している。このことを、一般的な反復法の収束のための必要十分条件である反復行列の固有値を求めることにより確認した。Table IIに、劣化系のPSFが(89)式で示したrect関数(ただし $a = \gamma \Delta x$)である場合の反復行列と、それを再劣化した場合の反復行列の、最大固有値(絶対値)を示す。Table IIより、同時置換法においても逐次置換法においても、再劣化を行わなければ、物体像の大きさ([H]の要素数は、それに対応する)にかかわらず反復行列[M]の最大固有値は1を超え、(57)式に示した数学的な収束のための必要十分条件を満足しない。一方、再劣化した場合は、常に最大固有値は1未満であり、(57)を満足する。以上の結果より、流れ写真像や焦点はおれ像に対して、同次置換法、逐次置換法のいずれを用いても、再劣化することにより解が収束することかわかる。

第7章 インコヒーレント光学/デジタル ハイスリッド画像処理

7.1 緒言

デジタル処理システムを用いた対話型画像処理の本質的な限界は、分解能と処理時間の相乗で決定される。分解能を高めること、すなわち情報量の増加は、処理時間を長びかせ、反対に、処理時間の短縮は分解能の低下を強いる。一方、光学画像処理システムは、分解能がデジタルシステムよりはるかに高く、処理速度は文字通り光速である。そこで、光学系を一部に導入したハイスリッド画像処理システムは、対話型処理の限界を大きく広げる可能性をもっている。しかし、光学画像処理システムは、処理のプログラム能力、演算能力、能動性(activity)、精度・雑音の問題、製作技術、操作技術等の点で、デジタル処理システムに大きく劣り、安易な、2つのシステムの結合は、むしろ双方の短所のみが表われる。さらに、双方間のインタフェイス要素の欠けも相まって、ハイスリッド処理システムは、単一の処理システムよりも低能力なものとなる可能性が高い。

本章では、デジタル処理システムを中心とし、光学系のもつ上述の欠点や両システムの結合によって生ずる問題点を克服した、インコヒーレント光学/デジタルのハイスリッドな処理システムによる画像処理を提案し、その応用性について述べる。

インコヒーレント光学系は、レーザーを用いたコヒーレント光学系と比較して、製作技術、操作技術が容易であること、バックル雑音の影響等が無いこと、また、物体を強度物体として取扱えるため、リアル・ライフ像を、フィルム等に記憶せずそのまま処理できること等の利点がある。そこで、インコヒーレント光学系をデジタル・システムと組合わせれば、上述のデジタル・システムの特長を損なうことなく、また両者間の情報の

伝達のために特殊な空間変調素子を必要としないため、有効なハイスリット処理システムが形成されると考えられる。しかし、インコヒーレント光学系は、実行できる演算の種類が極めて少ないという大きな欠点を有しており、簡単な結像系では、低周波フィルタリングしか演算できない。

そこで著者は、光学系による処理の長所をすべて生かそうとするのではなく、むしろその欠点をすべて抑えた上で残った長所のみとつづがある。インコヒーレント光学系による低周波フィルタリングの実時間性を生かした、ハイスリット処理システムを考案した。考案したハイスリット・システムによる処理は、純デジタル・システムによる処理と比較して、

1. 処理時間の短縮。
2. 処理パラメータ設定の容易さ。
3. ソフトウェア、またはハードウェアの負担の軽減。

等の長所をもつ。これらの長所は対話型処理に要求される機能と合致しており、提案するハイスリット処理システムが、対話型処理に有効であることを示している。一方、このハイスリット・システムによる処理は、純インコヒーレント光学系による処理と比べて、

1. 高周波フィルタリング、非線形演算等、演算能力の向上。
2. アロケラマスルズであること。
3. インコヒーレント光学系とデジタル・システムを、TVカメラ及びCRTモニタと結合することによって、アクティヴなフィルタリングが可能なこと。

等の点で優れている。しかも、両者を用いることによって装置が複雑になったり操作が面倒になったりすることはなく、通常のデジタル処理システムの利用と全く変わらない。

7.2節及び7.3節に、考案したインコヒーレント光学系とデジタル系を効果的に結合した、ハイスリット・システムによる画像処理について述べ、いくつかの実験結果を通してその有用性を示す。

7.2 インコヒーレント光学系による低周波フィルタリングの応用

7.2.1 高周波空間フィルタリング

よく知られるように、インコヒーレント照明下におけるティフォーカス結像系のOTFは低周波フィルタ特性をもつ⁸⁹。そこで、ある物体のインフォーカス像からそのティフォーカス像を減算すれば、反対に低周波成分が遮断され高周波成分のみから成る像が得られる。これを系のOTFで考えるなら、Fig. 57(a)に示すインフォーカスな結像系のOTFからティフォーカスな結像系のOTFを引くことに対応し、結果的に、Fig. 57(b)に示すような高周波

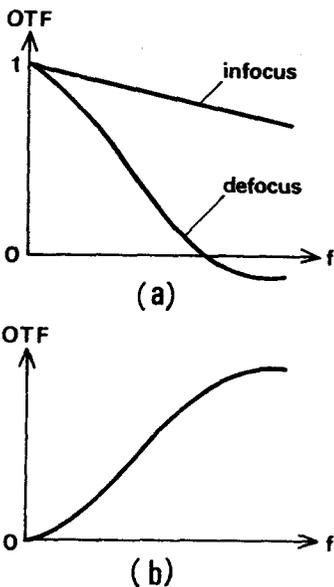


Fig. 57

- (a) OTFs of the infocus and the defocused imaging systems, and
 (b) OTF of the infocus system minus that of the defocused one.

波フィルタ特性をもつOTFを得る。Fig. 58は、このようを表わす説明図である。Fig. 58(a)の実線で示したインフォーカスな像から破線で示したそのティフォーカス像を引けば、Fig. 58(b)に示されるような、高周波成分のみが抽出された像が得られる。ティフォーカス結像系のPSFは、幾何光学的近似が成り立つならば、一様な強度分布をもつ円板状(円形開口に対して)または矩形板状(矩形開口に対して)の形をしており、観察されるティフォーカス像は、物体とそのPSFとのコンボリューション積分で与えられる。すなわち、ティフォーカスな像面における各位置の強度は、物体面における対応位置の近傍の小領域(PSFの広がり)の強度分布の平均値(局所平均)として得られる。この局所平均像を

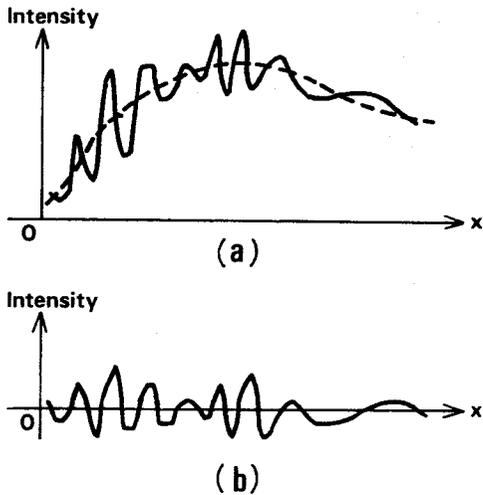


Fig. 58

Illustrations for subtraction of the defocused image (local average) from the infocus one.

