



Title	インコヒーレント光/電子複合型画像認識システムの研究
Author(s)	野村, 孝徳
Citation	大阪大学, 1991, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3085230
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

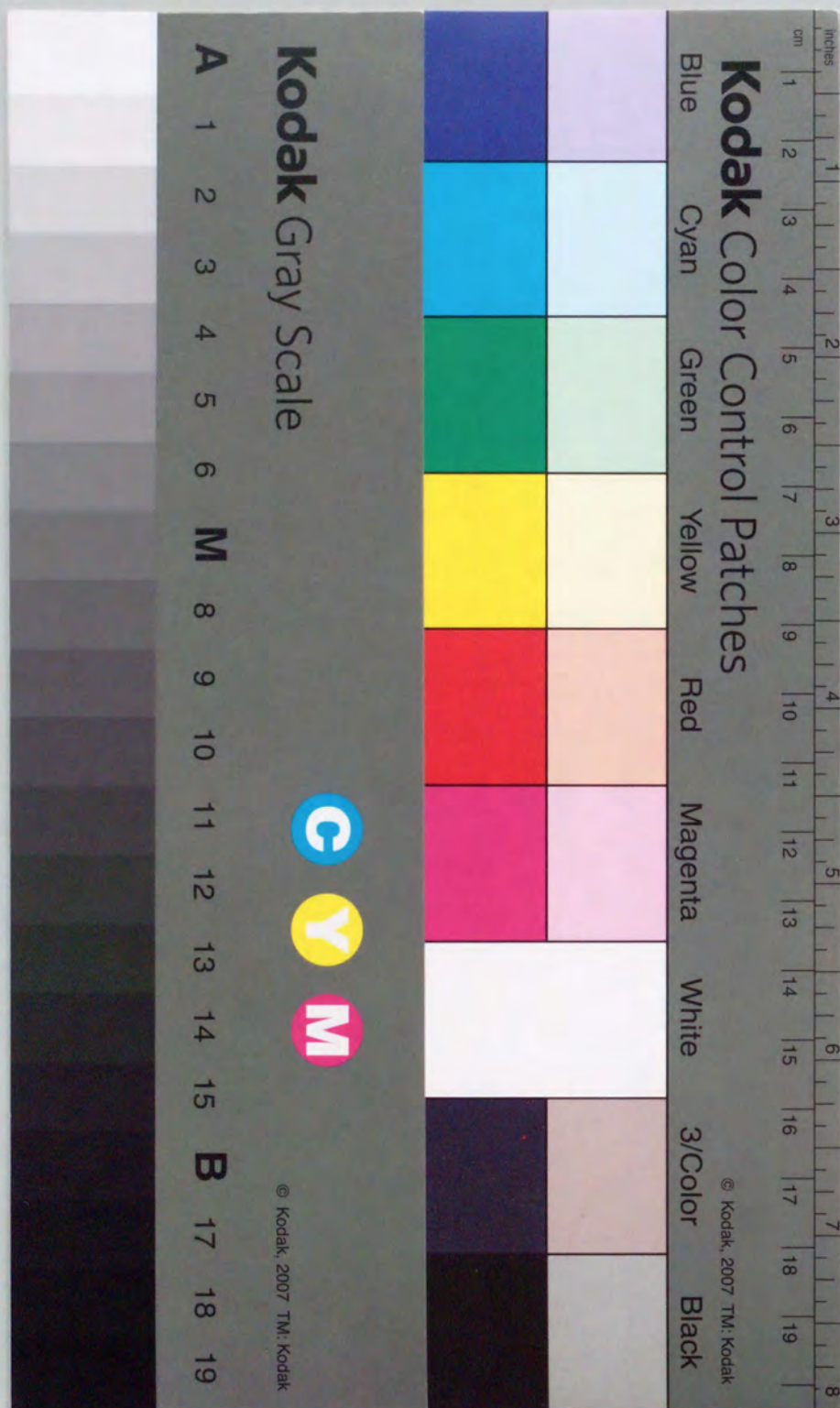
<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

インコヒーレント光／電子複合型画像認識システムの研究
Study on Incoherent-Optical/Electronic Hybrid Pattern Recognition Systems

1990年10月

野村孝徳
Takanori Nomura



①

インコヒーレント光／電子複合型画像認識システムの研究
Study on Incoherent-Optical/Electronic Hybrid Pattern Recognition Systems

1990年10月

野村孝徳
Takanori Nomura

Dedicated to my late father and my mother.

目 次

緒論	1
第1章 2次元相関関数を用いたパターン認識	4
§1-1 緒言	4
§1-2 2次元相関関数とパターンマッチング	4
§1-3 2次元フーリエ変換を用いたパターンマッチング	5
§1-3-1 デジタル処理系による実現	6
§1-3-2 光学処理系による実現	6
a コヒーレント光学系	6
b インコヒーレント光学系	7
§1-3-3 ハイブリッド処理系による実現	7
§1-4 シアリング干渉計	8
§1-4-1 回転シアリング干渉計	8
§1-4-2 ラディアルシアリング干渉計	14
§1-4-3 光源のスペクトル分布	15
§1-5 結言	16
第2章 光学的余弦変換を用いたハイブリッドパターンマッチング	17
§2-1 緒言	17
§2-2 余弦変換を用いたパターンマッチング	17
§2-3 ハイブリッドパターンマッチングシステム	19
§2-4 バイナリーインコヒーレントホログラム	20
§2-5 実験システムの試作および実験	24
§2-5-1 実験システムの試作	25
a システムの構成	25
b 制御系	27
§2-5-2 光学的余弦変換	27
§2-5-3 光源のスペクトル分布	29
§2-5-4 シア量	29
§2-5-5 パターンマッチング	31
§2-6 処理速度の評価	34
§2-7 結言	35
第3章 光学的ハートレー変換を用いたハイブリッドパターンマッチング	37
§3-1 緒言	37
§3-2 ハートレー変換を用いたパターンマッチング	37
§3-3 実験結果	40
§3-3-1 計算機シミュレーション	40
§3-3-2 ハイブリッドシステムにおける実験	42
§3-4 結言	44

第4章 2値フーリエ位相相関	46
§4-1 緒言	46
§4-2 位相フィルタと2値位相フィルタ	46
§4-3 フーリエ位相相関と2値フーリエ位相相関	48
§4-4 従来の相関法との比較	49
§4-5 2値フーリエ位相相関の空間周波数面における振る舞い	52
§4-6 2値フーリエ位相相関の問題点とその解決策	57
§4-6-1 高調波の問題	57
§4-6-2 テスト物体のフーリエ変換の3値化	58
§4-7 偏光素子を用いた2値フーリエ位相相関	60
§4-8 結言	63
第5章 多物体認識フィルタの設計	65
§5-1 緒言	65
§5-2 従来の多物体認識	65
§5-2-1 座標変換を利用した多物体認識	65
§5-2-2 関数展開を利用した多物体認識	66
§5-2-3 合成識別関数フィルタ	66
§5-3 多数決法による多物体認識フィルタの設計	69
§5-3-1 設計法	69
§5-3-2 多数決法	69
§5-3-3 実験結果	72
§5-4 二乗誤差最小化法による多物体認識フィルタの設計	73
§5-4-1 評価関数の決定	74
§5-4-2 サイドローブの問題	74
§5-4-3 シミュレーティッド・アニーリングによる解法	75
a 計算機シミュレーション	78
b 実験結果	81
§5-5 結言	84
総括	85
謝辞	88
参考文献	89
著者発表論文	93

Significant Notations

(x)	coordinate of spatial plane
(v)	coordinate of spatial frequency plane
(τ)	coordinate of a correlation plane
(x, y)	coordinates of an object plane
(ξ, η)	coordinates of a detector plane
(u, v)	renewal coordinates of coordinate transform
λ	wavelength
$\Delta\lambda$	half width of a wavelength
λ_0	central wavelength
k	wave number ($2\pi/\lambda$)
θ	shearing angle of a rotaional shearing interferometer
z_1, z_2	path length from an object to the detector plane in a rotaional shearing interferometer
z_0	harmonic mean of two path lengths in a rotaional shearing interferometer
Δz	path difference of two path lengths in a shearing interferometer
M_1, M_2	magnification of a radial shearing interferometer
f_1, f_2	focal length of two lenses in a radhial shearing interferometer
v_1, v_2	optical disturbance of an interferometer
T	temparature of a simulated annealing
n	the number of iteration of a simulated annealing
$f(x)$	a reference object
$f_e(x)$	even part of a reference object
$f_o(x)$	odd part of a reference object
$F(v)$	Fourier transform of a reference object
$F_c(v)$	cosine transform of a reference object
$F_s(v)$	sine transform of a reference object
$g(x)$	a test object
$G(v)$	Fourier transform of a test object
$G_c(v)$	cosine transform of a test object
$G_s(v)$	sine transform of a test object
$P(x, y)$	brightness distribution of an incoherent object
$I(\xi, \eta)$	power distribution of an incoherent hologram
$I_A(\xi, \eta)$	alternative component of an incoherent hologram
$I_B(\xi, \eta)$	power distribution of a binary incoherent hologram

★	correlation
*	convolution
a^*	complex conjugate of a
$FT[\cdot]$	Fourier Transform
$FT^{-1}[\cdot]$	Inverse Fourier Transform
$CT[\cdot]$	Cosine Transform
$ST[\cdot]$	Sine Transform
$HT[\cdot]$	Hartley Transform
$RHT[\cdot]$	Rotated-by- π Hartley Transform
$B[\cdot]$	Binary phase-only operation
$P[\cdot]$	Phase-only operation
$T[\cdot]$	Ternarization operation
$A[\tau]$	Autocorrelation function
$C[\tau]$	Crosscorrelation function
j	imaginary unit
γ	a slope of a linear region of the Hurter-Driffeld curve
f	SDF filter
g_i	training set images
R	correlation matrix of training set images
r_{ij}	component of correlation matrix of training set images
a	vector of weighted coefficient
c	vector of desired correlation peak values
$H[\cdot]$	Heaviside's unit step function
B_i	binary incoherent hologram
B_s	synthesized binary incoherent hologram

Abbreviations

BCT	Binary version of Cosine Transform
BHT	Binary version of Hartley Transform
BPOC	Binary Fourier Phase-Only Correlation
BPOF	Binary Phase-Only Filter
BRHT	Binary version of Rotated-by- π Hartley Transform
BS	Beam Splitter cube
BST	Binary version of Sine Transform
CAR	Crosscorrelation to Autocorrelation Ratio
CCD	Charge Coupled Device
CGH	Computer Generated Hologram
CRT	Cathode Ray Tube
ECP	Equal Correlation Peak
FAHM	Full Area at Half-Maximum of autocorrelation
FFT	Fast Fourier Transform
JTC	Joint Transform Correlator
LCTV	Liquid Crystal Television
MF	Matched Filter
MOD	Magneto-Optic Device
MOF	Mutual Orthogonal Function
POC	Fourier Phase-Only Correlation
POF	Phase-Only Filter
PP	Polarization Plate
P_1, P_2	roof Prism refractor
QBPOC	Quasi-Binary Fourier Phase-Only Correlation
S	an incoherent point Source
S_1, S_2	imaginary incoherent point Sources
SDF	Synthetic Discriminant Function
SLM	Spatial Light Modulator
SN比	Signal to Noise (Ratio)

Figure Captions

- Fig. 1-1. マッチトフィルタリングの光学系 [7]
 Fig. 1-2. 回転シアリング干渉計 [9]
 Fig. 1-3. 二つの光波の干渉 [9]
 Fig. 1-4. 回転シアを受けた点光源 [10]
 Fig. 1-5. 座標系のとり方 [11]
 Fig. 1-6. 回転シアリング干渉計による余弦変換：(a)光軸に遠い一点 s' ；(b)光軸に近い一点 s'' ；(c) s' から形成された干渉縞；(d) s'' から形成された干渉縞；(e) s' の再生像；(f) s'' の再生像 [13]
 Fig. 1-7. ラディアルシアリング干渉計 [15]
 Fig. 2-1. 余弦変換を用いたパターンマッチング：(a)参照物体；(b)テスト物体；(c)参照物体の偶関数部；(d)テスト物体の偶関数部；(e)相関関数；(f)偶関数部から求めた相関関数 [19]
 Fig. 2-2. 提案するハイブリッドシステム [20]
 Fig. 2-3. バイナリーインコヒーレントホログラムの特徴を調べるために用いた物体 [21]
 Fig. 2-4. (a)インコヒーレントホログラムと(b)バイナリーインコヒーレントホログラム（計算機シミュレーションの結果） [22]
 Fig. 2-5. (a)インコヒーレントホログラムからの再生像と(b)バイナリーインコヒーレントホログラムからの再生像（計算機シミュレーションの結果） [22]
 Fig. 2-6. 余弦変換を用いたパターンマッチングの計算機シミュレーションに用いた(a)参照物体と(b)テスト物体 [23]
 Fig. 2-7. (a)インコヒーレントホログラムを用いた相関関数と(b)バイナリーインコヒーレントホログラムを用いた相関関数（計算機シミュレーションの結果） [23]
 Fig. 2-8. 実験システム [25]
 Fig. 2-9. 光学系 [26]
 Fig. 2-10. 入力画像 [28]
 Fig. 2-11. 入力画像のインコヒーレントホログラム [28]
 Fig. 2-12. 計算機による再生像（干渉フィルタを使用しない場合） [28]
 Fig. 2-13. 計算機による再生像（干渉フィルタを使用した場合） [29]
 Fig. 2-14. シア量と相関値の関係を調べるために用いた(a)参照物体と(b)テスト物体 [30]
 Fig. 2-15. シア量と相関値の関係（計算機シミュレーションの結果） [30]
 Fig. 2-16. パターンマッチングの実験に用いた(a)参照物体と(b)テスト物体 [32]
 Fig. 2-17. 参照物体の(a)インコヒーレントホログラムと(b)バイナリーインコヒーレントホログラム（ハイブリッドシステムによる実験結果；バイアスが不均一な場合） [32]
 Fig. 2-18. 参照物体の(a)インコヒーレントホログラムと(b)バイナリーインコヒーレントホログラム（ハイブリッドシステムによる実験結果；不均一なバイアスを除外した場合） [33]
 Fig. 2-19. バイナリーインコヒーレントホログラムの積（ハイブリッドシステムによる実験結果） [33]
 Fig. 2-20. 相関関数：(a)光学系からの出力と(b)それを2値化したもの（ハイブリッドシステムによる実験結果） [34]
 Fig. 2-21. 処理速度の比較 [35]
 Fig. 3-1. ハートレー変換を用いたハイブリッドパターンマッチングのブロックダイアグラム [40]
 Fig. 3-2. 計算機シミュレーションに用いた画像：(a)参照物体；(b)テスト物体 [41]
 Fig. 3-3. (a)余弦変換と(b)ハートレー変換による相関関数の比較（計算機シミュレーションの結果） [41]
 Fig. 3-4. 実験系 [42]
 Fig. 3-5. ハイブリッドシステムによる実験に用いた画像：(a)参照物体；(b)テスト物体 [43]

Figure & Table Captions

- Fig. 3-6. (a)テスト物体のBHTと参照物体のBCTとの積（equivalent operation）のハートレー変換；(b)テスト物体のBRHTと参照物体のBSTとの積（equivalent operation）のハートレー変換（ハイブリッドシステムによる実験結果） [44]
 Fig. 3-7. (a)相関信号と(b)2値化処理された相関信号（ハイブリッドシステムによる実験結果） [44]
 Fig. 4-1. 相関関数を得る五つの方法 [49]
 Fig. 4-2. 相関関数の比較のために用いた(a)参照物体と(b)テスト物体 [50]
 Fig. 4-3. 相関関数の形状：(a)MF；(b)POF；(c)BPOF；(d)POC；(e)BPOC（計算機シミュレーションの結果） [51]
 Fig. 4-4. POCとBPOCとの関係を示すために用いた(a)参照物体と(b)テスト物体 [52]
 Fig. 4-5. (a)参照物体のフーリエ変換の複素共役と(b)テスト物体のフーリエ変換それぞれの一部分の複素表示 [53]
 Fig. 4-6. (a)参照物体のフーリエ変換の複素共役と(b)テスト物体のフーリエ変換それぞれを位相化したものの一部分の複素表示 [53]
 Fig. 4-7. Figure 4-6の積 [53]
 Fig. 4-8. フーリエ位相相関：(a)振幅分布；(b)縦方向の断面図 [54]
 Fig. 4-9. (a)参照物体のフーリエ変換の複素共役と(b)テスト物体のフーリエ変換それぞれを2値位相化したものの一部分の複素表示 [54]
 Fig. 4-10. Figure 4-9の積 [55]
 Fig. 4-11. 2値フーリエ位相相関：(a)振幅分布；(b)縦方向の断面図 [55]
 Fig. 4-12. テスト物体の(a)フーリエ変換と(b)その複素共役 [56]
 Fig. 4-13. Figures 4-12の(a)と(b)の和 [56]
 Fig. 4-14. Figures 4-4の2値フーリエ位相相関とフーリエ位相相関を求めると等価になる物体 [56]
 Fig. 4-15. 計算機シミュレーションに用いた(a)参照物体と(b)テスト物体 [57]
 Fig. 4-16. 2値フーリエ位相相関（計算機シミュレーションの結果） [58]
 Fig. 4-17. 2値フーリエ位相相関の断面図：(a)横軸；(b)縦軸 [58]
 Fig. 4-18. テスト物体の(a)2値化されたフーリエ変換と(b)3値化されたフーリエ変換（計算機シミュレーションの結果） [59]
 Fig. 4-19. 準2値フーリエ位相相関（計算機シミュレーションの結果） [60]
 Fig. 4-20. 準2値フーリエ位相相関の断面図：(a)横軸；(b)縦軸 [60]
 Fig. 4-21. 光学的2値フーリエ位相相関器 [61]
 Fig. 4-22. 光学的2値フーリエ位相相関器の各素子の働き [62]
 Fig. 4-23. 光学的準2値フーリエ位相相関器の各素子の働き [63]
 Fig. 5-1. トレーニングセット [70]
 Fig. 5-2. フィルタ設計のための係数を決定するために用いた画像 [71]
 Fig. 5-3. さまざまな係数による相関関数の形状：(a)すべて1；(b)SDFフィルタの係数；(c)規格化した後のSDFフィルタの係数；(d)ECP-SDF-BPOF（計算機シミュレーションの結果） [71]
 Fig. 5-4. 多数決フィルタの有用性を確認するために用いたテスト物体 [72]
 Fig. 5-5. ハイブリッドシステムによる実験結果：(a)筆記体、活字体の同時認識；(b)活字体の認識；(c)筆記体の認識 [73]
 Fig. 5-6. サイドロープを抑えるための新たな八つの画像 [75]
 Fig. 5-7. 一般的な評価関数 [76]
 Fig. 5-8. 温度が確率に与える影響：(a)温度 T の値が高いとき；(b)温度 T の値が低いとき [77]
 Fig. 5-9. 検出パターン [78]
 Fig. 5-10. 非検出パターン [79]