インフォーカス像から減算すれば、画面内すべての位置で、局所平均が零の像が得られることになる。この方法は、4.2.4節で試みた処理（局所平均減算処理）と同一の処理であるが、4.2.4節ではコンボリューション演算をコンピュータで行なっていたのに対し、ここではディスプレイフォーカス結像系を行なっている点異なる。そのため、本章の方法は、PSFの広がりがいかに大きくとも、そのコンボリューション演算は瞬時に行なえ、処理時間は2枚の画像（インフォーカス像とディスプレイフォーカス像）の入力時間と、その減算に要する時間のみである。この、純ディスプレイ処理システムに比しての処理時間の極端な短縮は、ハイスリッド処理の対話型処理への適用性を示すものである。一方、この2枚の画像の減算を純光学系を行なおうとすると、写真フィルムの現象・反転の過程が必要になるが、精度の高い複雑な光学系を利用しなければならなくなる。しかし、ハイスリッド・システムでは、同一レンズを使って入力したインフォーカス像とディスプレイフォーカス像を、コンピュータによって減算するため、簡単に精度良い結果が得られる。

Fig. 59に、試作した対話型画像処理システムを用いたハイスリッド・システムによる高周波フィルタリングの実験例を示す。インコヒーレント光学系としては特別なものを装備する必要はなく、画像入用に用いられるビデオンTVカメラに付属した結像レンズ系を利用する。Fig. 59(a)は、TVカメラよりインフォーカスに入力したテストチャートの像(192×

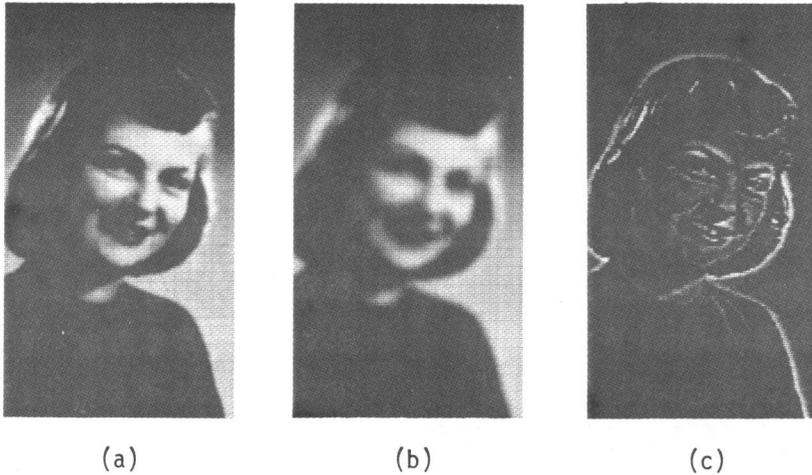


Fig. 59 Experimental results of high-pass filtering by using the hybrid processing system.

- (a) Infocus image (192x128 pixels).
- (b) Defocused image or the local average of (a).
- (c) Processed result by subtraction of (b) from (a).

128画素)である。Fig. 59(b)は、同一テスト・チャートを、ゼネラコン前面の結像レンズを非フォーカス状態にして入力した像である。これはいわゆるピンぼけ写真であるが、Fig. 59(a)の局所平均像であるともいえる。このFig. 59(a)からFig. 59(b)を減算した結果がFig. 59(c)の像である。Fig. 59(c)では零空間周波数が完全に遮断され、高周波成分のみが表示されている。また、2枚の画像の減算は負値をもつが、Fig. 59(c)では、強制的にそれを零に抑えている。

Fig. 59に示したインコヒーレント光学/ゼネラコンのハイブリッド処理システムによる高周波フィルタリングは、試作システムを用いて4秒で実行できる。これは、2枚の画像のTVカメラからの入力時間である。なお、この処理はゼネラコン処理システムを用いなくとも、インコヒーレント光学/電氣的アナログのハイブリッド・システムによっても実現可能である。例えば2台のTVカメラとアナログ加減算器を用いれば、ゼネラコンで実行できるし、FSS (Flying Spot Scanner)や、蓄積管等のアナログ・メモリを利用することによっても実現できる。

7.2.2 インコヒーレント光学系による線形処理とデジタルシステムによる非線形処理の組合せ

7.2.1節の応用として、インコヒーレント光学処理系による低周波フィルタリングとデジタル処理システムによる非線形演算の組合せによる、ハイスリッド処理について述べる。Fig. 60は、僅かに弯曲した金属結晶の電顕写真からの転位線抽出処理の、ハイスリッドシステムによる実験結果である。その手法は、5.2節、Fig. 45で行なったのと同じであり、場所によってコントラストの変化している転位像をその背景像で割ることにより、全画面にわたって適正なコントラストをもつ転位線の抽出を行なうものである。

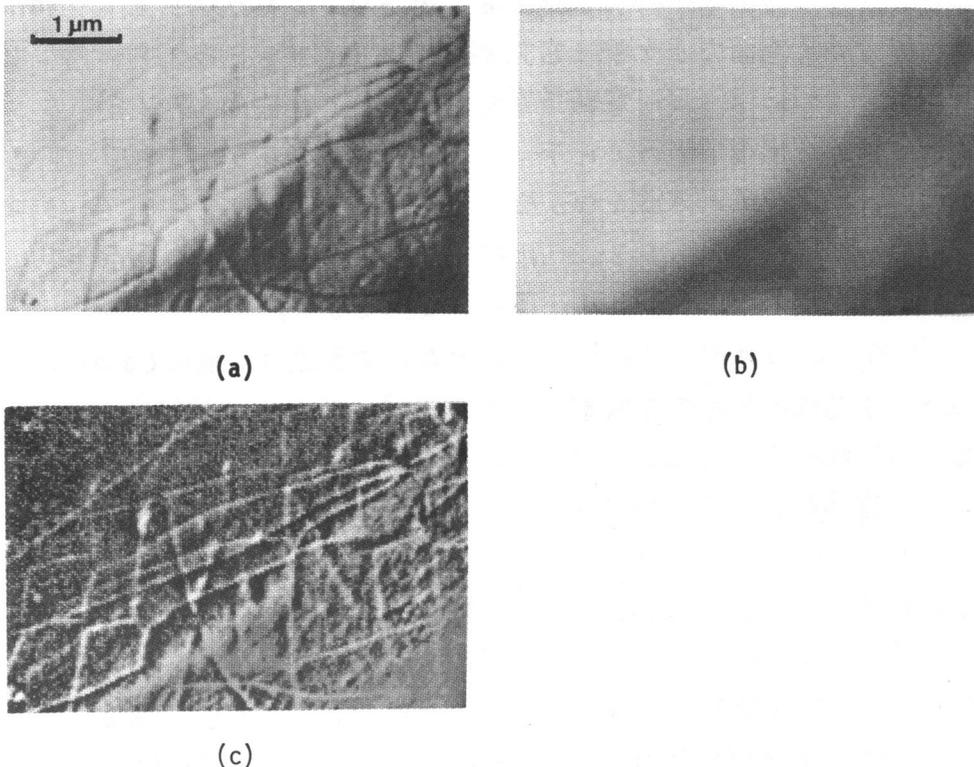


Fig. 60 Experimental results of extraction of dislocation lines from an electron micrograph of an aluminum by using the hybrid system.
 (a) Original image (128x192 pixels).
 (b) Defocused version of (a) or the background image of (a).
 (c) Processed image, which is obtained by division of (a) by (b).