- Fig. 5-11. さまざまなフィルタとの相関値の比較：(a)回転角0度の文字から作成したフィルタ；(b)多数決法により作成したフィルタ；(c)二乗誤差最小化法により作成したフィルタ（計算機シミュレーション結果） [80]
- Fig. 5-12. サイドロープの抑制効果：(a)サイドロープ・リダクションなし；(b)サイドロープ・リダクションあり（計算機シミュレーションの結果） [81]
- Fig. 5-13. (a)検出パターンと(b)非検出パターン [82]
- Fig. 5-14. テスト物体 [82]
- Fig. 5-15. 相関出力：(a)検出パターンから作成したフィルタとの相関；(b)検出パターンから作成したフィルタとの相関を2値化したもの；(c)設計したフィルタとの相関；(b)設計したフィルタとの相関を2値化したもの（ハイブリッドシステムによる実験結果） [83]

Table Captions

- Table 2-1. Equivalentの真理値表 [24]
- Table 4-1. 五つの光学的相関の振る舞い [51]
- Table 5-1. K-tuple SDFフィルタの応答 [68]
- Table 5-2. 重み係数 [70]

緒 論

画像認識は、広範な工学的応用分野を持ち、その実用化に大きな期待がかけられている技術である。最も期待される応用分野としては、工場のラインにおける製品検査、自動走行自動車のための交通標識の認識¹、指紋による個人照合装置²などが挙げられる。一般に画像認識を行なう手法は、大きく2種類に分けることができる。一つは、図形の線と線の結合関係や頂点の数などを調べて画像を認識する人工知能的な手法である。他の一つは、既知の画像（以下、参照物体と呼ぶ）と未知の画像（以下、テスト物体と呼ぶ）との相関を調べ、その値が高いものを参照物体と同一の物体と見なす手法であり、パターンマッチングと呼ばれる。

本研究で取り扱うパターンマッチングは、人工知能的な手法よりも低レベルの処理であるため、取り扱うデータ量が圧倒的に多い。したがって、その実行には、2次元並列処理を基本とした光情報処理技術^{3,4}が古くから利用されていた。もちろん、電子計算機を用いたデジタル処理も試みられていたが、実時間処理はほとんど望めなかった。

光情報処理によるパターンマッチングは、1964年のVander Lugtのマッチトフィルタリング（Matched Filtering, 以下MFと略す）の研究⁵、および、1966年のWeaverらの結合変換相関器（Joint Transorm Correlator, 以下JTCと略す）の研究^{6,7}に遡ることができる。その後、レーザーやホログラフィーの技術の進歩と共に、1970年代初期には、光情報処理の中心課題として広く研究が行なわれていた。しかし、当時の方法では識別度があまり良くなく、古典的な方法として最近では余り注目されなくなっていた。ところが、1984年、Hornerらの研究⁸を契機として、識別能力の高いパターンマッチングの方法が提案され^{9,10}、再び、光情報処理によるパターンマッチングが脚光を浴び始めた。そして、Hornerらの研究とCasasentら¹¹やHsuら^{12,13}の複数の物体の認識の研究と結びつき、より識別能力の高い実用性のある手法の研究が行なわれるようになってきた¹⁴⁻¹⁸。

コヒーレント光学系を用いたパターンマッチングを実用化するには、インコヒーレントな実世界のパターン情報をコヒーレント光学系の入力に適合させるためにインコヒーレント・コヒーレント変換を行なう空間光変調素子（Spatial Light Modulator, 以下SLMと略す）が必要である。現在、SLMの開発が急ピッチで進められている¹⁹が、ようやく実用の入り口に立った段階である。入手可能なものもあるが、かなり高価である。SLMが開発された場合でも、コヒーレント光学系では、系に特有な、スペックル雑音などの問題が常に付きまとうといった欠点がある。

インコヒーレント光学系を用いた場合には、投影光学系を用いて画像の相関を求める方法があるが、扱うことのできる空間周波数に制限がある。そのため、インコヒーレント相関光学系は、Tanidaらによって光コンピュータの並列光論理演算の実行に用いられている²⁰他は、一部²¹を除いてあまり用いられていない。

電子計算機を用いたデジタル処理は、光学情報処理に対して、処理の柔軟性、精度、再現性などに優れている。画像を1度フレームメモリに取り込んでおけば、プログラムによってさまざまな処理を行なえるという特徴がある。最近では、高速な画像処理シス

テムの開発が精力的に行なわれている²²が、2次元的な拡がりを持った、画像情報（広帯域の情報）の実時間2次元相関演算を行なうことはできない。これらの欠点を避けるため、光学情報処理とデジタル電子処理を組み合わせたハイブリッド処理²³が注目されるようになってきた。この処理方法は、光学情報処理の長所とデジタル電子処理の長所を活かした技術である。しかし、巧みに行なわなければ、「虻蜂捕らず」、すなわち、両者の欠点がいたずらに目立つことにもなりかねない。その原因の一つに両者の間を効果的に結ぶインターフェイス素子がないことが挙げられる。

コヒーレント光学系とデジタル電子処理系とを組み合わせたハイブリッドシステムによる画像認識の研究には次のようなものがある。Minemotoら²⁴は、画像のフーリエパワースペクトルから特徴量を抽出し、特徴ベクトル空間における画像の分類をコンピュータで行なった。Yuら²⁵やJavidiら¹⁸は、JTCにTVカメラや液晶TVなどを用いて画像認識の高速化を行なった。清水ら²⁶やKamemaruら²⁷は、複数の物体の認識をMFの技術とコンピュータを用いて行なった。いずれの研究もSLMの使用を前提としており、早期実用化は困難であると思われる。

一方、インコヒーレント光学系とデジタル電子処理系とを組み合わせたハイブリッド処理による画像認識の研究はほとんどなく、僅かに、基礎的な研究が行なわれているにすぎない。Jutamuliaら²⁸は、インコヒーレント光学系のインパルスレスポンスを設計し、光学系の出力をコンピュータで処理し、画像のフーリエ変換が得られることを提案した。Wangら²⁹やBreckinridgeら³⁰はシアリング干渉計の出力をコンピュータで処理し、画像のフーリエ変換を得た。しかしながら、いずれの研究も画像の認識には至っていない。これは、インコヒーレント光学系を用いることによって生じる長所よりも短所の方が目立ってしまったためと考えられる。

本研究の目的は、従来のシステムに比べ、飛躍的に識別能力が高く、高速に処理ができ、かつ、多物体の認識への適用も可能な、実用的な複合型画像認識システムを開発することである。著者は、インコヒーレントシアリング干渉計とデジタル電子処理系とを組み合わせたハイブリッド処理系を用いると、両者の長所を活かしたシステムを構築できることを見出した。そして、この処理系を用いることによって、識別能力や処理速度が従来の方法に比べて、飛躍的に向上した、実用的なインコヒーレント光／電子複合型画像認識システムを開発することに成功した。インコヒーレントシアリング干渉計を採用すると、SLMの必要性がなく、コヒーレント光学系を用いる際に生じる問題点から開放される。また、インコヒーレント光学系を採用することによって生じる問題点はデジタル処理系によって補うことができる。

以下に本論文の構成と内容を記す。

第1章では、2次元相関関数を用いたパターンマッチングについて述べる。まず、フーリエ変換を用いたパターンマッチングについて概説する。続いて、インコヒーレント光学系でフーリエ変換を求めるのに必要なシアリング干渉計について詳述する。

第2章では、余弦変換を用いてパターンマッチングを行なうハイブリッドシステムを提案し、試作システムについて述べる。さらに、干渉計で得られるインコヒーレントホ

ログラムを2値化したバイナリーインコヒーレントホログラムを提案する。提案したアルゴリズムに基づき、試作したシステムを用いて実験を行ない、余弦変換を用いたパターンマッチングシステムの有用性の確証を得る。バイナリーインコヒーレントホログラムを用いると認識能力が飛躍的に向上し、かつ、処理の高速化も図れ、インターフェイス素子に対する拘束条件を緩和することができる。提案したシステムの処理速度とデジタル計算機の処理速度との比較を行ない、高速処理ができることを示す。

第3章では、ハートレー変換を用いたパターンマッチングの新しい手法を提案する。提案したアルゴリズムに基づき、計算機シミュレーション、および、試作したハイブリッドシステムを用いた実験を行ない、ハートレー変換を用いたパターンマッチングの有用性の確証を得る。ハートレー変換を用いることで、余弦変換を用いたときに残されていた偽出力の問題を解決することができる。

第4章では、バイナリーインコヒーレントホログラムを用いたパターンマッチングを、位相フィルタや2値位相フィルタの観点から整理し、バイナリーインコヒーレントホログラムを用いたパターンマッチングが、2値フーリエ位相相関となっていることを示す。そして、従来の相関法との比較を行い、その認識能力が向上していることを定性、定量的に示す。また、2値位相相関の問題点を指摘しその解決策を提案する。さらに、2値フーリエ位相相関を偏光素子を用いて実行する新しい手法を提案する。

第5章では、システムの処理能力の向上のために多物体を認識する新しいフィルタの設計法を二つ提案する。一つは比較的処理が簡単な多数決法であり、もう一つは、任意の相関値を得ることができる二乗誤差最小化法である。提案した二つの手法を基に、計算機シミュレーション、および、ハイブリッドシステムにおける画像認識の実験を行ない、その有用性の確証を得る。

最後に、本研究の成果について総括し、今後の研究課題について述べる。

第1章 2次元相関関数を用いたパターン認識

§1-1 緒言

本章では、まず、パターンマッチングの基本となる2次元相関関数の定義について述べ、パターンマッチングの意義を述べる。次に、フーリエ変換を用いたパターンマッチングの手法について、ディジタル処理系、光学系を用いた手法について概説する。光学的な手法としてコヒーレント光学系を利用したパターンマッチング、および、インコヒーレント光学系を利用したパターンマッチングについて述べる。ディジタル処理系やコヒーレント光学系のみを利用してパターンマッチングを行なう場合の問題点を指摘し、インコヒーレント光学系を用いる方法の特徴について述べる。

§1-4では、インコヒーレント物体のフーリエ変換を得るために必要なシアリング干渉計について詳説する。さらに、インコヒーレント物体がスペクトル分布を持つときのフーリエ変換に対する影響について考察する。

§1-2 2次元相関関数とパターンマッチング

本節では、相関関数を定義し、パターンマッチングについて述べる。ただし、話を簡単にするため以下、1次元で議論を進める。2次元の場合へも、この議論がそのまま拡張、適用できる。

参照物体を $f(x)$ 、テスト物体を $g(x)$ としたとき、両者の相互相関関数（あるいは単に相関関数と呼ばれる） $C[\tau]$ は、

$$C[\tau] \equiv f(x) \star g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x - \tau) g(x) dx \quad (1-1)$$

で定義される。ここで、 $\star$ は相関演算を表わす。この相関関数は、参照物体 $f(x)$ と、座標が τ だけ離れたテスト物体 $g(x)$ との間にどれだけ相関があるかを示す尺度である。特に、両物体の位置関係が相対的に等しいとき（ $\tau=0$ ）の値、すなわち、相関関数の原点の値を相関値と呼ぶことにする。しばしば、この相関値のみで類似度が判断される。また、相関関数は、 $C[\tau]$ の代わりに、単に $f(x) \star g(x)$ と表記されることが多いが、 τ の関数であることに注意が必要である。

$C[\tau]$ の大きさは、参照物体とテスト物体との類似度を決定する基準となる。参照物体とテスト物体の両者が一致した場合、すなわち、 $g(x) = f(x)$ のとき、相関関数は、自己相関関数となり、一致しない場合の相互相関関数よりも大きな値を示すからである。

次に、テスト物体が参照物体と形状は全く同じであるが場所が異なっている場合を考える。すなわち、 $g(x) = f(x - \Delta x)$ で表すことができる場合を考える。このとき、相互相関関数は

$$C[\tau] = \int_{-\infty}^{\infty} f(x - \tau) f(x - \Delta x) dx \quad (1-2)$$

で表される。 $X = x - \Delta x$ と変数変換すれば、

$$\begin{aligned} C[\tau] &= \int_{-\infty}^{\infty} f(X + \Delta x - \tau) f(X) dX \\ &= A(\tau - \Delta x) \end{aligned} \quad (1-3)$$

となる。ただし、 $A[\tau]$ は、

$$A[\tau] \equiv f(x) \star f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x - \tau) f(x) dx \quad (1-4)$$

で表わされる自己相関関数である。結局、自己相関関数の形状は変わらず、場所が Δx だけずれることがわかる。このときの相関関数の最大値を相関ピークと呼ぶ。すなわち、相関ピークの位置から参照物体と同じ物体の場所がわかる。

相関関数を用いたパターン認識、すなわちパターンマッチングでは、参照物体とテスト物体が同じであるかが相関ピークの大きさから、また、同じであれば何処にあるかが、相関ピークの位置からわかる。

§1-3 2次元フーリエ変換を用いたパターンマッチング

(1-1)式に従って、相関関数を求めようとする、入力信号が2次元画像の場合は、 τ の値を2次元的に変化させながら積分をしなければならないために、膨大な量の計算が必要になり、高速な処理ができない。

相関関数を定義通り求める代わりに、フーリエ変換を用いる方法がある。参照物体 $f(x)$ とテスト物体 $g(x)$ のフーリエ変換 $F(v)$ と $G(v)$ は、

$$F(v) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \exp(-j2\pi vx) dx, \quad (1-5a)$$

$$G(v) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \exp(-j2\pi vx) dx, \quad (1-5b)$$

で表わされる。ここで、 j は虚数単位である。(1-5a)、(1-5b)を用いると相関関数は次式で表わされる。

$$f(x) \star g(x) = \text{FT}^{-1}[F^*(v)G(v)]. \quad (1-6)$$

ここで、 $*$ は複素共役を、 $\text{FT}^{-1}[\cdot]$ は逆フーリエ変換演算を表わす。すなわち、 $F^*(v)$ と $G(v)$ の積の逆フーリエ変換が、参照物体 $f(x)$ とテスト物体 $g(x)$ との相関関数となる。一般に、高速フーリエ変換（Fast Fourier Transform、以下FFTと略す）を用いると、(1-1)式

から相関関数を直接求めるよりも、(1-6)式から求めるほうが演算時間は短く、実用的にはフーリエ変換を用いて相関関数を求めることが多い。また、フーリエ空間では第4章で述べるような位相化（本論文では位相化という単語は位相情報のみにするという意味で用いる）、2値位相化などの付加的な処理が可能である。

以下、フーリエ変換法を用いてディジタル処理系、光学系の順でパターンマッチングを行なう方法について述べる。

§1-3-1 デジタル処理系による実現

ディジタル処理の場合は、フーリエ変換を求めるために、FFTを用いる。つまり、系全体の処理速度は、FFTの演算速度に依存する。現在のところ、世界最高速級のデータ処理用VLSIを使用しても、512点×512点の複素演算の場合、計算時間は、956msec必要である（32ビット超高速イメージプロセッサT9506、東芝³¹）。(1-6)式から相関関数を求めるためには、合計3回のFFTが必要であるから、少なくとも3秒の処理速度が必要となる。

§1-3-2 光学処理系による実現

パターンマッチングを光学系で実現する手法について概説する。一般に光学系は、光の干渉を利用するコヒーレント光学処理系と、光の干渉を利用しないインコヒーレント光学処理系とに大別される。しかし、本論文では処理の対象となる物体光が空間的にコヒーレントである場合と、空間的にインコヒーレントである場合とに分け、前者をコヒーレント光学系、後者をインコヒーレント光学系と呼ぶことにする。すなわち、コヒーレント光学系では、処理の対象となる物体光の占める領域がコヒーレンス領域内にあり、インコヒーレント光学系では、物体光の占める領域の方がコヒーレンス領域よりも充分に広いということである。

a コヒーレント光学系

光源がコヒーレントである場合、フーリエ変換を求めるためにレンズによるフーリエ変換作用を用いる。ただし、レンズによって得られたフーリエ変換は、写真フィルムなどに記録することはできない。なぜなら、露光されたフィルムの振幅透過率はフィルムのH-D曲線の傾きを γ とすると、入射強度の γ 乗に比例するからである。そのため、フーリエ変換の記録には、ホログラフィー技術が用いられる。コヒーレント光学系のホログラフィーを利用したパターンマッチングは、マッチトフィルタリングと呼ばれる。マッチトフィルタリングの典型的な手順を以下に記す。

- (1) 参照物体のフーリエ変換ホログラムを作成する。
- (2) Figure 1-1で示された光学系のHologram面にフーリエ変換ホログラムを作成したときと同じ条件を満足するようにホログラムを設置する。
- (3) テスト物体をコヒーレントな平行光で照明する。
- (4) レンズを用いてフーリエ変換し、両者の相関関数の2乗を得る。

(3)と(4)のステップは、きわめて高速（光速）に行なうことができるのが特長である。ただし、ホログラムの作成は時間のかかる処理である。もちろん計算機ホログラム（Computer Generated Hologram, 以下CGHと略す）が用いられることもある。既知のパターンが固定されている場合は、(1)と(2)のステップは一度だけで、以後は不要であり、高速処理ができる。しかし、コヒーレント光特有のスペックルノイズなどの問題が残されている。なかでも、きわめて厳密な位置合わせが必要な点や、物体が透過物体でなければならない点など厳しい拘束条件がある。

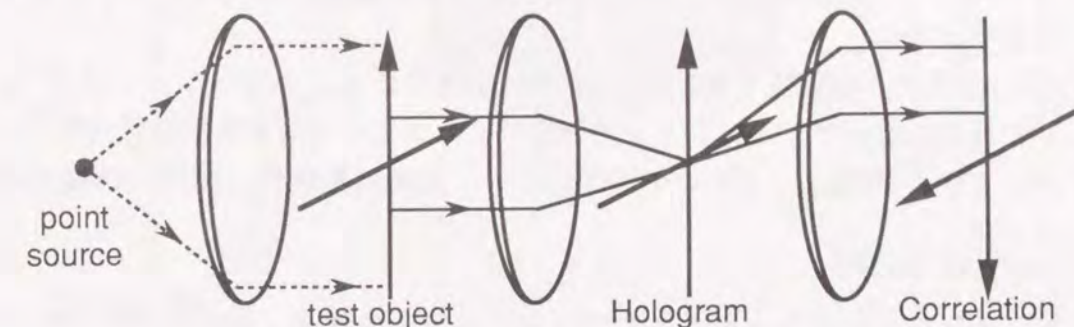


Fig. 1-1. マッチトフィルタリングの光学系

b インコヒーレント光学系

処理の対象となる物体光が空間的にインコヒーレントである場合には、普通の陰極線管（Cathode Ray Tube, 以下CRTと略す）が表示用の素子として利用することができる。しかし、インコヒーレント光学系で、物体のフーリエ変換を求めるために工夫が必要である。

一つの例は、空間光変調素子（Spatial Light Modulator, 以下SLMと略す）を用いて、インコヒーレント・コヒーレント変換を行なう手法である。これは、インコヒーレント物体の強度分布をコヒーレントな振幅分布に変換し、前項で述べたマッチトフィルタリングの手法を使う方法である。ただ、この場合は、空間光変調素子の応答速度や空間分解能に全システムの精度が左右されてしまう。現在、入手可能、あるいは、開発中のSLMの応答速度、空間分解能などについてはFisherの文献¹⁹に詳しい。これらの高速化、高分解能化が達成されたとしても、結局、実際の処理にはコヒーレント光源を用いるため、コヒーレントノイズなどの問題点は依然として残る。

もう一つの例は、§1-4で詳述するシアリング干渉計を用いる手法である。しかしこの手法では、処理の一部をディジタル処理に頼った、ハイブリッドな系が必要である。純光学的手法としては、A. S. Marathayが、干渉計を用いた像の再生や、光学情報処理（相関演算、コンボリューション演算）への応用について報告をしている³²。

§1-3-3 ハイブリッド処理系による実現

前項まではディジタル処理、あるいは、光学処理のいずれか一方のみを利用して、パ

ターンマッチングを行なう手法について述べた。ここでは、デジタル処理の柔軟性、光学処理の超高速性などの両者の長所を組み合わせたハイブリッド処理の特徴について述べる。ハイブリッド処理の組み合わせは4種類（インコヒーレント／コヒーレント光学系、電氣的デジタル／アナログ）があるが、本論文ではインコヒーレント光学系とデジタル処理系とを組み合わせた方法を対象とする。この組み合わせをとり上げたのは、次の理由による²³。

- 1) インコヒーレント光学系には、コヒーレント光学系にみられるようなスペックル雑音がない。
- 2) 扱う信号が、非負値であることだけに注意すれば、コヒーレント光学系を用いた場合に実行できるほとんどの処理がインコヒーレント光学系で実現できる。
- 3) デジタル処理は、アナログ処理に比べ、処理の柔軟性、精度、再現性に優れている。

すなわち、インコヒーレント光学系とデジタル電子処理系とを組み合わせたハイブリッドシステムは、高速で扱いやすく柔軟性に富んだ画像認識システムと成り得る可能性を持っているといえる。

§ 1-4 シアリング干渉計

インコヒーレント光源のフーリエ変換を得るために必要な、回転シアリング干渉計、ラディアルシアリング干渉計の原理について説明し、干渉計に入力される物体光源がスペクトル分布を持つときの干渉計の出力信号の振る舞いについて考察する。

§ 1-4-1 回転シアリング干渉計

回転シアリング干渉計³³⁻³⁸は、プリズムの回転や移動によってシア量や光路差の調節を容易に行なうことができるという特徴を有する。Fig. 1-2に干渉計の構成を示す。Michelson干渉計の平面鏡の代わりに直角プリズムを用い、二つの直角プリズムは、それぞれ、光軸を中心として、僅かの角度 ($\theta/2$) だけ回転している。物体から出た光が、ビームスプリッタ (BS) で二つに分けられたあと、一方の光が、プリズム P_1 で $-\theta$ 、他方の光が、プリズム P_2 で θ 、回転させられる。二つの光は最終的に検出面上で重なり、干渉する。 P_1 は、光路差の調節が可能となるように光軸方向への微動が可能である。

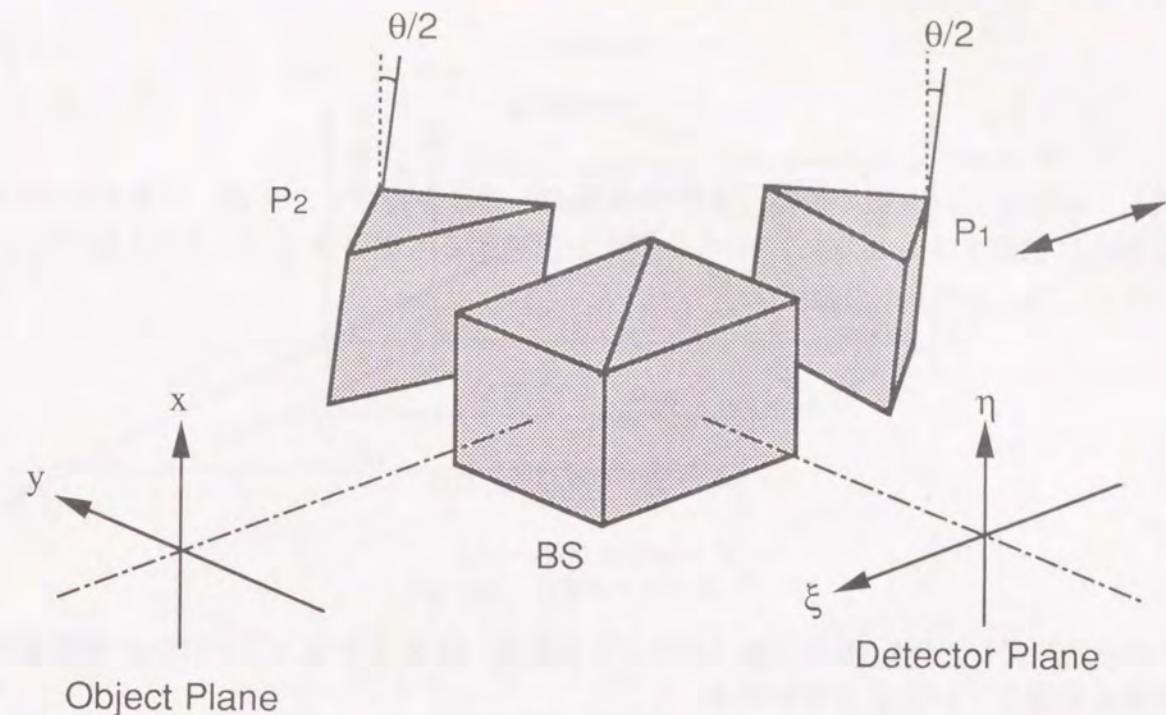


Fig. 1-2. 回転シアリング干渉計

インコヒーレント物体の干渉を考える場合には、物体上の各点のそれぞれの干渉を考える必要がある。そこで、まず、Youngの干渉実験における単色点光源の波面分割による二つの光波の干渉を考える。その後、回転シアリング干渉計の二つの光路長について述べる。Fig. 1-3に示す、点光源 S から射出した光波がスリット S_1, S_2 を射出しスリット S_1, S_2 から回折した波面が、観測面で干渉する場合を考える。ただし、光波が伝搬する媒体の屈折率は1とする。 S_1 と観測面の点 D との光路長を l_1 、 S_2 と D との光路長を l_2 とする。このとき、 S_1, S_2 から観測面上の D に到達した光波の複素振幅分布 v_1, v_2 は、それぞれ、

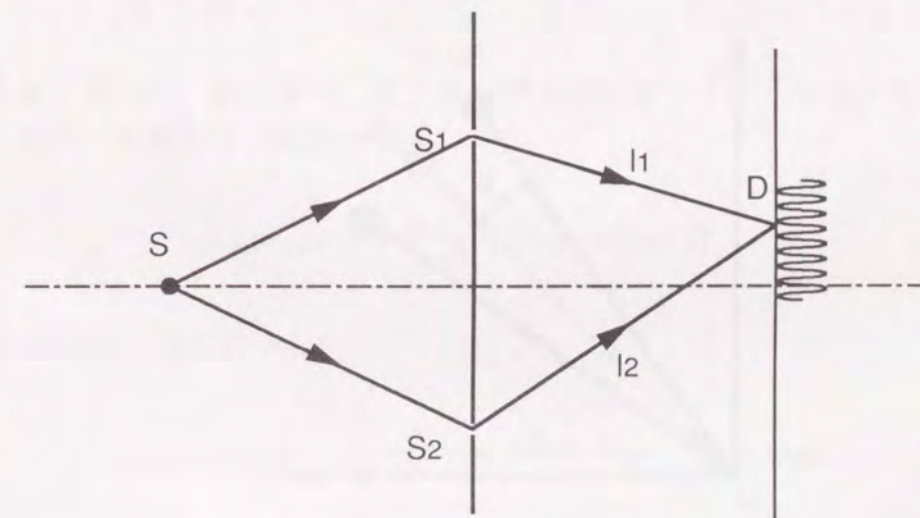


Fig. 1-3. 二つの光波の干渉

$$v_1 = \frac{1}{2}a \exp(jkl_1), \quad (1-7a)$$

$$v_2 = \frac{1}{2}a \exp(jkl_2). \quad (1-7b)$$

ただし, a は S における波の振幅 (実際には光の一部しか到達しないが, 干渉計における振る舞いに適用できるように, すべての光が到達するものとする), k は波数である. このとき, D における光の強度 I は,

$$\begin{aligned} I &= |v_1 + v_2|^2 \\ &= \frac{1}{2}a^2 + \frac{1}{2}a^2 \cos [k(l_2 - l_1)] \\ &= \frac{1}{2}P + \frac{1}{2}P \cos [k(l_2 - l_1)] \end{aligned} \quad (1-8)$$

とかける. ただし, P は, S の強度 (パワー) である. (1-8)式から, 二つの波の光路差が, 干渉縞に影響していることがわかる.

次に, 回転シアリング干渉計による光波の干渉を調べる. 物体 $P(x, y)$ 上のある1点 S は, 観測面から見ると, Fig. 1-4のように S_1 , S_2 の二つの点に分かれてみえる. そこで, S_1 , S_2 から観測面までの光路長を調べるために, Fig. 1-5のような座標系を考える. S_1 , S_2 の座標 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) は, S の座標を (x, y) で表わせば, それぞれ,

$$\begin{aligned} x_1 &= x \cos \theta + y \sin \theta \\ y_1 &= -x \sin \theta + y \cos \theta, \end{aligned} \quad (1-9a)$$

$$\begin{aligned} x_2 &= x \cos \theta - y \sin \theta \\ y_2 &= x \sin \theta + y \cos \theta. \end{aligned} \quad (1-9b)$$

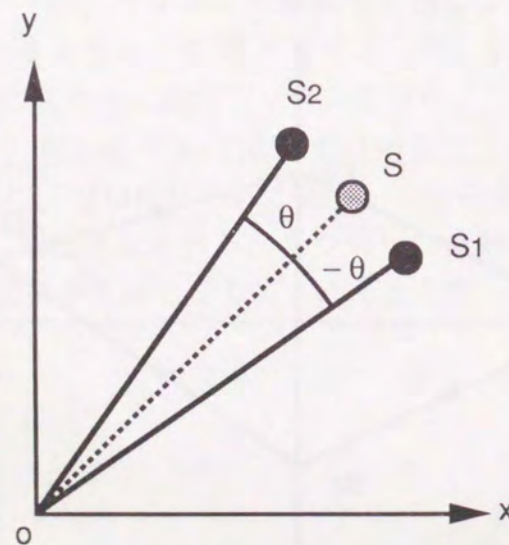


Fig. 1-4. 回転シアを受けた点光源

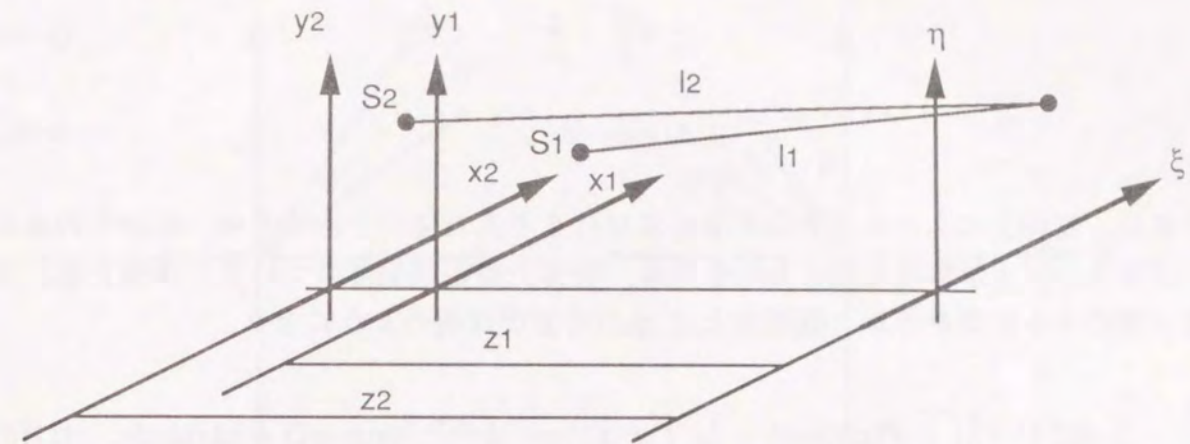


Fig. 1-5. 座標系のとり方

S_1 と観測面 (ξ, η) との距離を l_1 , S_2 と観測面との距離を l_2 とすれば, S_1 , S_2 と観測面上の点 (ξ, η) との光路長 l_1 , l_2 は, それぞれ,

$$l_1 = \sqrt{z_1^2 + (x_1 - \xi)^2 + (y_1 - \eta)^2}, \quad (1-10a)$$

$$l_2 = \sqrt{z_2^2 + (x_2 - \xi)^2 + (y_2 - \eta)^2}. \quad (1-10b)$$

両式の大括弧の中の第1項が, 他の2項と比べて十分大きいとき, 光路差 $l_2 - l_1$ は,

$$\begin{aligned} l_2 - l_1 &= z_2 - z_1 \\ &\quad - \frac{z_2 - z_1}{2z_1z_2} [x^2 + y^2 + \xi^2 + \eta^2 - 2x\xi \cos \theta - 2y\eta \cos \theta] \\ &\quad + \frac{z_2 + z_1}{2z_1z_2} [2(x\eta - y\xi) \sin \theta] \end{aligned} \quad (1-11)$$

と近似できる. さらに, 第2項は, 第1項や第3項に比べて充分小さいため無視することができ, 結局, 光路差は, 次式で与えられる.

$$l_2 - l_1 = z_2 - z_1 + \frac{z_2 + z_1}{2z_1z_2} [2(x\eta - y\xi) \sin \theta]. \quad (1-12)$$

(1-12)式を(1-7)式の右辺に代入し,

$$I(\xi, \eta) = \frac{1}{2}P(x, y) + \frac{1}{2}P(x, y) \cos [k \frac{2 \sin \theta}{z_0} (x\eta - y\xi) + k\Delta z] \quad (1-13)$$

を得る. ただし,

$$\frac{2}{z_0} = \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}, \quad (1-14)$$

$$\Delta z = z_2 - z_1. \quad (1-15)$$

これは、物体上のある1点上の光源要素だけを考えた場合であるため、拡がりのあるインコヒーレント物体を想定するときには、物体上の領域全体について干渉縞を微小領域毎に積分する必要がある。観測面上 (ξ, η) 点の強度は次のようになる。

$$I(\xi, \eta) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) dx dy + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) \cos [k \frac{2 \sin \theta}{z_0} (x\eta - y\xi) + k\Delta z] dx dy. \quad (1-16)$$

第1項で表される物体光の光量に比例したバイアス量に、第2項で表されるインコヒーレント物体の余弦変換 $(\Delta z = 0$ のとき)が加わった形の干渉縞が得られることがわかる。これは、インコヒーレントホログラムと呼ばれる³⁴。ただし、座標が90度回転していることに注意する必要がある。 Δz を変化させれば、余弦変換ばかりでなく正弦変換 $(\Delta z = -\lambda/4$ のとき、 λ は波長)やハートレー変換³⁹ $(\Delta z = -\lambda/8$ のとき)も得られる。余弦変換と正弦変換は、それぞれ、フーリエ変換の実部と虚部に相当するため、物体のフーリエ変換が干渉計によって得られることになる。さらに、 θ や距離 z_1 や z_2 、 z_0 を変化させれば、倍率も変化させることができる。

次に、回転シアリング型干渉計で物体の余弦変換が得られることを、点光源による干渉縞の図を用いて示す。このような直感的な理解は、回転シアリング干渉計の本質を捕える上で重要である。Fig. 1-6 (a)は、回転の中心から遠い点が回転シアを受けた様子を、Fig. 1-6 (b)は、回転の中心から近い点の場合を示す。回転の中心から遠い点ほど遠く離れることがわかる。Fig. 1-6 (a)からはFig. 1-6 (c)のような干渉縞が、Fig. 1-6 (b)からはFig. 1-6 (d)のような干渉縞ができる。Figs. 1-6 (c)と(d)をフーリエ変換し像を再生すると、Figs. 1-6 (e)と(f)を得る。遠い点は遠くに、近い点は近くに再生することがわかる。座標が90度回転していることもわかる。