5.2節ではすべての演算を示すデジタル・システムを行なったが、ここでは、インコヒーレント光学系とデジタル・システムの双方を利用する。背景像をつくる低周波フィルタリングはインコヒーレント・ティフォーカス結像光学系で行ない、除算はコンピュータにより、2行なう。ハイスリッド・システムを利用することにより、この処理は僅か4秒(2枚の画像のTVカメラからの入力時間)を行なわれ、純粋にデジタル・システムの利用と比べ、非常に速い。特に、背景像を得るための低周波フィルタリング(局所平均処理)が光学系によって瞬時に行なえ、局所領域の大きさ(処理用PSFの広がり)の変更は、TVカメラを観察しながらレンズ系を手動で操作することによって実時間対話形式で行なえるという長所をもっている。Fig. 60(a)は 128×192 に標準化されたアルミニウムの超高圧電顕写真の転位像である。Fig. 60(a)では、画面中央部においては、適正なコントラストをもつ転位線が観察されるが、画面左上部部、右下部部ではそのコントラストが低下している。Fig. 60(b)は、同一電顕写真を、ゼティコン前面のカメラ・レンズの焦点をはずして撮像し入力したティフォーカス像であり、これは、Fig. 60(a)の転位像の背景を明るくした像となっている。Fig. 60(a)をFig. 60(b)で除算した結果がFig. 60(c)である。処理結果、Fig. 60(c)では、画面全域にわたって転位線が顕著に抽出されているのが観察できる。

Fig. 61はハイスリッド・システムによる適応2値化(adaptive binarization)処理の実験例である。適応2値化処理は、指紋や、汚れ・むらのある印刷物から、各部分に対して可変な閾値を用いて像を2値化することにより、線情報や文字を抽出する処理方法である¹⁷⁾。Fig. 61(a)は、Siemens starの入力像(128×128 画素)である。Siemens starは、白黒2つの濃度レベルしか持たない物体であるがFig. 61(a)では、現像むら、汚れ、照明むら、ゼティコンのシェーティンク等を受け、非常にコントラストが低く、かつ画面全体にわたってむらのある像となっている。これを一定の閾値で2値化したのがFig. 61(b)である。Fig. 61(b)では、Fig. 61(a)における背景の明るさのむらにより画面左端と右端においてSiemens starの情報が見えなくなっている。そこで、一定の閾値のかわりに、可変で最適の(adaptive)閾値によって2値化を行なった。Fig. 61(c)は、TVカメラの焦点をはずして入力した物体像であり、Siemens starの情報は殆んど見失われているが、

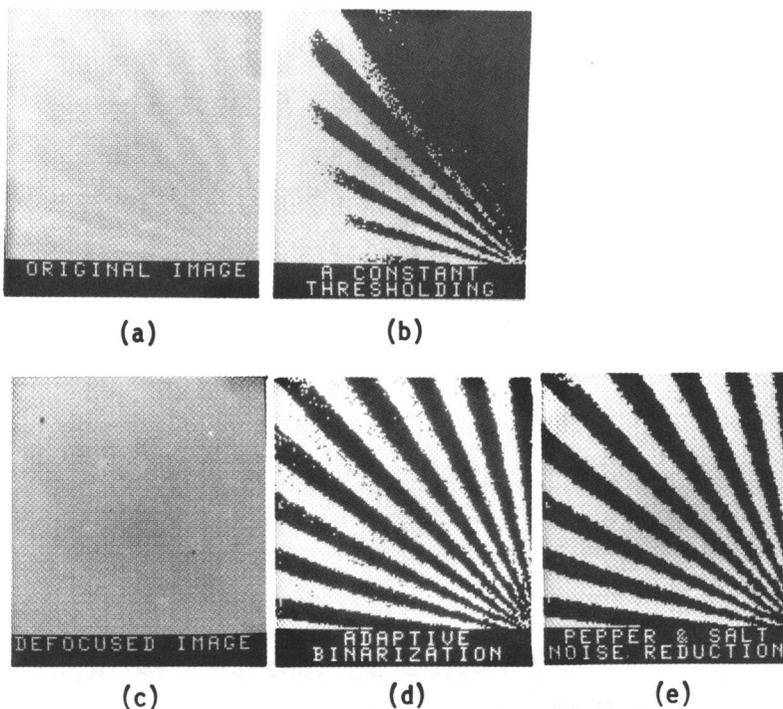


Fig. 61 Experimental results of adaptive binarization by hybrid processing.

ゆるやかな画面のちらやシェーティンクは存在している。この像を可変閾値として、コンピュータにより Fig. 61(a) を 2 値化した結果が Fig. 61(d) である。さらにコンピュータにより非線形な雑音除去処理 (pepper and salt noise removal³¹⁾) を施した結果が Fig. 61(e) である。Fig. 61(b) の一定閾値による 2 値化処理の結果と比較して、最適な 2 値化が行なわれ元の Siemens star 像が良好に抽出されていることが観察できる。

Fig. 60 及び Fig. 61 の処理は、低周波フィルタリングを簡単なインコヒーレント結像光学系で行ない、非線形演算 (除算、2 値化) 処理をコンピュータで行なった。このハイブリッド処理は、以下の特長をもつ。

1. コンピュータのみによる純デジタル処理と比べ、2 次元コンピュータシミュレーション (低周波フィルタリング) の演算時間を著しく短縮する。
2. インコヒーレント光学 / 電氣的アナログのハイブリッド処理に比べ、プログラムミスルであるため処理が汎用性に富む。

3. 2次元コンボリューションの処理PSFの変更は、実験者がカメラ・レンズの焦点を変えるだけよく、簡単である。

特に、1と3の特長は、本節で示したハイブリッド処理が純ティジタル・システムによる処理と比較して、対話型処理に適していることを示していると思われる。

7.3 ハイブリッド・システムによる constant variance enhancement 処理

前節では、情報の伝達は、インコヒーレント光学系からティジタル処理系への一方に限定されていた。本節では、インコヒーレント光学系からティジタル処理系への情報の伝達経路に、ティジタル処理系からインコヒーレント光学系へのフィード・バック・ループが加わったハイブリッド画像処理システムを提案し、その、一定分散強調 (constant variance enhancement) 処理への応用について述べる。

最近、フィード・バック・ループをもつ純光学的な処理が、コヒーレント光学系の利用において提案されており、2.3の実験と試みられている。⁹¹⁻⁹³ しかし、それは、系の設定及び操作に波長オータの精度が要求されること、受動素子(レンズ、ミラー等)のみで構成されるため出力が減衰すること、等の欠点があり、実用的観点から多くの問題を有していると思われる。また、インコヒーレント光学系と電気系(TVカメラ、電気的アナログ回路、TVモニタ)を組合わせたハイブリッドなフィードバック・システムの提案も行なわれている。⁹⁴⁻⁹⁶ この場合、上記のコヒーレント光学系によるフィードバック・システムのもつ欠点は解決されているが、実際にそれらのシステムを利用する場合には、TVシステムの同期、TVカメラとTV

モニタのラスタの相対位置、相対時間の調整に、かなりの精度が要求され、製作・操作が困難であると思われる。このように、フィードバック・ループをもつハイスリッド画像処理システムは、特に光学系への情報のフィードバックに技術的困難が伴い、一般には、純デジタル・システムによる処理の方が、ターン・アラウンド・タイム、精度、操作の容易さの点で有利であると考えられる。

しかし、著者は、一定分散強調処理のような独特の処理に対しては、ハイスリッド処理システムの欠点は一切生じないで、その長所のみを生かせることを提案した⁷。

一定分散強調 (constant variance enhancement: 以下 C V E と略す) は 1977 年、Harris¹⁹ によつて提案された画像強調処理の一手法である。また、この方法は Rosenfeld が提案している統計的差分¹⁰ と同等のものである。その目的は、観測像の情報のランダム性を増加させ、人間にできるだけ多くの抽出すべき情報を提供することである。具体的には、観測像に対して、局所平均と局所分散を全画面にわたって一定にし、画面のどの領域においても、表示装置のダイナミック・レンジ一杯に、しかも飽和することなく、画像を表示する方法である。以下に C V E の手順を数式を用いて表わす。