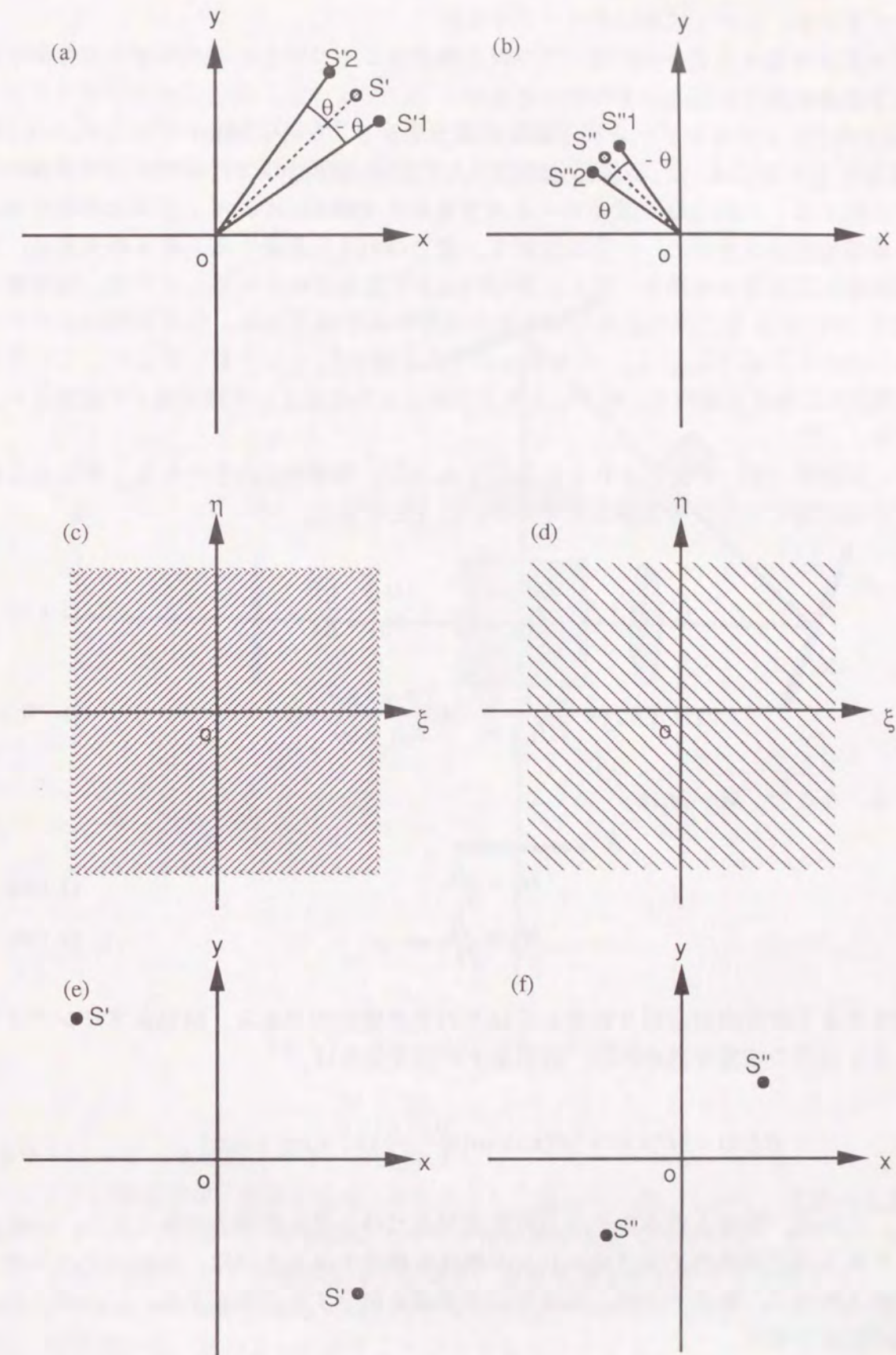


Fig. 1-6. 回転シアリング干渉計による余弦変換：(a) 光軸に遠い一点 s' ；(b) 光軸に近い一点 s'' ；(c) s' から形成された干渉縞；(d) s'' から形成された干渉縞；(e) s' の再生像；(f) s'' の再生像

§1-4-2 ラディアルシアリング干渉計

ラディアルシアリング干渉計は、二つの光路がほとんど同じところを通ることから安定した干渉縞が得られるという特徴を有する。

Fig. 1-7にラディアルシアリング干渉計の構成を示す^{40,41}。入力像からの光は、45度傾いた偏光子 (P) に入射し、直線偏光成分のみが共通光路型のラディアルシアリング干渉計に入射する。入射光は、偏光ビームスプリッタ (PBS) により、互いに直交する2つの直線偏光成分に分かれ、一方は反射し、他方はPBSを透過する。各々の光束は、互いに逆向きに三角形の光路を一巡し、再びPBS上で重ね合わされる。この後、45度傾いた検光子 (A) により二つの光束の可干渉な成分のみが選ばれる。焦点距離のわずかに異なる二つのレンズ (L₁, L₂, それぞれの焦点距離をf₁, f₂とする) により、二つの光束は伝播方向に垂直な面内で、僅かに大きさの異なる光の場として検出面上に投影され、干渉する。

いま、位相子 (R) で決定される光路差をΔzとし、物体P(x,y)上のある1点(x,y)と観測面上の点(ξ,η)との二つの光路長をそれぞれl₁, l₂とすると、

$$l_1 = f_1 + f_2 + \frac{(M_1x - \xi)^2}{2(f_1 + f_2)} + \frac{(M_1y - \eta)^2}{2(f_1 + f_2)}, \quad (1-17a)$$

$$l_2 = f_1 + f_2 + \frac{(M_2x - \xi)^2}{2(f_1 + f_2)} + \frac{(M_2y - \eta)^2}{2(f_1 + f_2)} + \Delta z, \quad (1-17b)$$

と書ける。ここで、M₁, M₂は、

$$M_1 = \frac{-f_2}{f_1}, \quad (1-18a)$$

$$M_2 = \frac{-f_1}{f_2}, \quad (1-18b)$$

と定義される干渉計内の右回りの光と左回りの光の像倍率である。回転シアリング干渉計のときと同様の議論を進めれば、観測面上の強度分布は、

$$I(\xi, \eta) = \frac{1}{2}P(x, y) + \frac{1}{2}P(x, y)\cos\left[k\left(\frac{f_2 - f_1}{f_1 f_2}\right)(x\xi + y\eta) + k\Delta z\right] \quad (1-19)$$

となる。これは、物体上のある一点上の光源要素だけを考えた場合であるから、一般に拡がりのある自己発光のインコヒーレント物体を想定するときには、回転シアリング干渉計の時と同様に、物体上の微小領域毎に干渉縞を積分する必要がある。したがって、干渉縞の強度分布は、

$$I(\xi, \eta) = \frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} P(x, y)dx dy + \frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} P(x, y)\cos\left[k\left(\frac{f_2 - f_1}{f_1 f_2}\right)(x\xi + y\eta) + k\Delta z\right]dx dy. \quad (1-20)$$

第1項で表される物体の全パワーに比例したバイアス量と、第2項で表されるインコヒーレント物体の余弦変換 (Δz = 0のとき) が加わった形の干渉縞、すなわち、インコヒーレントホログラムが得られる。Δzを変化させれば、回転シアリング干渉計と同様に種々の変換が得られることもわかる。ただし、シア量の調整には、レンズの焦点距離を変化させなければならないため、調整が困難であるという欠点もある。

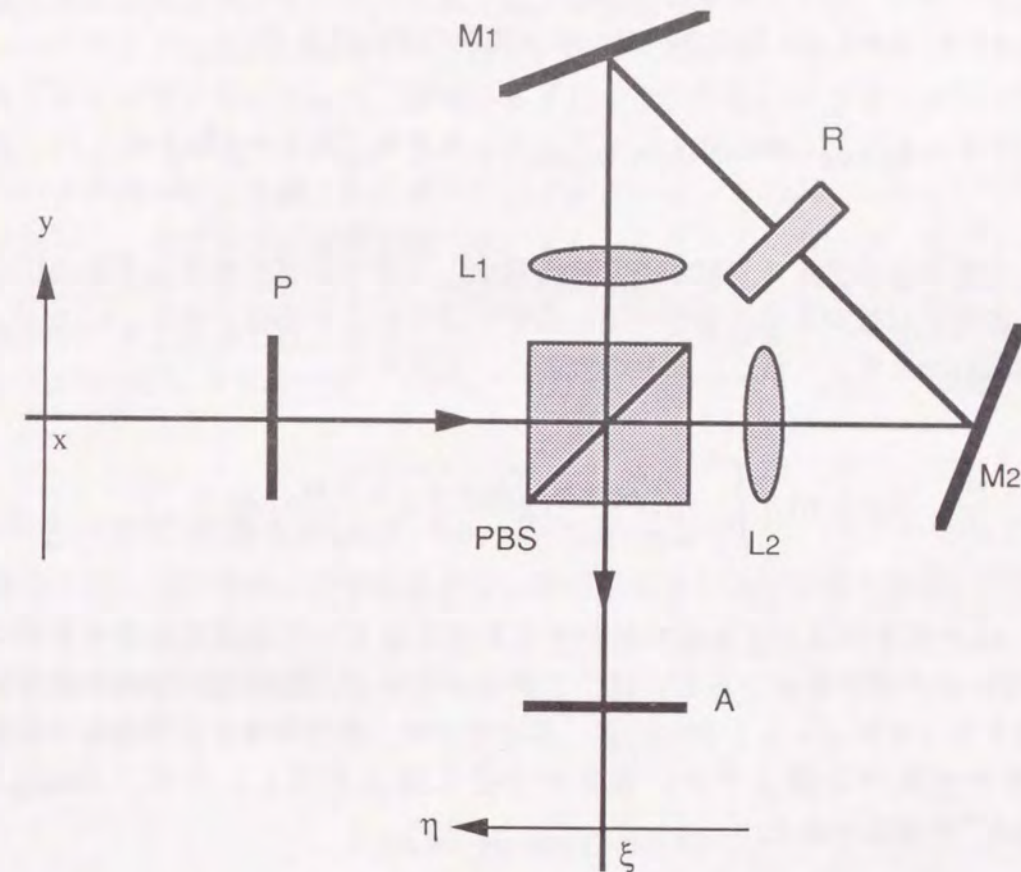


Fig. 1-7. ラディアルシアリング干渉計

§1-4-3 光源のスペクトル分布

これまでの議論では、光源を完全な単色光として扱っていた。しかし、実際の光源は、輝線スペクトルではなく、ある程度スペクトルの拡がりをもっている。そこで、光源のスペクトルの拡がり干渉縞に及ぼす影響を、余弦変換を例に挙げて考察する。

回転シアリング干渉計、あるいは、ラディアルシアリング干渉計によって得られる干渉縞の交流成分は、次のように表すことができるものとする。

$$I_A(\xi, \eta) = \frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} P(x, y)\cos[kM(x\xi + y\eta) + k\Delta z]dx dy. \quad (1-21)$$

ここで、 M は倍率を決定するシア量から決まるパラメータである。すなわち、回転シアリング干渉計では、シア角、ラディアルシアリング干渉計では、レンズの焦点距離から決定されるパラメータである。光源の中心波長を λ_0 、半値半幅を $\Delta\lambda$ とする。波長が λ_0 のとき、 $P(x,y)$ の余弦変換 $I_A(\xi, \eta)$ は、次式で表わすことができる。

$$I_A(\xi, \eta) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x,y) \cos \left[\frac{2\pi M(x\xi + y\eta)}{\lambda_0} \right] dx dy. \quad (1-22)$$

波長が $\lambda_0 + \alpha$ ($-\Delta\lambda \leq \alpha \leq \Delta\lambda$) のとき、フーリエ変換の相似性より

$$\frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x,y) \cos \left[\frac{2\pi M(x\xi + y\eta)}{\lambda_0 + \alpha} \right] dx dy = \frac{\lambda_0 + \alpha}{\lambda_0} I_A \left(\frac{\lambda_0 + \alpha}{\lambda_0} \xi, \frac{\lambda_0 + \alpha}{\lambda_0} \eta \right). \quad (1-23)$$

とかける。光源のスペクトルに広がりがある場合、シアリング干渉計の光軸を中心として干渉縞が放射状に広がることわかる。実際に得られる干渉縞の強度 $I_A'(\xi, \eta)$ は、各波長の分光強度 $S(\alpha)$ を乗じて積分したものである。すなわち、

$$I_A'(\xi, \eta) = \int_{-\Delta\lambda}^{\Delta\lambda} S(\alpha) \frac{\lambda_0 + \alpha}{\lambda_0} I_A \left(\frac{\lambda_0 + \alpha}{\lambda_0} \xi, \frac{\lambda_0 + \alpha}{\lambda_0} \eta \right) d\alpha. \quad (1-24)$$

すなわち、 $\Delta\lambda$ が大きいほど干渉縞の広がりも大きくなる。干渉縞の広がりを小さくするには、 $\Delta\lambda$ を小さくするか、あるいは、アクロマチック（色消し）な光学系を用いて波長依存性をなくせばよいことがわかる。本研究では、前者の方法を採用し、狭帯域干渉フィルタを光路中に挿入する。後者の方法を採用した例としては、Georgeら⁴²やBreckinridgeら³⁰の方法がある。

§ 1-5 結言

本章では、相関関数を用いたパターン認識について述べた。§ 1-2では相関ピークの大きさから参照物体とテスト物体が同じかどうか、また同じ場合には、それが何処にあるかを相関ピークの位置から同定できることを述べた。§ 1-3では、フーリエ変換を用いて相関関数を求める方法につき、デジタル処理系、コヒーレント光学系、インコヒーレント光学系を用いた方法の順に述べた。§ 1-4ではインコヒーレント光学系を用いてフーリエ変換を求めるのに不可欠なシアリング干渉計について詳説した。さらに、処理の対象とするインコヒーレントな物体が、スペクトル分布を持つときの干渉計の振る舞いについて考察し、その対策として、スペクトルの帯域を狭くするか、波長依存性をなくすかが必要であることを示した。

第2章 光学的余弦変換を用いたハイブリッドパターンマッチング

§ 2-1 緒言

前章では、インコヒーレント光学系を用いて物体のフーリエ変換を求めることができることを示した。しかし、余弦変換と正弦変換を別々に取り込み、処理を行なったのでは高速処理は望めない。そこで、本章では、余弦変換を用いた新しい光／電子複合型パターンマッチングの方法を提案する。まず、余弦変換を用いたパターンマッチングのアルゴリズムを提案する。さらに、提案する手法を遂行するハイブリッドシステムを新たに考案した。§ 2-3でこのハイブリッドシステムを詳述する。§ 2-4では、余弦変換をそのまま用いずに2値化を行なってバイナリーインコヒーレントホログラムにすることを提案し、その処理の特徴を述べる。また、§ 2-5において、光／デジタル電子複合型画像認識システムによる、性能評価の実験、パターンマッチングを行ない、有用性を示す。§ 2-6では、提案したハイブリッド画像認識システムの処理速度を、純デジタル処理による処理速度と比較し、飛躍的に処理速度が向上していることを示す。

§ 2-2 余弦変換を用いたパターンマッチング^{33,34}

本節では、二つの物体の余弦変換どうしの積をさらに余弦変換すれば、両物体の相関関数が得られることを示す。

関数 $f(x)$ 、 $g(x)$ の余弦変換 $F_C(v)$ 、 $G_C(v)$ は、それらのフーリエ変換 $F(v)$ 、 $G(v)$ を用いて次のように表わすことができる。

$$F_C(v) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cos(2\pi vx) dx, \quad (2-1a)$$

$$G_C(v) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \cos(2\pi vx) dx, \quad (2-1b)$$

$$F_C(v) = \frac{1}{2} F(v) + \frac{1}{2} F^*(v), \quad (2-2a)$$

$$G_C(v) = \frac{1}{2} G(v) + \frac{1}{2} G^*(v), \quad (2-2b)$$

ここで、 $*$ は複素共役を表している。(2-2a)式と(2-2b)式の積は、

$$F_C(v)G_C(v) = \frac{1}{4} F(v)G^*(v) + \frac{1}{4} F(v)G(v) + \frac{1}{4} F^*(v)G(v) + \frac{1}{4} F^*(v)G^*(v) \quad (2-3)$$

となる。さらに、これを余弦変換すれば、

$$CT[F_C(v)G_C(v)] = \frac{1}{4} f(x) \star g(x) + \frac{1}{4} f(x) * g(x) + \frac{1}{4} f(-x) \star g(-x) + \frac{1}{4} f(-x) * g(-x). \quad (2-4)$$

ここで、 $\text{CT}[\cdot]$ は余弦変換、 $*$ はコンボリューション演算を表わす。二つの物体の余弦変換どうしの積を再び余弦変換しても、それらの相関関数（第1項）が得られることがわかる。しかし、余弦変換項以外に、コンボリューション（第2項）、座標の符号が反転したもののどうしの相関関数（第3項）、コンボリューション（第4項）も得られる。ただし、これらは、物体を適切に配置すればそれぞれが空間的に重なり合うことはない。

次に、いま述べた事実を別の見方で説明する。この考え方は、前述の不要な項が空間的に重なり合わないよう配置するときに重要となる。任意の関数の余弦変換は、その関数の偶関数部のフーリエ変換に等しいことはよく知られている。すなわち、ある関数 $f(x)$ の偶関数部を $f_e(x)$ 、奇関数部を $f_o(x)$ とすれば、

$$f(x) = f_e(x) + f_o(x), \quad (2-5)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cos(2\pi vx) dx = \int_{-\infty}^{\infty} f_e(x) \exp(-j2\pi vx) dx, \quad (2-6a)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \sin(2\pi vx) dx = -j \int_{-\infty}^{\infty} f_o(x) \exp(-j2\pi vx) dx. \quad (2-6b)$$

関数 $f(x)$ の余弦変換と関数 $g(x)$ の余弦変換との積を余弦変換するということは、 $f(x)$ と $g(x)$ の相関関数を求めているのではなく、 $f_e(x)$ と $g_e(x)$ との相関関数を求めていることに相当するのである。Fig. 2-1にその様子を示す。Figs. 2-1 (a)と(b)に元の関数、Figs. 2-1 (c)と(d)にそれらの偶関数部、Fig. 2-1 (e)に、Figs. 2-1 (a)と(b)の相関関数、Fig. 2-1 (f)にFigs. 2-1 (c)と(d)の相関関数を示す。(2-4)式と同様に二つの物体の相関関数以外に、コンボリューション、座標の符号が反転したもののどうしの相関関数、コンボリューションが得られることがわかる（座標の符号が反転したのものについては、図中では括弧を付けて記した）。

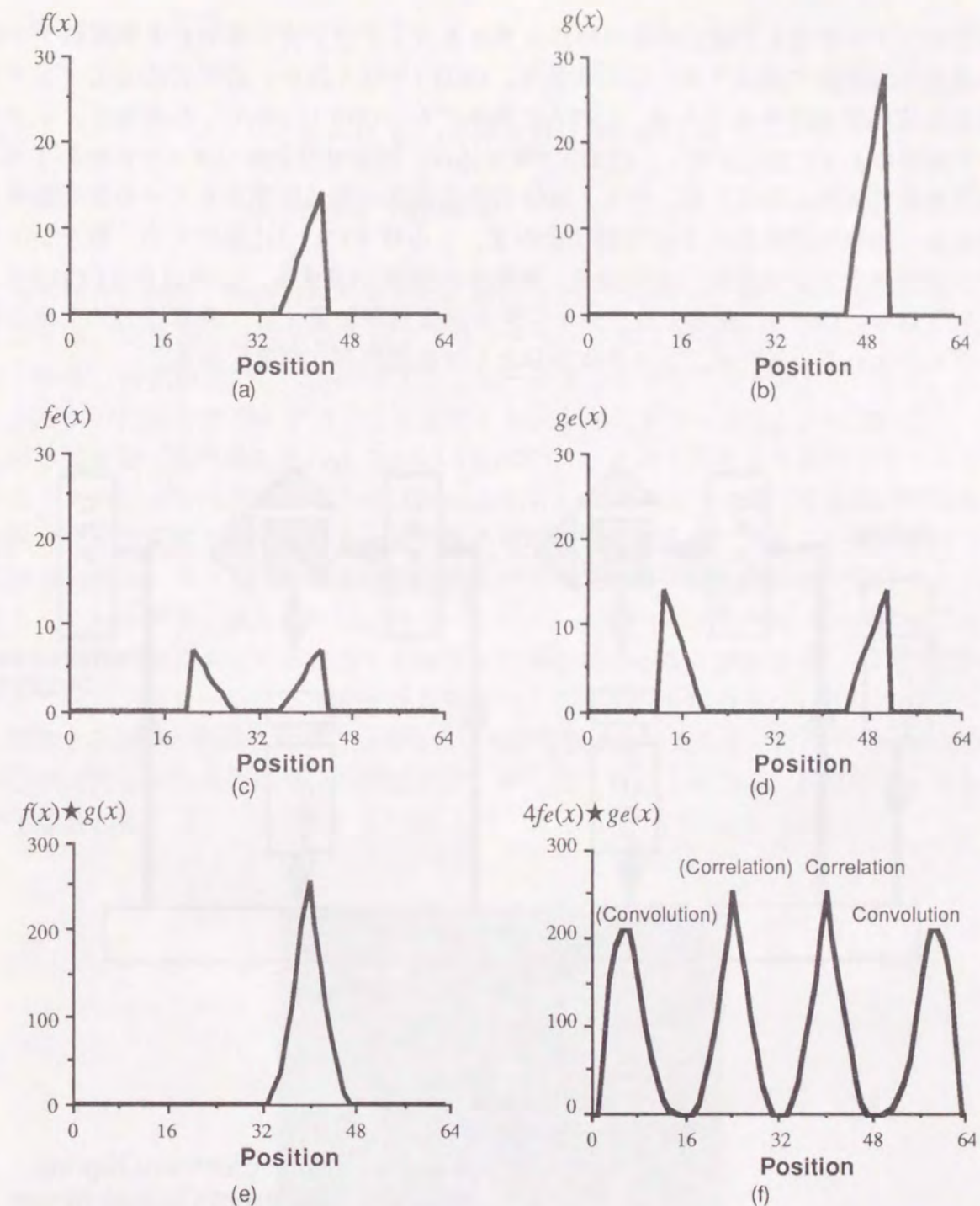


Fig. 2-1. 余弦変換を用いたパターンマッチング：(a)参照物体；(b)テスト物体；(c)参照物体の偶関数部；(d)テスト物体の偶関数部；(e)相関関数；(f)偶関数部から求めた相関関数

§ 2-3 ハイブリッドパターンマッチングシステム

本節では、§ 1-4で述べた干渉計を用い、§ 2-2で示したアルゴリズムを実行するハイブリッドパターンマッチングシステムを提案する^{33,35,40}。提案するハイブリッドシステムの概要をFig. 2-2に示す。三つのCRT、三つのCCDカメラ、二つのシアリング干渉

計（回転シアリング干渉計，あるいは，ラディアルシアリング干渉計）と実時間デジタル画像処理装置で構成する。参照物体を，CCD 1で取り込み，必要に応じてノイズ除去などの実時間処理を施した後，CRT 1に表示する。CRT 1に表示した画像を，シアリング干渉計によって余弦変換し，CCD 2で取り込み，画像処理装置のメモリに格納する。テスト物体も同様に処理する。テスト物体の余弦変換と先に用意されている参照物体の余弦変換と画像処理装置によって掛け合わせ，その積をCRT 2に表示する。積をシアリング干渉計で余弦変換する。その結果，両物体の相関が求まる。この結果をCCD 3によって取り込み，CRT 3に表示する。デジタル画像処理装置では，乗算などの簡単な処理のみを行なっているため，システム全体として高速処理が可能である。

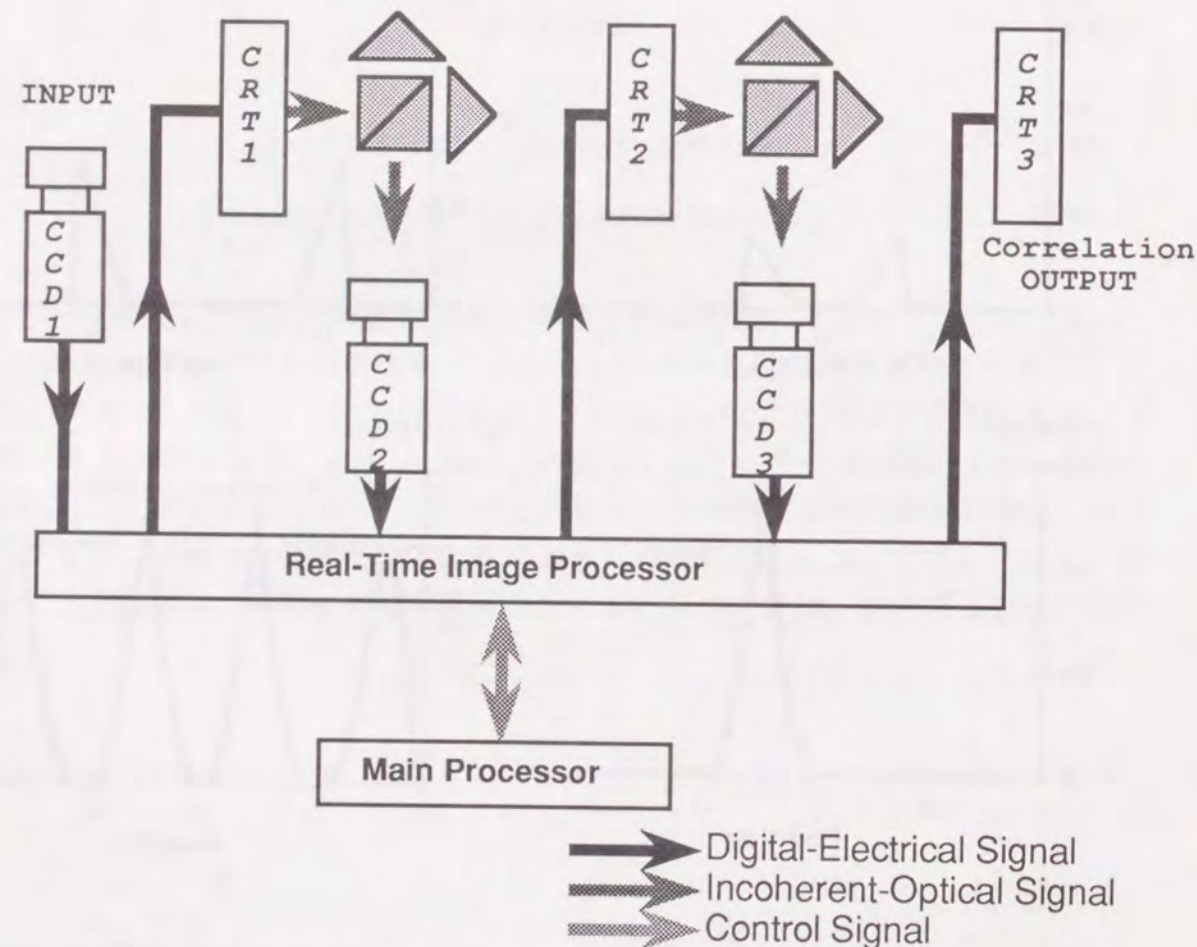


Fig. 2-2. 提案するハイブリッドシステム

§ 2-4 バイナリーインコヒーレントホログラム³⁴

ハイブリッドシステムにおいて相関関数のSN比を向上させ，処理の速度を高めさせるためにインコヒーレントホログラムを2値化し，バイナリーインコヒーレントホログラムとすることを提案する。すなわち，真の余弦変換ではなくそれを2値化したものを

用いてパターンマッチングを行なう。次式にしたがい2値化処理を行なう。

$$I_B(\xi, \eta) = 1 \quad \text{If } I(\xi, \eta) > \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) dx dy, \\ I_B(\xi, \eta) = 0 \quad \text{otherwise.} \quad (2-7)$$

この2値化の効果，特徴の相関関数の尖鋭化などについては，第4章で詳しく述べる。ここでは，定性的な性質を計算機シミュレーションにより示すにとどめる。Fig. 2-3に示す物体（画素数は256×256）のインコヒーレントホログラムをFig. 2-4 (a)に，(2-7)式にしたがい作成したバイナリーインコヒーレントホログラムをFig. 2-4 (b)に示す。それらの余弦変換（再生像）をFigs. 2-5 (a)と(b)に示す。なお，再生像を表示するときのダイナミックレンジを向上させるため，Figs. 2-4 (a)と(b)のバイアスは，計算機内であらかじめ除いて余弦変換を求めている。正立像と同時に倒立像も再生されているのがわかる。これは，§ 2-2で示したように余弦変換は元の関数の偶関数部のみが寄与することによる。これらの再生像を見れば，バイナリーインコヒーレントホログラムにすることにより，元の画像のエッジに相当する部分を強調していることがわかる。二つの物体のバイナリーインコヒーレントホログラムを用いて相関関数を求めるということは，エッジに相当する部分が強調された二つの物体の相関関数を求めることに対応する。すなわち，自己相関関数は両者の外形（高周波成分）が一致したときにのみ，非常に鋭くなることが予想される。

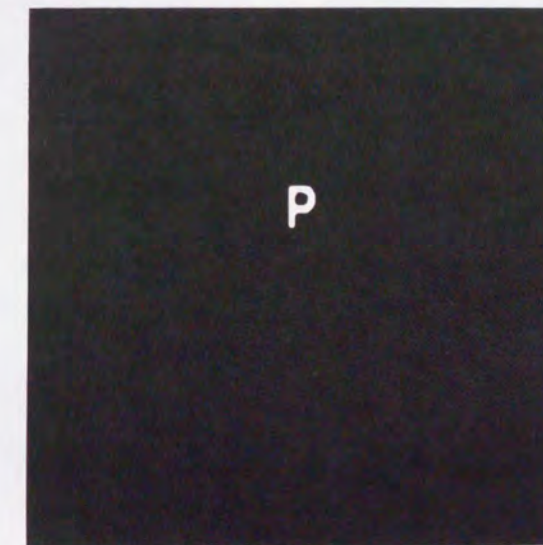


Fig. 2-3. バイナリーインコヒーレントホログラムの特徴を調べるために用いた物体

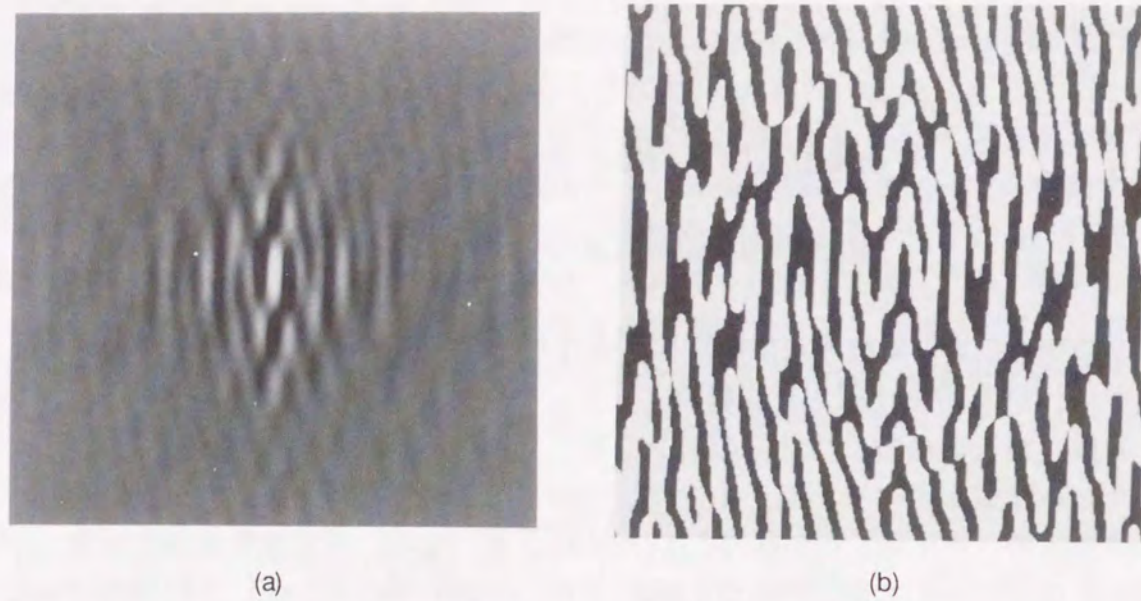


Fig. 2-4. (a) インコヒーレントホログラムと(b)バイナリーインコヒーレントホログラム
(計算機シミュレーションの結果)

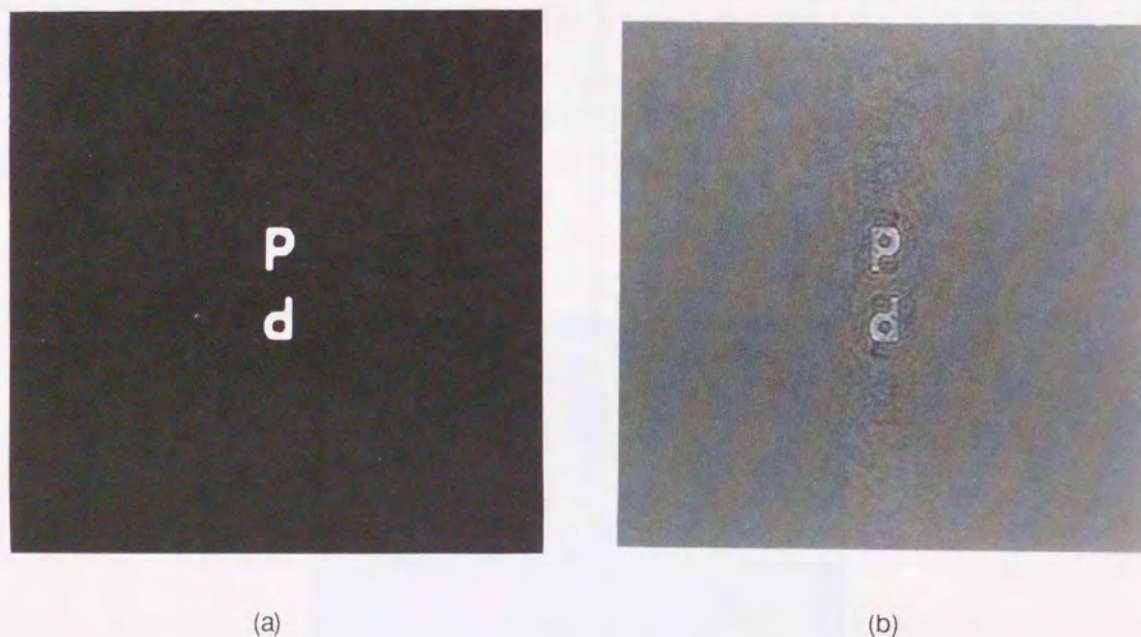


Fig. 2-5. (a) インコヒーレントホログラムからの再生像と(b)バイナリーインコヒーレントホログラムからの再生像 (計算機シミュレーションの結果)

前節で述べた余弦変換によるパターンマッチングのアルゴリズム, および, バイナリーインコヒーレントホログラムの効果を検証するために計算機シミュレーションを行なった. Figs. 2-6 (a)と(b)に示す画像をそれぞれ参照物体, テスト物体とした. 画素数は 256×256 である. 余弦変換を用いてパターンマッチングを行なった結果をFigs. 2-7 (a)と(b)に示す. Fig. 2-7 (a)は, 物体のインコヒーレントホログラムをそのまま用いたもの,

Fig. 2-7 (b)は, バイナリーインコヒーレントホログラムを用いたものである. 前者では四つの白斑の塊が見受けられる. それぞれ, (2-4)式やFig. 2-1 (f)に示されていた相関関数以外にコンボリューションや座標の符号が入れ替わったものどうしの相関関数やコンボリューションに相当する. しかし, 後者ではコンボリューションはもちろん, 相互相関関数も消えており, 単語「dream」の位置にのみ輝点が認められる. これらから, バイナリーインコヒーレントホログラムを用いてパターンマッチングを行なうことの有用性の確証が得られた.