- i 観測画像 $i(x, y)$ の局所平均像 $\mu(x, y)$ を求める。

$$\mu = i * g \quad (94)$$

ここで、2次元コンボリューション関数、 $g(x, y)$ は、低周波フィルタ特性をもつ P S F である。

- ii 局所平均を一定にする。

$$\bar{i} = i - \mu \quad (95)$$

iii 局所平均からの分散を求める。

$$\bar{i}^2 = (i - \mu)^2 \quad (96)$$

iv 局所分散の像、 σ^2 を求める。

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \bar{i}^2 * g \\ &= (i - \mu)^2 * g \end{aligned} \quad (97)$$

v 局所標準偏差、 σ を求める。

$$\sigma = \sqrt{(i - \mu)^2 * g} \quad (98)$$

よって、局所平均像をこれで割ることにより、局所平均一定、局所分散一定の像を得る。

$$\begin{aligned} \hat{i} &= \frac{i - \mu}{\sigma} = \frac{i - \mu}{\sqrt{(i - \mu)^2 * g}} \\ &= \frac{i - i * g}{\sqrt{(i - i * g)^2 * g}} \end{aligned} \quad (99)$$

(99)式の最後の結果を見れば、CVEは、 g による2次元コンボリューション積分と、減・除算及び自乗と平方根演算から成り立っていることがわかる。そこで、著者は、これらの演算のうち、コンピュータを用いれば非常に時間のかかる2次元コンボリューション(低周波フィルタリング)は、ファイフォーカス結像光学系による2瞬時に計算させ、また、光学系では実現できない非線形演算(除算、自乗、平方根演算)は、コンピュータ内でテーブルマッピングによって計算させる、高速のハイスリット処理を考案した。

Fig. 62に、考案した、フィード・バック・ループをもつ、ハイブリッド処理システムのレイアウトを示す。これは、試作した対話型画像処理システム以外、一切、他の装置・素子を付加せずに、その物理的配置を変

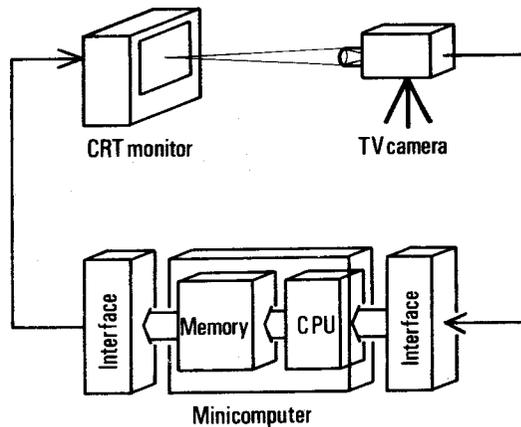


Fig. 62 System layout of incoherent optical/digital hybrid image processing with feedback.

えただけで構成されたシステムである。物体を撮像・入力するTVカメラは、このシステム構成では、CRTモニタの表示画像の撮像装置となり、双方が向い合っている。これにより、コンピュータで処理された像は、CRTモニタ上に表示されるだけでなく、TVカメラのレンズ系（すばめら、インコヒーレント光学処理系）により、2次元コンボリューション演算され、再びTVカメラよりコンピュータに入力される。

Fig. 63に、このハイスリット処理システムによる行なったCV E処理の実験例を示す。Fig. 63(a)は、アルミニウムの電子顕微鏡写真（ネガ）を 128×192 画素にサンプリングし、入力した像である。試料が僅かに彎曲していることにより、照射ビームと結晶格子がBragg角を満足しない部分（Fig. 63(a)において、画面左下、及び右上部）では、転位情報のコントラストが著しく低下している。しかし、実際には、それらの部分においても転位は生じているものと思われる。そこで、既に転位情報が良好に現われている画面中央部の情報を損なうことなく、画面左下、及び右上部の転位情報を強調し、良好なコントラストを抽出することが望まれる。そのためには、画面全体にわたる線形フィルタリング処理は適当ではなく、画面内各局所においてその像コントラストに応じて、可変に処理することが必要である。

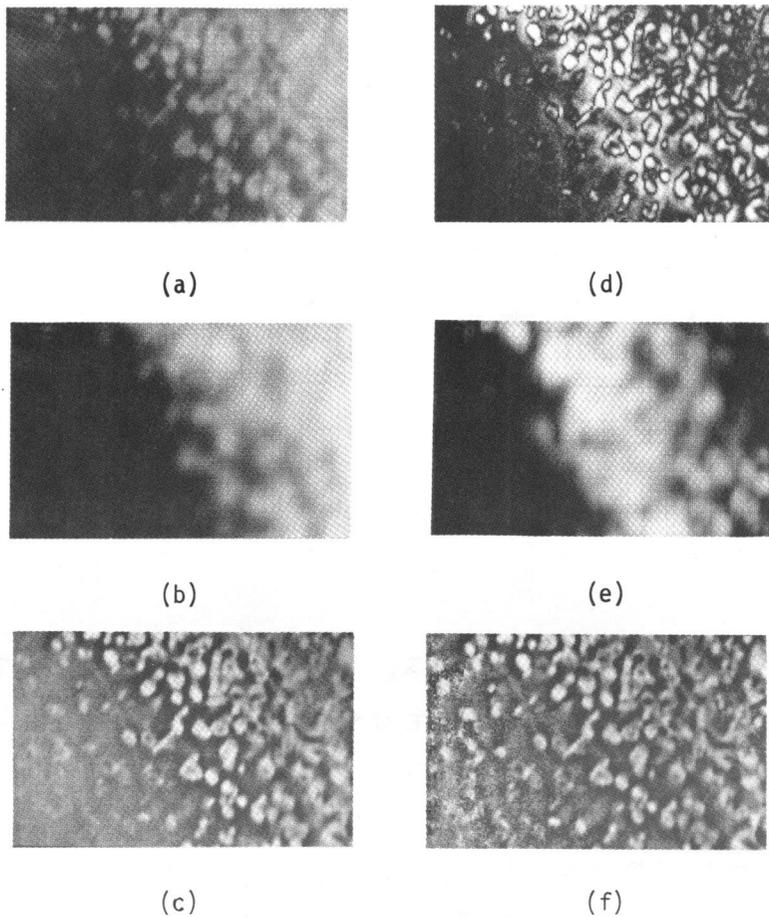


Fig. 63 Experimental results of CVE of an electron micrograph of an aluminum by using the hybrid image processing system shown in Fig. 62.

(a) Original image (128x192 pixels).

(b) Defocused version of (a), or the local average of (a).

(c) Original image of (a) minus defocused image of (b).

(d) Square of (c), or the variance of (a) from (b).

(e) Defocused version of (d), or the local variance of (a).

(f) CVE processed result, or the divided version of (c) by the square root of (e), in which both of the local average and the local variance are constant.

そこで、Fig. 62に示したハイスリッド・システムを用いて、Fig. 63(a)の入力像に対するCUE処理を試みた。以下に、実験手順に沿って処理結果を説明する。

- i Fig. 63(a)の入力像をCRTモニタ上にリフレッシュ表示し、TVカメラからその像を再びコンピュータに入力する。ただし、このとき、TVカメラの結像レンズの焦点を合わせ、表示像のテッフォーカス像が入力されるようにする。Fig. 63(b)は、その結果得られたテッフォーカス像であり、また、これは、Fig. 63(a)の局所平均像であるといえる。
- ii Fig. 63(a)の像からFig. 63(b)の像を減算する。Fig. 63(c)はその結果であり、局所平均が零の像である（ただし、これは負値をもつため、表示に際して、画面全体にバイアスを加えている）。Fig. 63(c)では、Fig. 63(a)のように、画面右上部及び左下部の強度が、白及び黒に飽和することなく、Fig. 63(a)と比べて、既にかなり見やすい像となっている。しかし右上部あるいは左下部における転位像のコントラストは、中央部と比べて依然低い。
- iii Fig. 63(c)の像（ただし画面全体にバイアスを加えていない像）を自乗する。Fig. 63(d)がその結果である。これは、Fig. 63(a)の各画素の局所平均（Fig. 63(b)）からの分散を示している。
- iv Fig. 63(d)の像をCRTモニタ上に表示し、それをiでFig. 63(b)を求めた時と同じテッフォーカス状態のTVカメラ・レンズで撮像してコンピュータに入力する。Fig. 63(e)は、このようにして得られた結果である。この像は、Fig. 63(a)の局所分散を示す像であり、Fig. 63(a)の局所的な信号成分の変動の大きさを示している。Fig. 63(e)の中央部分が白く（すなわち値が大きく）、画面左下部と右上部において黒い（すなわち値が小さい）ことは、画面中央部の像コントラストが高く、画面左下、右上部の像コントラストが低いことを示している。

- V Fig. 63(e)の平方根をとり、それを Fig. 63(c)を割る。Fig. 63(e)の平方根は局所的な標準偏差の像であり、これを局所平均が零の像、Fig. 63(c)を割ると、局所平均が零で局所分散(または局所標準偏差)が一定の像が得られる。Fig. 63(f)がその結果であり、やはり画面全域に一定のバイアスを加えて、その局所平均を一定の濃淡レベルにしている。Fig. 63(f)は、Fig. 63(c)と比較して、もともとコントラストの高かった中央部の転位情報を壊すことなく、しかも画面左下部において、転位情報が十分なコントラストをとって抽出されている。また画面右上部においてもそのコントラストは向上している。画面左端部に見られる雑音は、Fig. 63(c)の対応する部分に信号の変化が殆んど無かったため、Fig. 63(e)の対応部分で局所分散が零に近く、Fig. 63(f)を求める際、Fig. 63(c)を零に近い数で割ることになり、Fig. 63(c)に含まれる僅かな雑音成分を大きく増幅させることによって生じたと思われる。Fig. 63(f)では、画面内どの局所領域でも、分散が一定に大きく、従って、画面内どの局所領域でも強度分布の変化が激しく、像のランダム性が高い。像のランダム性が高いということは、すなわち、像の情報のエントロピーが高いことを意味している。

CVE処理は、純粋なデジタル処理システムのみによっても勿論行なえるが、このようなハイブリッド・システムを用いることによつて、純粋なデジタル・システムと比較して、処理時間の大幅な短縮、処理パラメータ設定の容易さ(パラメータとしては、処理PSF、 $g(x, y)$ の広がりのみであり、それは、レンズの焦点位置を手動で変化させることによつて、自由に簡単に選択できる)等の利点が生ずる。この2つの特長は、特に、繰返し処理が要求される対話型画像処理を効果的に行なう上で、必要かつ重要な要素であると思われる。

7.4 考 察

インコヒーレント光学系とディジタル処理システムを効果的に結合させた。ハイブリッド画像処理システムの提案を行ない、実験結果を通して、その有効性を示した。

7.2節では、ディジタル・システムの特長を打消すことのない光学処理として、インコヒーレント・ファイフォーカス結像光学系による低周波空間フィルタリングについて検討し、これを用いたハイブリッド画像処理への応用を試みた。

7.3節においては、7.2節の技術の応用として、フィードバックループをもつ、インコヒーレント光学/ディジタルのハイブリッド処理システムを提案し、それによるCVE処理実験を行なった。実験例は、ハイブリッド・システムの有用性、特に対話型処理への適用性を証明したと思われる。

ハイブリッド処理は、双方の欠点のみが顕著に表われ、また双方のインタフェイスに問題がある場合が多い。そこで、両者の特長をすべて生かそうとするのではなく、むしろ、両者の欠点を抑えることを目標とすべきであろうと考える。その結果、残る長所が僅かであっても、それがなお単一の処理より優れていれば、その場合に限ってハイブリッド処理システムは有用である。したがって、ハイブリッド・システムによる処理は、汎用性を求めるよりも、各々、特殊目的なものとするのが妥当であると思われる。本章におけるCVEのハイブリッド処理の実験成果も、以下に示す特殊な条件の下で達成されたものである。

1. ファイフォーカス結像系の利用： ファイフォーカス結像であるため、厳密な光学的位置合わせを必要とせず、系の作成・操作が他の光学系と比べて極めて簡単である。また表示した標本比画像を、再びTVカメラで入力し、サンパルしても、サンパリングの同期が表われず、そのため、モアレ現象が生じない。

2. CRTモニタの利用: CRT管面の現象効果により、厳密な同期を必要としない。
3. 試作システムの時分割動作: 画像を表示し終わってから入力したのでは、表示像は消えて、その情報は伝わらない。表示と入力は同時に行なわれる必要がある。本章の実験では、これは、試作システムの、画像表示装置、画像入力装置等の時分割動作によって実現できた。

第8章 総 括

本論文は、画像処理研究の中でも最も基本的であり、かつ重要とされる、“画像改善”の処理が、現在なお、シミュレーション段階にとどまっている点に着眼し、その実用化を阻む種々の問題点を検討し、“対話型処理”の考え方を導入することにより、これらの克服を試みた。対話型処理は、コンピュータの演算能力と、人間の観察・認識・判断能力の双方を積極的に利用し、しかも、双方をインタラクティブな形で結合させた処理方式であり、本研究により、実用的観点から、その実際の画像改善処理への適用性が高いことが明らかになったものと思われる。以下に、本研究により得られた知見及び成果を各章毎に総括し、今後の研究課題を考案する。

第1章では、序論として、画像修正及び画像強調を定義し、その現状を把握した上で、現在の画像修正及び画像強調の実用化を阻むいくつかの本質的な問題を提起した。以下にそれらを要約して列挙する。

1. 現実の画像修正の問題においては、画像の劣化に関する十分な情報が与えられていない場合が多いことを考慮して、その場合のマン・マシンの対話型処理の必要性を説いた。
2. 画像修正及び画像強調を行なう *a priori* な手法と、*a posteriori* な手法について比較し、*a posteriori* な画像処理法の必要性を述べた。
3. 従来の多くの画像修正法は、劣化系をLSIに限定している場合が多いが、実際にはLSV系による劣化像の修正の要求も非常に多い。そこで、いずれの系による劣化像の修正をも行なえる手法の必要性を論じた。

4. ハイブリッドなシステムによる画像処理は、画像処理の適用性を大きく広げる可能性をもちながら、現在、有効なハイブリッド処理法の提案はほとんど無い。そこで、ハイブリッド・システムのもつ本質的な問題点を十分認識した上で、それらを克服した有効なハイブリッド・システムを作成する必要性を述べた。

第2章において、種々のデジタル画像処理装置を検討し、新たな、対話型画像処理に適したデジタル処理システムの試作を行なった。また、試作システムの性能を評価した。試作したシステムは、以下の特徴をもつ。

1. ミニコンピュータを核とした小型・低価格の対話型画像処理システムである。
2. ミニコンピュータのメイン・メモリを中心とした構成をもち、各装置間の画像情報の転送が高速に行なえる。とくに、CRTモニタは、メイン・メモリの内容を人間の目にちらつきなくリフレッシュ表示する。
3. メモリ・アクセスを時分割するという特殊な動作方式により、入力過程、処理過程においても、CRTモニタ上にこれらの像をリフレッシュ表示することが出来る。
4. フーリエ変換/コンボリューション器をハード・ウェア化したことにより、処理時間が大幅に短縮された。