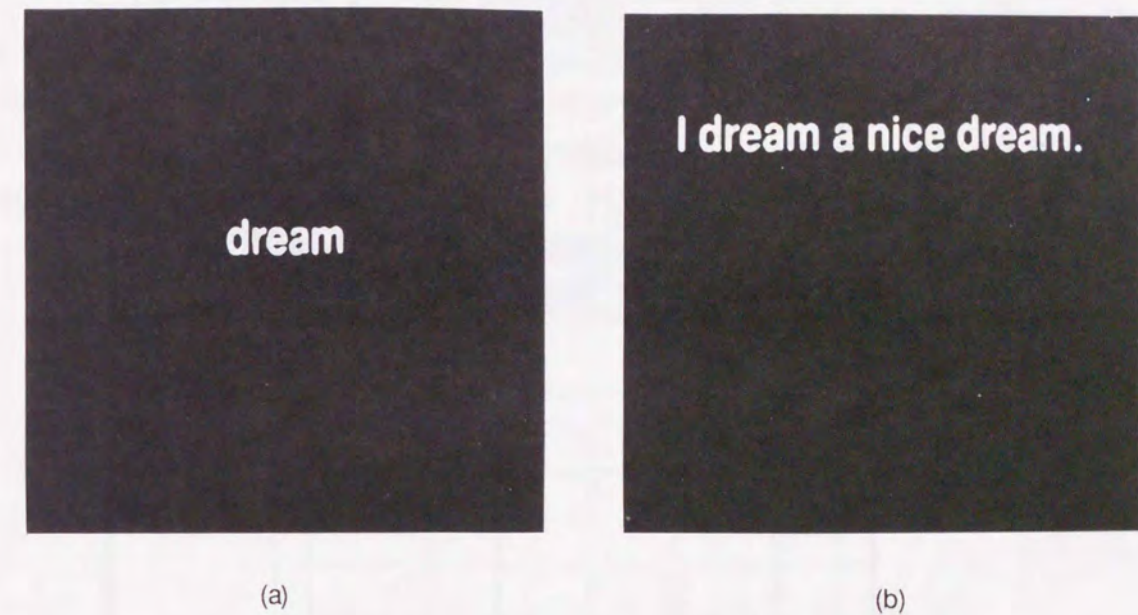


Fig. 2-6. 余弦変換を用いたパターンマッチングの計算機シミュレーションに用いた
(a)参照物体と(b)テスト物体

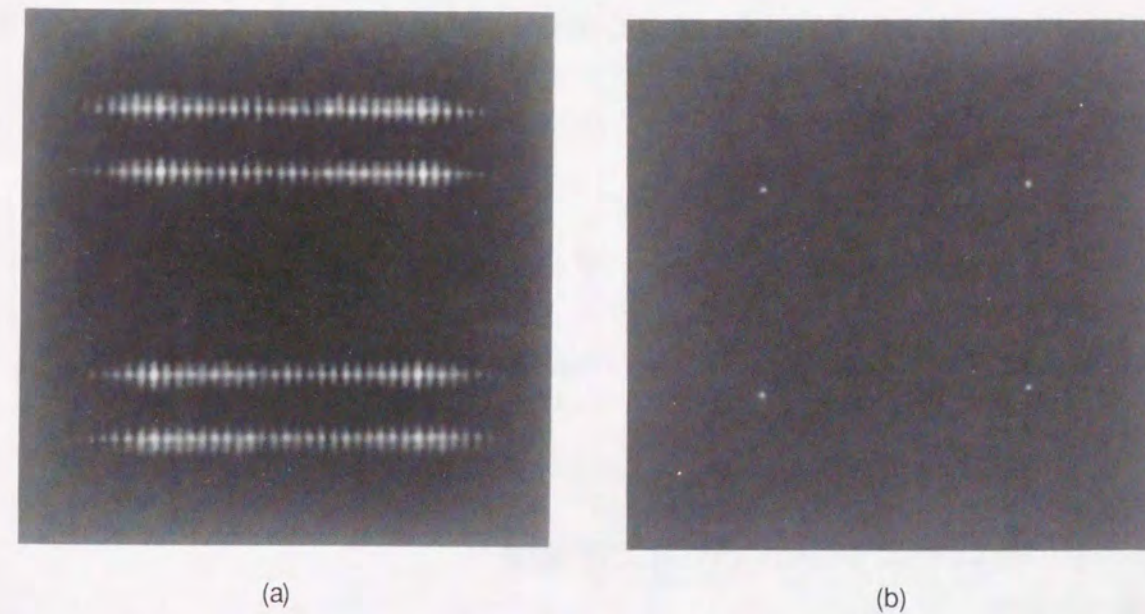


Fig. 2-7. (a) インコヒーレントホログラムを用いた相関関数と(b)バイナリーインコヒーレントホログラムを用いた相関関数 (計算機シミュレーションの結果)

バイナリーインコヒーレントホログラムを用いれば、システムの処理速度は向上する。なぜなら、相関関数を求める際に必要な処理が、一度の論理演算により行なえるからである。このことを以下で説明する。まず、インコヒーレントホログラムをそのまま用いる場合、§1-4で示したように、シアリング干渉計で得られるホログラムにはバイアスがかかっているために、積を求める前にバイアスを減じなければならない。また、インコヒーレント光学系では負の値を表示することができないため、求めた積を表示する前にバイアスを加えなければならない。バイナリーインコヒーレントホログラムを用いた場合、0は負の値、1は正の値を表しているとする、バイナリーインコヒーレントホログラムの積を求めるということは、0どうし、あるいは、1どうしならば正の値、すなわち、1とし、そうでなければ負の値、すなわち、0とすることに等しい。この処理は、2値論理演算のEquivalentに等しい。Equivalentの真理値表をTable 2-1に示す。この表から、Equivalent演算を行えば、バイアスの除去、乗算、バイアスの付加といった一連の処理を行なった後、2値化することと等価な処理を行なったことになる。

Table 2-1. Equivalentの真理値表

入力1	入力2	出力
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

この演算は、デジタル処理に適しており実時間（ビデオレート）での実行が可能であるため、システム全体としての高速処理が可能である。

その他にも、バイナリーインコヒーレントホログラムを用いると、次のような点で有利となる。

- 1) 参照物体のバイナリーインコヒーレントホログラムのほうが、インコヒーレントホログラムよりも占有するメモリの量が少ない。
- 2) バイナリーインコヒーレントホログラムどうしの積を表示する場合に要求されるCRTのダイナミックレンジは2レベルの輝度が表示できればよい程度である。

§2-5 実験システムの試作および実験

本節では試作した実験系を説明し、光学的余弦変換の実験結果を示す。さらに光源のスペクトル分布の余弦変換に与える影響を実験的に調べ、シア量の相関値に与える影響を計算機シミュレーションで評価する。最後に光学的余弦変換を用いたハイブリッドパターンマッチングの実験の結果を示す。

§2-5-1 実験システムの試作

a システムの構成

Fig. 2-8に本研究で試作し、用いた実験システムのブロック図を示す。§1-4で二種類の干渉計を提案したが、実際に試作したシステムには回転シアリング型干渉計を採用した。Fig. 2-9に試作システムの光学系部分の写真を示す。

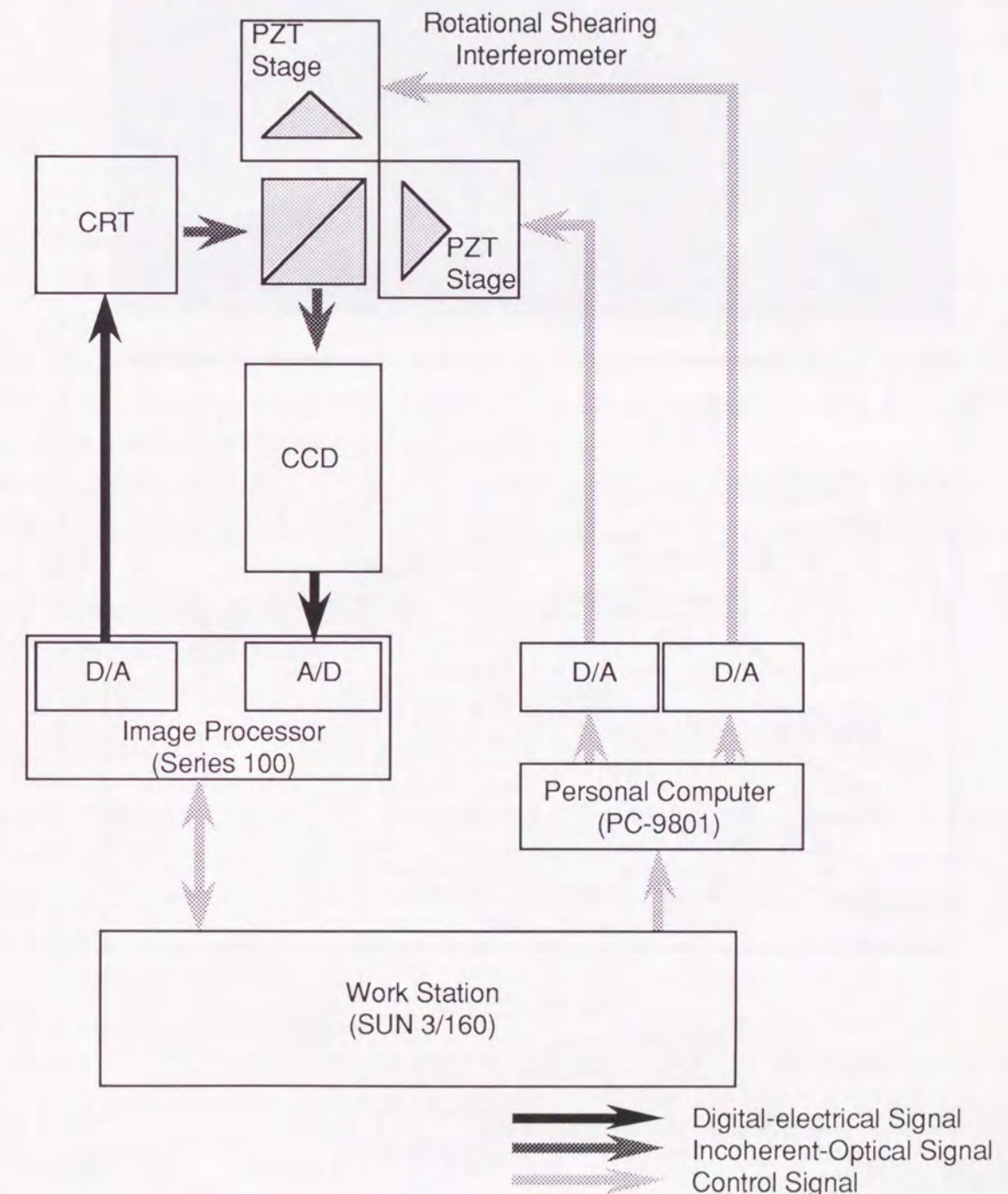


Fig. 2-8. 実験システム

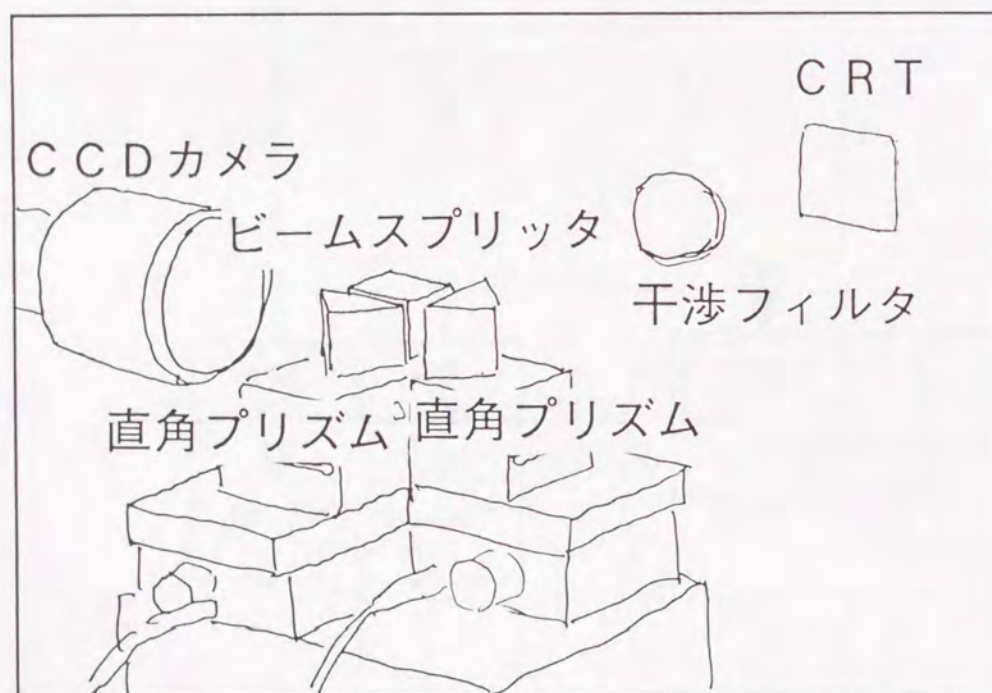


Fig. 2-9. 光学系

CRTには、松下電器産業株式会社製の高輝度テレビを用いた。インコヒーレント光学処理に適した発光スペクトル幅の狭い、青色準単色（中心波長450nm、半値半幅30nm）、小型、高輝度、高分解能なCRTである。CCDカメラには、日本電気株式会社製のTI-22Aを、結像レンズには、COSMICAR製の50mm F/1.4を用いた。干渉計によって得られるインコヒーレントホログラムが倍率1で感面に結像するように光学系を調整した。ステ

ージに載せられた干渉計のプリズムは、ピエゾ素子により微調整が可能である。ピエゾ素子には、Photon Control 社製の μ -FLEX50Pを用いた。ピエゾ素子のドライバには、株式会社I・Oデータ機器製のD/Aコンバータ、PIO-9035を装着した日本電気株式会社製のパーソナルコンピュータ、PC9801を用いた。実時間画像処理装置には、IMAGING Technology 社の100（呼称Series100）を用いた。Series100は、VMEバスを介してホストコンピュータ、SUN microsystems 社のSUN3/160に接続されている。PC-9801はRS232Cケーブルを介して、SUN3/160に接続されている。取りあつかった画像は、512×480点（あるいは256×240点）の256階調（あるいは2値）のものである。SUN3/160の専用CRTやSUN3/110（専用高速通信回線、EtherNetによってSUN3/160と接続されている）の専用CRTは、256階調で画像の表示が可能である。本論文の画像の写真はすべて、これら2台の専用CRTに表示した画像をカメラで写真フィルムに撮影したものである。

b 制御系

ピエゾ素子の制御に用いたD/A変換器は0から+10Vの電圧を12ビットの分解能で出力することができる。ピエゾ素子の駆動にはDC 150Vの電圧が必要であるため、このままでは使用できないので、D/A変換器の出力を増幅するための回路を作成した。この回路を用いることにより、D/A変換器の1LSB当たり3.25nmの微動が可能である。1波長（450nm）の光路差の移動量は60ステップに相当する。

試作システムの制御にはすべて、ソフトウェア的にSUN3/160で作成したプログラムを用いて行なった。使用した言語はCである。作成したプログラムでは以下の処理が可能である。

- 1) SUN3/160のメモリからの画像データをCRTに表示する。
- 2) 光路差を微調整する。
- 3) 干渉計で得られる出力を取り込む。（積算可能）
- 4) 取り込んだ画像を画像データとして、SUN3/160のメモリに格納する。

干渉計で得られたインコヒーレントホログラムを2値化してバイナリーインコヒーレントホログラムとすることや、インコヒーレントホログラム、あるいは、バイナリーインコヒーレントホログラムどうしの積を求めるときは、新たに作成した画像演算プログラムを使用した。

§ 2-5-2 光学的余弦変換

回転シアリング干渉計により余弦変換が行なわれているかどうかを確認するために、得られた干渉縞からFFTプログラム（Sande-Turkyのアルゴリズムによるもの）を用いて離散フーリエ変換を求める。元の画像の偶関数部が再生されれば、回転シアリング干渉計により余弦変換が正しく行なわれていることになる。実験に用いた入力画像をFig. 2-10に示す。この入力画像は、計算機によって作製したものである。そのインコヒーレントホログラムをFig. 2-11に、Fig. 2-11の離散フーリエ変換をFig. 2-12に示す。実際には、§ 1-4で示したように座標が90度回転しているが、見やすくするため、表示時に

正立となるようにした。また、再生像のダイナミックレンジを大きくするため、バイアスを除去した後、離散フーリエ変換を求めた。入力は偶関数ではないが、2度の余弦変換（1度目は光学的、2度目はデジタル）によって偶関数部が表示されており、余弦変換が正しく行なわれていることがわかる。



Fig. 2-10. 入力画像

Fig. 2-11. 入力画像のインコヒーレント
ホログラム

Fig. 2-12. 計算機による再生像（干渉フィルタを使用しない場合）

§ 2-5-3 光源のスペクトル分布

Fig. 2-12の「OSAKA」の端の文字「O」と「A」の形が放射状に歪んでおり、それらの強度も小さくなっている。これは、§ 1-3-3で述べた光源のスペクトルの拡がりによる影響である。狭帯域の干渉フィルタを用いれば、この光源のスペクトルの拡がりの影響を抑えることができる。干渉フィルタを用いた同様の実験結果を以下に示す。用いた干渉フィルタは、日本真空光学株式会社製の中心波長が451nm、半値半幅が4.5nmのものである。入力画像はFig. 2-10と同じものである。得られた干渉縞をFFTプログラムを用いて離散フーリエ変換を求めた結果をFig. 2-13に示す。スペクトルの拡がり小さくなり再生像の歪みも小さくなったことがわかる。