これらの特徴は、対話型処理を行なうためには、必要不可欠なものである。試作システムがこれらの特徴を有することによって、3章以降の対話型画像処理実験が効果的に実現できた。

第3章では、対話型画像処理を行なうための、ディジタル処理に要求される機能を検討し、それを満足する処理方法について考察した。

1. 対話型処理に適するディジタル処理方法のひとつとして、微分、及び平滑化微分の利用を提案した。
2. 微分、及び平滑化微分演算を、画像強調、画像修正へ応用することを検討し、実際に試作したシステムを用いて、その応用実験を試みた。得られた結果が良好であることより、微分、及び平滑化微分が、対話型の画像修正/画像強調に有用であることを確認した。

提案した微分演算を応用した画像修正、及び強調は、処理時間が短く、メモリ容量が小さくて済むこと、処理パラメータが簡単で、その各々の果す役割が明白であること、等の特長より、対話型処理に適するものと考えられる。

第4章では、試作したシステムを用い、実際の医用画像への対話形式による画像強調、及び特徴抽出を試みた。

1. 微分、平滑化微分、及び局所平均減算処理によって、顕微鏡で実際に得られた像、及び医用X線写真像の微細構造の抽出、低コントラスト像の立体表示等を試み、良好な結果を得た。
2. 非線形な強度変換 (bits removal, histogram equalization 及び、局所的 histogram equalization) によって、X線写真及び電子顕微鏡写真のコントラストの改善を試み、良好な結果を得た。また、これらの処理は、演算時間、メモリ容量の点で、対話型画像処理に極めてよく適合する方法であることを確認した。
3. 上述の1. 及び2. の2つの処理方法を応用し、X線写真像の edge-sharpening、並びにコントラストの向上を行なった。

第5章では、超高電圧電子顕微鏡より得られる画像の対話型処理による改善を試みた。

1. 僅かに歪曲した金属結晶の転位像は、場所によってそのコントラストが変化しているが、2つの手法によって、これを処理し、画面全体にわたって適正なコントラストをもつ処理結果像を得た。用いた手法のひとつは、線形フィルタリングと非線形強度変換の2ステップによる処理であり、もうひとつは、簡単な除算による非線形処理である。
2. 超高電圧電子顕微鏡を用いれば、生物試料を、カスを封入したカセセル中に入れたまま、生存状態で観察することが出来るが、この画像はかなり劣化している。そこで、このような劣化像に対して画像強調を試みた。
3. latexの焦点はホールの電子顕微鏡写真より、対話形式による画像修正を試みた。また、劣化像及び処理結果像の強度変換像より、処理結果の正当性を評価した。

これから処理結果より、効果的な画像修正、及び画像強調技術は、超高電圧電子顕微鏡の有用性を、より高める可能性をもつと考えられる。

第6章では、多元連立1次方程式の反復解法を改良し、新しい反復型画像修正法を提案し、シミュレーション結果を通じて、その有用性を検討した。この画像修正法は、以下の特徴をもつ。

1. 劣化像が逐次回復していく様子を観察できるの、実験者の判断を反復途中に導入でき、対話型処理に適している。
2. 必要とするメモリ容量が極めて小さい
3. 使用する演算はコンピュータの中心にあるので、試作した、高速フーリエ変換/コンピュータ・ハードウェアを利用すれば、演算時間は極めて短い。

4. 劣化像をLSIに限らず、LSVの場合にも適用できる。
5. 劣化系のコンピュータによる再劣化という手法を提案した。これにより、この修正法は常に収束する。
6. 拘束条件を導入したことにより、この修正法は非線形な処理法となり、雑音の影響による解の発散、あるいは誤った解への収束の危険性を防ぐことができる。
7. 反復回数を有限回で打ち切ることにより、雑音の強調を抑えることができる。

以上の特長より、提案した反復型の画像修正法は、第3章で述べた手法を含む従来の画像修正法より、一般的かつ、遙かに実用性が高い。しかも、新話型処理に非常によく適合した画像修正法であると考えられる。この章では、提案した反復型修正法が上記の特長をもつことを、シミュレーション結果を通して確認した。

第7章では、試作したデジタル画像処理システムと、簡単なインコーレント結像光学系を組み合わせた、ハイスリッド・システムによる画像処理法をいくつか考案した。これらは、両システムの欠点、及び両者を結合することによって生ずる欠点をすべて抑えた処理法である。しかも、従来のデジタル処理、あるいは純光学処理のいづれよりも優れており、また、新話形式で行なうのに有効な処理法である。以下に、試作したデジタル画像処理システムと、そのTVカメラに付属する結像レンズを利用して試みた、ハイスリッド処理法を列挙する。

1. ティフォーカス結像光学系の低周波フィルタリング特性を巧みに応用した、高周波フィルタリング。
2. 1と、コンピュータの非線形強度変換の組合わせによる金属結晶の転位像の電顕写真からの転位線抽出処理、及び適応2値化処理。
3. フィードバック・ループをもつハイスリッド・システムによる constant variance enhancement 処理。

以上、本研究で得られた成果より、対話型画像処理法は、従来の画像修正/画像強調法と比べ、格段に実用性の高い手法であると結論づけられる。

今後の研究課題としては、まず、対話型処理における人間の果たすべき役割を明確にすることが挙げられる。コンピュータのみによる処理は、真の像と全く異なった像を生む可能性が高く、その結果をうのみにすることは極めて危険であるが、一方、人間が処理へ介入しすぎることまた、故意に誤った結果を生ずる恐れがある。そこで、HVSの果たすべき役割の範囲を明確にしなければならぬ。対話型処理は、人間の広い知識、経験と、優れた総合的判断能力を利用するものであるから、特に第5章を示したような、金属結晶の電顕写真処理などにおいては、その知識のない実験者の安易な介入は、むしろ望ましくない。これを専任とする研究者が、顕微鏡像から観察したい情報を強調、抽出していったはじめ、電顕の性能をよまわす画像が得られるものと考えられる。

第2章、システムの試作に関しては、最近発達の極めて顕著な各種エレクトロニクス素子を利用していくことにより、試作システムより小型かつ低価格で、しかもより高性能な対話型画像処理システムが作成でき、各種結像システム(顕微鏡、望遠鏡、電子顕微鏡、X線カメラ、超音波撮像システム等)にそれを内蔵することが十分可能になりつつあると思われる。

第3章では、3.5節で触れた、フィルタ関数を有限次数のフーリエ級数で近似することによる、少ない要素数から成る重み系列の設計の研究の発展が望まれる。特に、不等式拘束条件下でのその設計法は、従来の手法と比較し、最も一般化されたものであると考えられる。

第6章、反復型画像修正法は、本研究では、まだ、提案とシミュレーションしか行なっていない。しかし、この方法は、非常に実用性が高いことが予想されることより、今後、実際の実験への応用が期待される。

第7章は、最近のデジタル処理一辺倒の勢において、ハイブリッド・システムを用いることにより、その限界の超越を試みたものがある。今後、単に、テラフォーカス結像系による低周波フィルタリングに限らず、インコヒーレント光学系によるマスクの2次元コンボリューション演算と、デジタル処理における繰返し演算、非線形演算を組み合わせることにより、99%のインコヒーレント光学/デジタルのハイブリッド処理が行なえるものと考えられる。

謝 辞

本論文は、著者が大阪大学工学部応用物理学教室において、鈴木達朗教授の御指導の下に行なった研究をまとめたものである。終りに臨み、終始懇切なる御指導と御鞭撻を賜りました鈴木達朗教授に深く感謝の意を表します。

また、本研究の遂行に当り、その細部にわたるまで終始貴重な御教示と御助言を頂きました岡芳樹助教授に厚く御礼申し上げます。

本学応用物理学教室橋本初次郎教授、並びに、同電気工学教室藤井克彦教授には、論文作成にあたって検討して頂きました。深く感謝いたします。

大阪大学超高压電子顕微鏡センターの藤田広志教授、田端禎造助手には、貴重な電顕写真の提供と有益なる御助言を頂きました。また、大阪大学微生物研究所の寺田央氏には医用X線写真の提供と討論をして頂きました。ここに記して謝意を表します。

著者が本研究に携ゆる動機を与えてくださいました伊集一良氏、実験に際し多くの協力を頂いた徳光純氏、林文雄氏、柴田幸一氏、松岡克典氏をはじめ、終始激励と援助を頂きました鈴木研究室の諸兄に心から感謝いたします。

最後に、著者をあらゆる面で支えてくれた妻めぐみの助力はなにものにもかえがたいものであることを、末尾に付記したい。

参 考 文 献

著者発表論文

第2章 - 第4章

1. S. Kawata, Y. Ichioka and T. Suzuki,
"Man-machine conversational image processing system,"
J. Phys. E: Sci. Instrum., 11, (1978).
2. Y. Ichioka, S. Kawata and T. Suzuki,
"Techniques for observation of dynamic characteristics of moving
phenomena using digital image processing system with a linear
photodiode array,"
J. Phys. E: Sci. Instrum., (submitted).
3. 松岡克典, 河田 聡, 一岡芳樹, 鈴木達朗,
"高速のフーリエ変換/コンポリューション器の試作とその画像処理への
応用,"
光学, 7, 207 (1978).

第5章

4. S. Kawata, Y. Ichioka and T. Suzuki,
"Man-machine interactive image processing of high-voltage electron
micrograph images,"
Optik, 46, (1978).
5. T. Suzuki, Y. Ichioka, S. Kawata and K. Kondo,
"Image enhancement and simulation experiments of image restoration
in electron microscopy,"
Proc. 5th Int. Conf. on High Voltage Electron Microscopy, (Kyoto,
Aug. 1977), pp. 175-178.

第6章

6. S. Kawata, Y. Ichioka and T. Suzuki,
"Applications of man-machine interactive image processing system
to iterative image restoration,"
Proc. 4th Int. Joint Conf. on Pattern Recognition, (Kyoto, Nov.
1978), pp. 525-529.

第7章

7. S. Kawata, Y. Ichioka and T. Suzuki,
"Hybrid image processing for feature extraction and constant
variance enhancement,"
Optica Acta, (submitted).
8. J. Tokumitsu, S. Kawata, Y. Ichioka and T. Suzuki,
"Adaptive binarization using hybrid image processing system,"
Appl. Opt. 17, 2655 (1978).
9. Y. Ichioka and S. Kawata,
"Hybrid image processing using a simple optical technique,"
*Proc. US-Japan Seminar on Research towards Real-time Parallel
Image Analysis and Recognition*, (Tokyo, Oct. 1978).

その他の文献

10. A. Rosenfeld, "Picture Processing by Computer," (Academic Press,
New York, 1969).
11. H. C. Andrews, A. G. Tescher and R. P. Kruger, *IEEE spectrum*, 9,
20 (July 1972).
12. H. C. Andrews, *Computer*, 7, 36 (May 1974).
13. 長谷川, *信学誌*, 59, 1194 (1976).
14. J. K. Howkins and C. J. Munsey, *J. Opt. Soc. Am.*, 57, 914 (1967).
15. 長谷川, 佐野, *テレビジョン誌*, 31, 552 (1977).
16. 滝沢, *第5回画像工学コンファレンス論文集*, (1974), pp. 37.
17. H. C. Andrews, *Appl. Opt.*, 15, 495 (1976).
18. D. J. Ketcham, *Proc. SPIE, Image Processing*, 74, 120 (1976).

19. J. L. Harris, *Appl. Opt.*, 16, 1268 (1977).
20. J. W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics," (McGraw-Hill, New York, 1968).
21. J. Tsujiuchi, "Progress in Optics," E. Wolf ed., Vol. 2, (North Holland, Amsterdam, 1963).
22. A. Vander Lugt, *Optica Acta*, 15, 1 (1968).
23. G. W. Stroke and R. G. Zech, *Phys. Lett.*, 25A, 89 (1967).
24. A. W. Lohmann and H. W. Werlich, *Phys. Lett.*, 25A, 590 (1967).
25. H. C. Andrews and B. R. Hunt, "Digital Image Restoration," (Prentice-Hall, New Jersey, 1977).
26. B. R. Frieden, "Image Enhancement and Restoration," in *Picture Processing and Digital Filtering*, T. S. Huang ed., (Springer-Verlag, Berlin, 1975), Chap. 5.
27. T. G. Stockham, T. M. Cannon and R. B. Ingebretsen, *Proc. IEEE*, 63, 678 (1975).
28. E. R. Cole, PhD Dissertation, *Comput. Sci. Dep., Univ. Utah*, UTEC-CSc-74-029 (1973).
29. T. M. Cannon, PhD Dissertation, *Comput. Sci. Dep., Univ. Utah*, UTEC-CSc-74-091 (1974).
30. D. P. MacAdam, *J. Opt. Soc. Am.*, 60, 1617 (1970).
31. T. S. Huang, W. F. Schreiber and O. L. Tretiak, *Proc. IEEE*, 59, 1586 (1971).
32. *J. Opt. Soc. Am.*, Special Issue on Adaptive Optics (March 1977)
33. G. Hausler, *Opt. Commun.*, 6, 38 (1972).
34. M. C. King and D. H. Berry, *Appl. Opt.*, 10, 208 (1971).
35. A. A. Sawchuk, *Proc. IEEE*, 60, 854 (1972).
36. Y. Ichioka, K. Itoh and T. Suzuki, *Appl. Opt.*, 16, 462 (1977).
37. G. R. Robbins and T. S. Huang, *Proc. IEEE*, 60, 862 (1972).