Fig. 2-13. 計算機による再生像（干渉フィルタを使用した場合）

§ 2-5-4 シア量

(1-21)式に示したように、シアリング干渉計のシア量を調節することによって、インコヒーレントホログラム $I(\xi, \eta)$ のスケールを調節することができる⁴³。シア量を大きくしすぎると、インコヒーレントホログラムの情報を含まない領域まで検出されることになる。その結果、ノイズ成分を主に検出し、相関信号のSN比の低下を引き起こす。逆にシア量を小さくすれば、インコヒーレントホログラムの一部分の情報しか検出されないことになる。

そこで、シア量と相関ピークの間関係を計算機シミュレーションによって調べた。入力画像をFFTプログラムを用いて離散フーリエ変換し、その実部を2値化しバイナリーインコヒーレントホログラムとした。バイナリーインコヒーレントホログラムの高周波成分を徐々に落としていき（このことはシア量を徐々に小さくしていくことに相当する）、低周波成分のみを用いて相関を求め、シア量と相関値の間関係を調べた。

テスト物体としては、文字「a」を+1度から+9度まで2度毎回転させたものを用いた。

回転していない文字「a」を参照物体として、相関関数とシア量の関係調べた。参照物体とテスト物体をFigs. 2-14に示す。シア量の低下に伴いテスト物体と参照物体との相関値の差が小さくなることが予想される。なお、+1度の画像は、離散画像の関係上、参照物体の画像と何ら変わらない。これらの画像は64×64画素より構成されている。それぞれの入力像を256×256画素の中心に設置して相関を求めた。計算機シミュレーションの結果をFig. 2-15に示す。横軸は相対的なシア量、縦軸は最大値を100として規格化した相関値である。予想されたとおり、シア量の低下に伴い各画像間の相関値の差が小さくなっていくことがわかる。+3度から+9度までの画像すべてに対して、相関値を75%以下に保ち、参照物体と区別するにはシア量を192以上にすることがわかる。シア量が64以下の場合には、すべての相関値が75%以上になり、すべての画像を検出する場合に用いることができる。

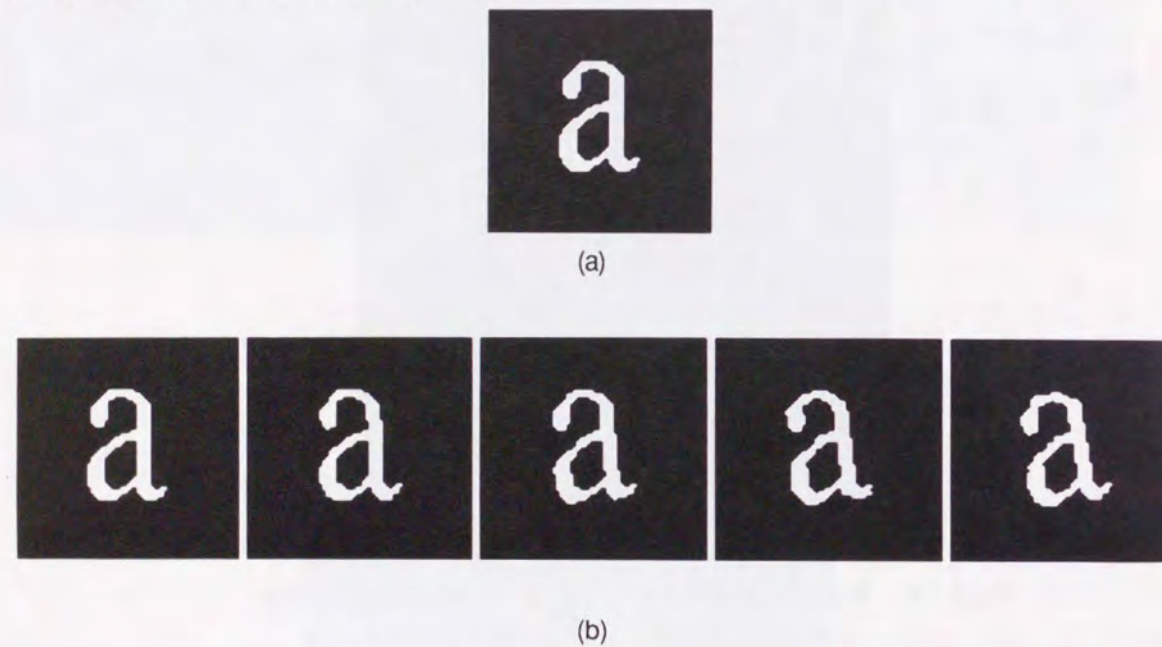


Fig. 2-14. シア量と相関値の関係を調べるために用いた(a)参照物体と(b)テスト物体

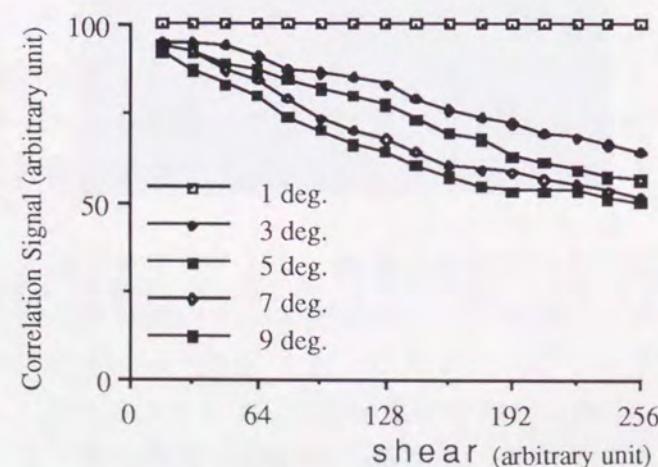


Fig. 2-15. シア量と相関値の関係 (計算機シミュレーションの結果)

§ 2-5-5 パターンマッチング³⁴

余弦変換を用いたパターンマッチングの実験をハイブリッドシステムにおいて行なった。参照物体とテスト物体 (512×480画素) をFigs. 2-16 (a)と(b)に示す。参照物体のインコヒーレントホログラムとバイナリーインコヒーレントホログラムをFigs. 2-17 (a)と(b)に示す。これらの図から本来一様であるべきバイアス項が一定でないことに気づく。これは、(1-16)式で示した ξ , η について独立であるバイアス項 (第1項) が、 ξ , η の関数となっているからと考えられる。そこで、この問題を避けるため次のような工夫をした。(1-16)式で $\Delta z=0$ とおいた強度 ($I_+(\xi, \eta)$ と表記する) と、 $\Delta z=\pi$ とおいた強度 ($I_-(\xi, \eta)$ と表記する) との差をとり、インコヒーレントホログラムの交流成分 ($I_A(\xi, \eta)$ と表記する) を求め、その符号によって2値化を行なった。すなわち、

$$I_+(\xi, \eta) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) dx dy + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) \cos [k \frac{2 \sin \theta}{z_0} (x\eta - y\xi)] dx dy, \quad (2-8a)$$

$$I_-(\xi, \eta) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) dx dy - \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) \cos [k \frac{2 \sin \theta}{z_0} (x\eta - y\xi)] dx dy, \quad (2-8b)$$

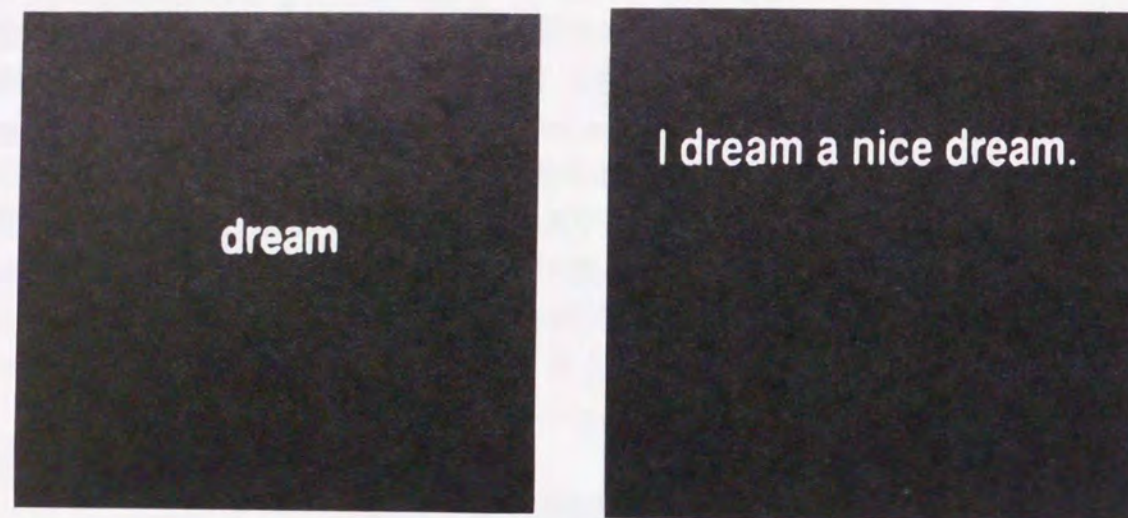
とおいたとき、

$$\begin{aligned} I_A(\xi, \eta) &= I_+(\xi, \eta) - I_-(\xi, \eta) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) \cos [k \frac{2 \sin \theta}{z_0} (x\eta - y\xi)] dx dy \end{aligned} \quad (2-9)$$

となって第1項は消滅する。すなわち、バイアス項である第1項が、 ξ , η の関数となっていたとしても、正しくインコヒーレントホログラムの交流成分を求めることができる。バイナリーインコヒーレントホログラムを求めるには次の式にしたがえばよい。

$$\begin{aligned} I_B(\xi, \eta) &= 1 \quad \text{If } I_A(\xi, \eta) > 0, \\ I_B(\xi, \eta) &= 0 \quad \text{otherwise.} \end{aligned} \quad (2-10)$$

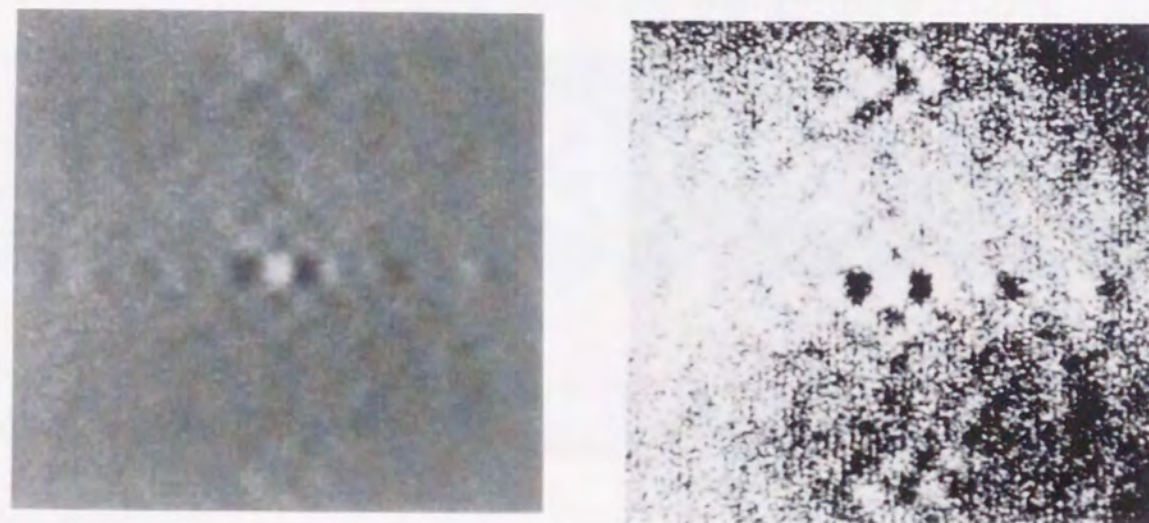
この手法を適応2値化法と呼ぶ。(2-9)式で示される交流成分をFig. 2-18 (a)に、適応2値化法を用いてインコヒーレントホログラムを2値化した結果をFig. 2-18 (b)に示す。バイアス項の不均一性が取り除かれている。



(a)

(b)

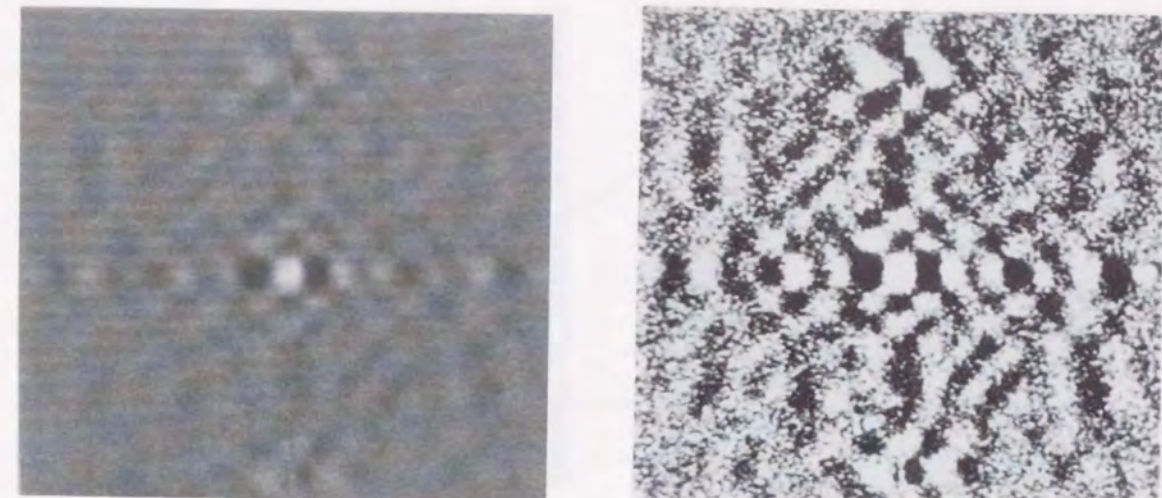
Fig. 2-16. パターンマッチングの実験に用いた(a)参照物体と(b)テスト物体



(a)

(b)

Fig. 2-17. 参照物体の(a)インコヒーレントホログラムと(b)バイナリーインコヒーレントホログラム
(ハイブリッドシステムによる実験結果；バイアスが不均一な場合)



(a)

(b)

Fig. 2-18. 参照物体の(a)インコヒーレントホログラムと(b)バイナリーインコヒーレントホログラム
(ハイブリッドシステムによる実験結果；不均一なバイアスを取り除いた場合)

テスト物体も同様に適応2値化処理をした後、それぞれのバイナリーインコヒーレントホログラムどうしの積を求めた結果をFig. 2-19に示す。それを余弦変換した結果、すなわちFigs. 2-16に示した物体の相関関数をFigs. 2-20に示す。単語"dream"の位置に明るい輝点が現われており、パターンマッチングが正しく行なわれていることがわかる。中心の輝点は参照物体、テスト物体、それぞれのバイナリーインコヒーレントホログラムの積をCRTに表示する際に加えたバイアスによるものである。またそれを中心とした回転対称な2点は、§2-2で示した余弦変換の性質による、もとの物体の座標の符号が反転したもののどうしの相関ピークである。

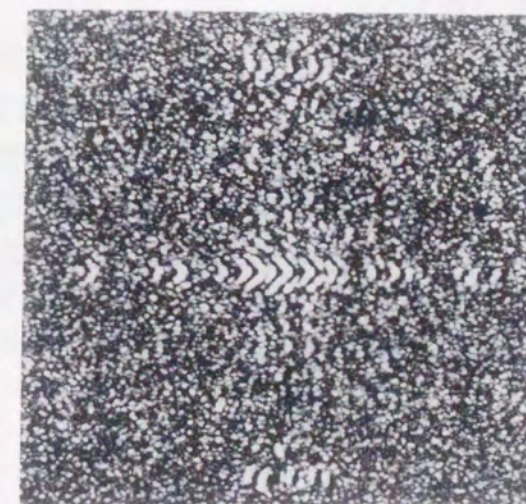


Fig. 2-19. バイナリーインコヒーレントホログラムの積
(ハイブリッドシステムによる実験結果)

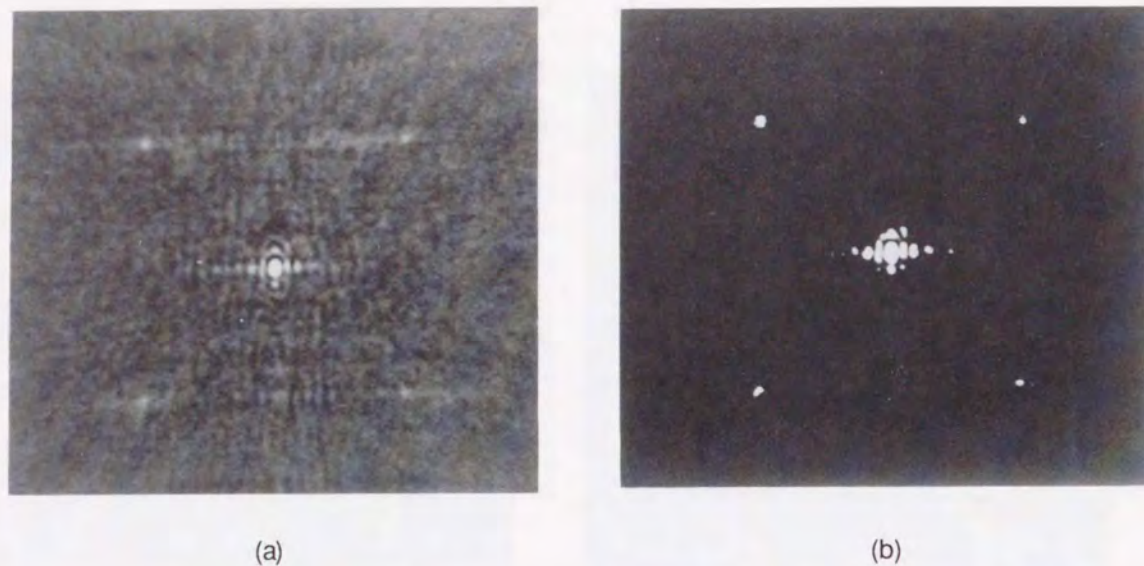


Fig. 2-20. 相関関数：(a)光学系からの出力と(b)それを2値化したもの
(ハイブリッドシステムによる実験結果)