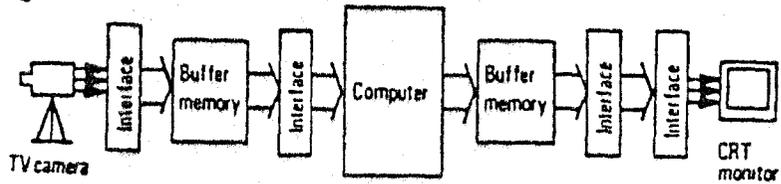
38. F. C. Billingsley, *Appl. Opt.*, 9, 289 (1970).
39. F. B. Barrett and R. N. Devich, *Proc. SPIE, Image Processing*, 74, 152 (1976).
40. T. S. Huang and P. M. Narendra, *Appl. Opt.*, 14, 2213 (1975).
41. D. Casasent, *Opt. Eng.*, 13, 228 (1974).
42. *IEEE Trans. Comput.*, Special issue on Optical computing, C-24, (April 1975).
43. B. J. Thompson, *Proc. IEEE*, 65, 62 (1977).
44. 一岡, 映像情報 *MEDICAL*, 10, 133 (1978).
45. 丸谷, 永田, 田中, 北浜, 第7回画像工学コンファレンス論文集,(1976), pp.101.
46. S. H. Lee, *Appl. Phys.*, 10, 203 (1976).
47. D. Casasent, *Proc. IEEE*, 65, 143 (1977).
48. 森, 信学誌, 59, 1201 (1976).
49. イメージ・プロセス研究委員会, 情報処理, 16, 720 (1975).
50. 一岡, 第7回画像工学コンファレンス論文集(1976), pp.89.
51. COMTAL社, Catalog (1978).
52. 森, "画像情報処理とその応用," 信学会関西支部専門講習会講演論文集, (1977), pp. 47.
53. J. S. Bendat, *IEEE Trans. Bio-Med. Engng.*, BME-11, 72 (1964).
54. T. G. Stockham, *Proc. IEEE*, 60, 828 (1972).
55. C. W. Helstrom, *J. Opt. Soc. Am.*, 57, 297 (1967).
56. R. J. Arguello, H. R. Sellner and J. A. Stuller, *IEEE Trans. Comput.*, C-21, 812 (1972).
57. B. R. Frieden, *J. Opt. Soc. Am.*, 64, 682 (1974).
58. T. E. Riemer and C. D. McGillem, *Appl. Opt.*, 12, 2027 (1973).
59. B. E. A. Saleh, *Appl. Opt.*, 13, 1833 (1974).
60. M. J. McDonnell, *Optik*, 43, 159 (1975).
61. G. Backus and F. Gilbert, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, A266, 123 (1970).

62. W. Swindell, *Appl. Opt.*, 9, 2459 (1970).
63. T. Honda, J. Tsujiuchi and S. Ishiguro, *Optica Acta*, 21, 653 (1974).
64. J. L. Harris, *J. Opt. Soc. Am.*, 56, 569 (1966).
65. 渡辺 慧, "認識とパターン," (岩波新書, 1978).
66. C. W. Wylie, "Advanced Engineering Mathematics," (McGraw-Hill, New York, 1960).
または日本語訳, 畠久泰久訳, "工業数学," (ブレイン図書, 1962), pp. 131.
67. A. Savitzky and M. J. E. Golay, *Anal. Chem.* 36, 1627 (1964).
68. J. G. Fiasconaro, "Two-dimensional Nonrecursive Filters,"
in *Picture Processing and Digital Filtering*, T. S. Huang ed.,
(Springer-Verlag, Berlin, 1975), Chap. 3.
69. 一岡, 第16回光学懇談会サマリー・セミナー講演論文集(諏訪, 1978).
70. G. N. Hounsfield, *Brit. J. Radiology*, 46, 1016 (1973).
71. 渡辺, 日経エレクトロニクス, 151, 102 (1977).
72. 日経エレクトロニクス, 160, 48 (1977).
73. C. A. Harlow, S. J. Dwyer and G. Lodwick, "On Radiographic Image Analysis," in *Digital Picture Analysis*, A. Rosenfeld ed.,
(Springer-Verlag, Berlin, 1976), Chap. 3.
74. K. Preston, "Digital Picture Analysis in Cytology," in reference 73,
73, Chap. 5.
75. E. L. Hall, R. P. Kruger, S. J. Dwyer, D. L. Hall, R. W. McLaren
and G. S. Lodwick, *IEEE Trans. Comput.*, C-20, 1032 (1971).
76. E. L. Hall, *IEEE Trans. Comput.*, C-23, 207 (1974).
77. S. Goldman, "information theory," (Prentice-Hall, New York, 1953).
または日本語訳. 関英男訳, "情報理論," (近代科学社, 1956).
78. S. Ozasa, Y. Kato, H. Todokoro, S. Kasai, S. Katagiri, H. Kimura,
E. Sugata, K. Fukai, H. Fujita and K. Ura, *J. Electr. Micros.*, 21,
109 (1972).

79. J. W. Goodman, in reference 11, Chap. 2.
80. B. Wendroff, "Theoretical Numerical Analysis," (Academic Press, New York, 1966).
または日本語訳, 戸川隼人訳, "理論数値解析," (サイエンス社, 1973), pp. 151
81. 森正武, "数値解析," (共立出版, 1973), pp. 26-44.
82. T. S. Huang, D. A. Barker and S. P. Berger, *Appl. Opt.*, 14, 1165 (1975).
83. E. S. Angel and A. K. Jain, *Appl. Opt.*, 17, 2186 (1978).
84. P. H. van Cittert, *Z. Physik*, 69, 298 (1931).
85. P. A. Jansson, *J. Opt. Soc. Am.*, 60, 184 (1970).
86. 森正武, 参考文献 81 の pp. 36 及び pp. 51.
87. P. A. Jansson, R. H. Hunt and E. K. Plyler, *J. Opt. Soc. Am.*, 60, 596 (1970).
88. T. M. van Veen, F. C. A. Green and P. W. Verbeek, *Proc. 4th Int. Joint Conf. on Pattern Recognition*, (Kyoto, nov. 1978), pp. 505.
89. J. W. Goodman, in reference 11, Chap. 6.
90. 込内, 村田編, "光学情報処理," (朝倉書店, 1974), pp. 157.
91. S. H. Lee, *Opt. Eng.*, 13, 196 (1974).
92. D. P. Jablonowski and S. L. Lee, *Appl. Phys.*, 8, 51 (1975).
93. N. G. Gallagher, *Appl. Opt.*, 15, 882 (1976).
94. A. W. Lohmann, *Opt. Commun.*, 22, 165 (1977).
95. G. Häusler and A. W. Lohmann, *Opt. Commun.*, 21, 365 (1977).
96. G. Häusler and M. Simon, *Optica Acta*, 25, 327 (1978).

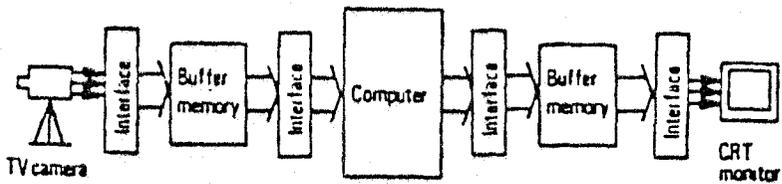
正誤表

pp. 17 Fig. 2



(b)

↓



(b)

pp. 103

(81)式

$$\frac{1}{h_{mn}} \rightarrow \frac{1}{h_{mn, mn}}$$

pp. 106

(87)式

$$\begin{aligned} \text{for } 0 \leq \hat{o}_{mn} < d &\rightarrow |\hat{o}_{mn} - i_{mn}| \leq d \\ \text{for } \hat{o}_{mn} < 0, \hat{o}_{mn} > d &\rightarrow |\hat{o}_{mn} - i_{mn}| > d \end{aligned}$$

pp. 113

11行目

Fig 53 (b) → Fig 53 (c)

pp. 146

参考文献 1

11, (1978) → 11, 1191 (1978)

参考文献 4

46, (1978) → 52, 235 (1978/79)

pp. 147

参考文献 7

(submitted) → 26, 1549 (1979)

参考文献 9

Proc. US-Japan ...

→ REAL-TIME PARALLEL COMPUTING IMAGE ANALYSIS
(1981) (Plenum Pub. Corp, N.Y)

論文追加

- Satoshi Kawata and Yoshiki Ichioka:

" Iterative image restoration for linearly degraded images. I. Basis",

J. Opt. Soc. Amer., 70, No.7 762-768(1980).

- Satoshi Kawata and Yoshiki Ichioka:

" Iterative image restoration for linearly degraded images. II. Reblurring procedure",

J. Opt. Soc. Amer., 70, No.7 768-772(1980).

- 河田 聡

" 線形劣化像の反復法による修正",

光学, 10, No.4 243-252(1981).