§ 2-6 処理速度の評価

提案したハイブリッドシステムと純デジタル処理による相関演算の比較を行なった。なお、参照物体のバイナリーインコヒーレントホログラムは、既に求められているものとして比較を行なった。すなわち、フーリエ変換は2回必要である。提案したシステムの処理速度は次のようにして求めた。各ビデオフレーム毎に、

- 1) テスト物体のバイナリーインコヒーレントホログラムをCCDカメラで取り込む。
- 2) 参照物体のバイナリーインコヒーレントホログラムとの積を求める。
- 3) バイナリーインコヒーレントホログラムどうしの積をCRTに表示する。
- 4) 相関関数をCCDカメラで取り込む。

の処理を行なう必要があるため、4フレーム、すなわち、4/30秒の処理時間が必要である。ここでいう処理時間とは、テスト物体が入力されてから相関関数が出力されるまでの時間のことを指す。SPARC Station 1 (10MIPS, 実測値, FFT演算のみ), T9506 (画像処理用VLSI, カタログからの計算値, FFT演算のみ), 提案したハイブリッドシステム (計算値), それぞれの処理時間をFig. 2-21に示す。ハイブリッドシステムでは、定常状態になれば、1フレーム毎に相関関数が求められるため、より高速な処理を行なうことができ、図中でそのときの処理時間を破線で表わした。

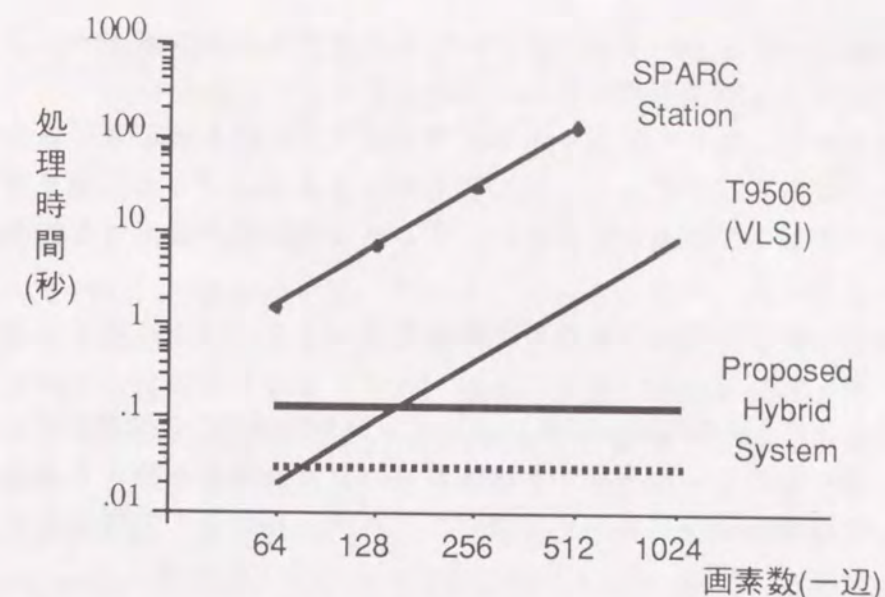


Fig. 2-21. 処理速度の比較

この図から、提案したハイブリッドシステムは純デジタル計算機よりも高速に相関演算を行なうことができることがわかる。例えば、512×512画素の場合、ハイブリッドシステムはSPARC station 1に対して950分の1 (3800分の1), T9506に対して14分の1 (57分の1)の処理時間 (括弧内は定常状態の場合)で相関関数を求めることができる。ハイブリッドシステムでは画素数に依存することなく一定の処理時間で相関演算を行なうことができるが、純デジタル計算機では、画素数の増加に伴い処理時間が増加する。すなわち、画素数が多くなればなるほど、提案したハイブリッドシステムが有利になるといえる。

§ 2-7 結言

本章では、光学的余弦変換を用いたパターンマッチングを提案した後、パターンマッチングを実行するハイブリッドシステムを提案した。ハイブリッドシステムはインコヒーレント光学系とデジタル画像処理装置から構成されており、実用性の高いものとなっている。シアリング干渉計によって得られるインコヒーレントホログラムを2値化し、バイナリーインコヒーレントホログラムとすることを提案した。バイナリーインコヒーレントホログラムを用いることによって以下のような特徴が生じる。

相関関数を求めるという観点から、

- 1) 自己相関ピークのみを強調する。

ハイブリッドシステムとしての観点から、

- 2) インコヒーレントホログラムを用いて相関関数を求めるのに必要なバイアスの除去・乗算・バイアスの付加といった一連の処理と等価な処理が、2値論理演算のEquivalentで行なうことができる。

- 3) 参照物体のバイナリーインコヒーレントホログラムの方が、インコヒーレントホログラムよりも画像処理装置内の占有するメモリが少ない。
- 4) バイナリーインコヒーレントホログラムどうしの積を表示する場合の方が、インコヒーレントホログラムどうしの積を表示する場合よりも、要求されるCRTのダイナミックレンジは遥かに小さい。2レベルの輝度が表示できればよいからである。

§2-5ではハイブリッドシステムを試作した後、まず、以下に述べる基礎的な事柄の実験を行なった。

- 1) 回転シアリング干渉計によってインコヒーレント物体の余弦変換が得られること。
- 2) 干渉計に用いるインコヒーレント物体がスペクトル分布を持つときの余弦変換への影響と狭帯域の干渉フィルタを用いてスペクトル分布の影響を小さくしたときの様子。

試作したハイブリッドシステムにおいてパターンマッチングの実験を行ない、本章で提案した、アルゴリズム、バイナリーインコヒーレントホログラムの有用性の確証を得た。

§2-6では、提案したハイブリッドシステムの処理速度を純デジタル処理による処理速度と比較し、512点×512点の画像に対して、15倍から950倍の処理速度の向上が図れることが明らかになった。

第3章 光学的ハートレー変換を用いた ハイブリッドパターンマッチング

§3-1 緒言

前章で述べた光学的余弦変換を用いたハイブリッドパターンマッチングには、次のような問題点が残されていた。すなわち相関信号以外に、座標の符号の反転した物体の相関信号なども同時に得られてしまうため、物体の配置に注意が必要であった。さらに、余弦変換フィルタを用いているため、180度回転した物体であっても認識してしまうといった問題があった。後者の問題は、コヒーレント光学系における2値位相フィルタ (Binary Phase-Only Filter, 以下BPOFと略す) を用いたマッチトフィルタリングにおいて false correlation peaks (偽出力) としてすでに指摘されている^{44,46}。これに倣い、本論文でも偽出力と呼ぶことにする。

コヒーレント光学系における偽出力の解決策はいくつか提案されている。Cottrellら⁴⁴は、ハートレー変換に基づくBPOFを用いれば、正弦変換や余弦変換に基づくものよりも、ある程度、偽出力を取り除くことができることを計算機シミュレーションで示した。Barnesら^{45,46}は、正弦変換に基づくBPOFと、余弦変換に基づくBPOFとをうまく組み合わせることで偽出力の除去が可能であることを計算機シミュレーションにより示した。Farnら⁴⁷は、偽出力が出ないようにBPOFを設計する手法を提案した。

本研究では偽出力などの不要な信号をすべて取り除くために、余弦変換以外にハートレー変換を用いたハイブリッドパターンマッチングを新たに提案する³⁵。なお、干渉計としては回転シアリング干渉計を想定して議論を進める。以下、理論を述べた後、計算機シミュレーション、ハイブリッドシステムにおける実験によってその有用性を示す。

§3-2 ハートレー変換を用いたパターンマッチング

第1章で述べたように、回転シアリング干渉計から得られる光の強度分布は次式で与えられる。

$$I(\xi, \eta) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) dx dy + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) \cos [k \frac{2 \sin \theta}{z_0} (x\eta - y\xi) + k\Delta z] dx dy, \quad (3-1)$$

ここで、 $P(x, y)$ は、インコヒーレント物体の強度分布、 θ は直角プリズムの回転角、 k は光の波数、 z_0 はインコヒーレント物体から観測面までの二つの光路長の調和平均、 Δz は二つの光路長の差である。この式において、位相差 $k\Delta z$ を変えることにより以下に示すような4種類の変換が得られる。

$$k\Delta z = -\frac{\pi}{2}; \text{ (正弦変換)}$$

$$I(\xi, \eta) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) dx dy + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) \sin[k \frac{2 \sin \theta}{z_0} (x\eta - y\xi)] dx dy,$$

$$k\Delta z = -\frac{\pi}{4}; \text{ (ハートレー変換)}$$

$$I(\xi, \eta) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) dx dy + \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) \left\{ \cos[k \frac{2 \sin \theta}{z_0} (x\eta - y\xi)] + \sin[k \frac{2 \sin \theta}{z_0} (x\eta - y\xi)] \right\} dx dy,$$

$$k\Delta z = 0; \text{ (余弦変換)}$$

$$I(\xi, \eta) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) dx dy + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) \cos[k \frac{2 \sin \theta}{z_0} (x\eta - y\xi)] dx dy,$$

$$k\Delta z = \frac{\pi}{4}; \text{ (回転ハートレー変換)}$$

$$I(\xi, \eta) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) dx dy + \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y) \left\{ \cos[k \frac{2 \sin \theta}{z_0} (x\eta - y\xi)] - \sin[k \frac{2 \sin \theta}{z_0} (x\eta - y\xi)] \right\} dx dy. \quad (3-2)$$

それぞれの変換は、物体の全強度に比例したバイアスを持っていることがわかる。上から順に、正弦変換、ハートレー変換、余弦変換、回転ハートレー変換と呼ぶ。回転ハートレー変換という名は、その変換が、ハートレー変換したものを180度回転させたものと等しいところから命名した。余弦変換には、元の関数の偶関数部のみが寄与し、正弦変換には奇関数部のみが寄与する。もちろん、これら4種類の変換は1次独立ではないが、これらをうまく組み合わせれば真の相関のみが得られる。ハートレー変換を用いれば余弦変換と正弦変換との和を、回転ハートレー変換を用いれば余弦変換と正弦変換との差を、それぞれ一度に得ることができる。これらを総合してインコヒーレントホログラムと呼ぶことにする。

偽出力を取り除くアルゴリズムを以下に説明する。簡単のために1次元で、かつ、(3-2)式のそれぞれ第1項のバイアス項を無視し議論を進める。参照物体 $f(x)$ の余弦変換を $F_C(v)$ 、正弦変換を $F_S(v)$ で表す。同様にテスト物体 $g(x)$ の余弦変換、正弦変換を $G_C(v)$ 、 $G_S(v)$ で表す。定義から、

$$CT[f(x)] = F_C(v), \quad (3-3a)$$

$$ST[f(x)] = F_S(v), \quad (3-3b)$$

$$HT[g(x)] = G_C(v) + G_S(v), \quad (3-3c)$$

$$RHT[g(x)] = G_C(v) - G_S(v), \quad (3-3d)$$

が得られる。ここで、 $CT[\cdot]$ 、 $ST[\cdot]$ 、 $HT[\cdot]$ 、 $RHT[\cdot]$ はそれぞれ、余弦変換、正弦変換、ハートレー変換、回転ハートレー変換を表す。(3-3a)式と(3-3c)式との積は、

$$\begin{aligned} F_C(v)[G_C(v) + G_S(v)] &= F_C(v)G_C(v) + F_C(v)G_S(v) \\ &= \frac{1}{4}[F(v)G(v) + F(v)G^*(v) + F^*(v)G(v) + F^*(v)G^*(v) \\ &\quad + jF(v)G(v) - jF(v)G^*(v) + jF^*(v)G(v) - jF^*(v)G^*(v)]. \end{aligned} \quad (3-4)$$

これをハートレー変換すれば、次の結果を得る。

$$\begin{aligned} HT[F_C(v)G_C(v) + F_C(v)G_S(v)] &= \frac{1}{4}[f(x)*g(x) + f(x)\star g(x) + f(-x)\star g(-x) + f(-x)*g(-x) \\ &\quad - f(x)*g(x) + f(x)\star g(x) - f(-x)\star g(-x) + f(-x)*g(-x)] \\ &= \frac{1}{2}[f(x)\star g(x) + f(-x)*g(-x)]. \end{aligned} \quad (3-5)$$

同様に(3-3b)式と(3-3d)式との積をハートレー変換すれば、

$$HT[F_S(v)G_C(v) - F_S(v)G_S(v)] = \frac{1}{2}[-f(x)\star g(x) + f(-x)*g(-x)], \quad (3-6)$$

を得る。(3-5)式と(3-6)式との差は、

$$HT[F_C(v)G_C(v) + F_C(v)G_S(v)] - HT[F_S(v)G_C(v) - F_S(v)G_S(v)] = f(x)\star g(x), \quad (3-7)$$

となり、参照物体 $f(x)$ とテスト物体 $g(x)$ との相関関数にほかならない。さらに、この差をとる処理によって、余弦変換を用いた場合には必ず存在した光軸上の不要なピークが取り除かれる。この点は、重要な点である。

ここまでの式の展開は、インコヒーレントホログラムを用いて行なってきた。しかし、実際の実験では、すべて、2値化しバイナリーインコヒーレントホログラムの状態にして処理を行う。すなわち、バイアスをしきい値として、0、または、1に2値化したバイナリーインコヒーレントホログラムを用いて相関関数を求める。バイアスは、入力信号に依存するが、入力物体の全パワーに比例しているため、予め、しきい値を知ることができる。この2値化のプロセスは、第1章で示したように次のような特徴を持つ。

- (1) 自己相関ピークのみを強調する。
- (2) バイアス除去、乗算、バイアス付加に相当する一連の処理が、Equivalent演算を実行することでできる。
- (3) 占有するメモリ領域が少なくすむ。
- (4) バイナリーインコヒーレントホログラムの積を表示するCRTのダイナミックレ

ンジが小さくてすむ。

以上述べたアルゴリズムをブロックダイアグラムの形にまとめたのがFig. 3-1である。図中のBCT, BST, BHT, BRHTはそれぞれ、余弦変換、正弦変換、ハートレー変換、回転ハートレー変換のバイナリーインコヒーレントホログラムを表している。参照物体の2種類のバイナリーインコヒーレントホログラム（BCTとBST）は予め用意されているため、中央の2本の線の処理のみでパターンマッチングが行なうことができる。もし、中央の実線で囲まれた2本の線上の四つの回転シアリング干渉計と二つのデジタル画像処理装置が用意できれば、高速処理が可能である。

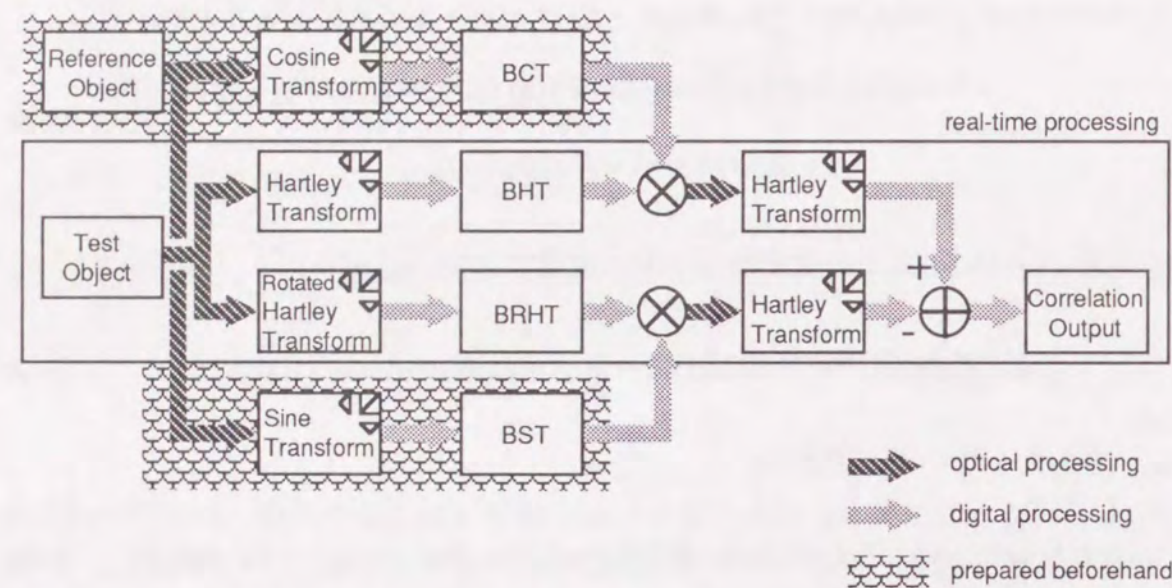


Fig. 3-1. ハートレー変換を用いたハイブリッドパターンマッチングのブロックダイアグラム

§ 3-3 実験結果

前節で述べたアルゴリズムの検証を行なうため、計算機によるシミュレーションとハイブリッドシステムによる実験を行なった。

§ 3-3-1 計算機シミュレーション

参照物体とテスト物体に、それぞれ、Figs.3-2 (a)と(b)に示す文字「p」と単語「paradox」を用いた。画素数は256×256である。Fig. 3-3 (a)に余弦変換を用いたパターンマッチングの結果を、(b)にハートレー変換を用いたパターンマッチングの結果を示す。余弦変換を用いた場合には、「p」の位置以外にも「d」の位置にも輝点が現われている。これは、参照物体「p」の180度回転した「d」も同じ物体として誤って認識した偽出力の例である。さらに、画面の中央を中心とした回転対称な位置にも輝点が現われている。

これは、余弦変換の性質によるものである。ところが、ハートレー変換を用いた場合には unnecessary 輝点はすべて消え去り、ただ一つ「p」の位置に輝点ピークが現われている。以上の結果は本章で提案したハートレー変換を用いるパターンマッチングの有用性を示している。

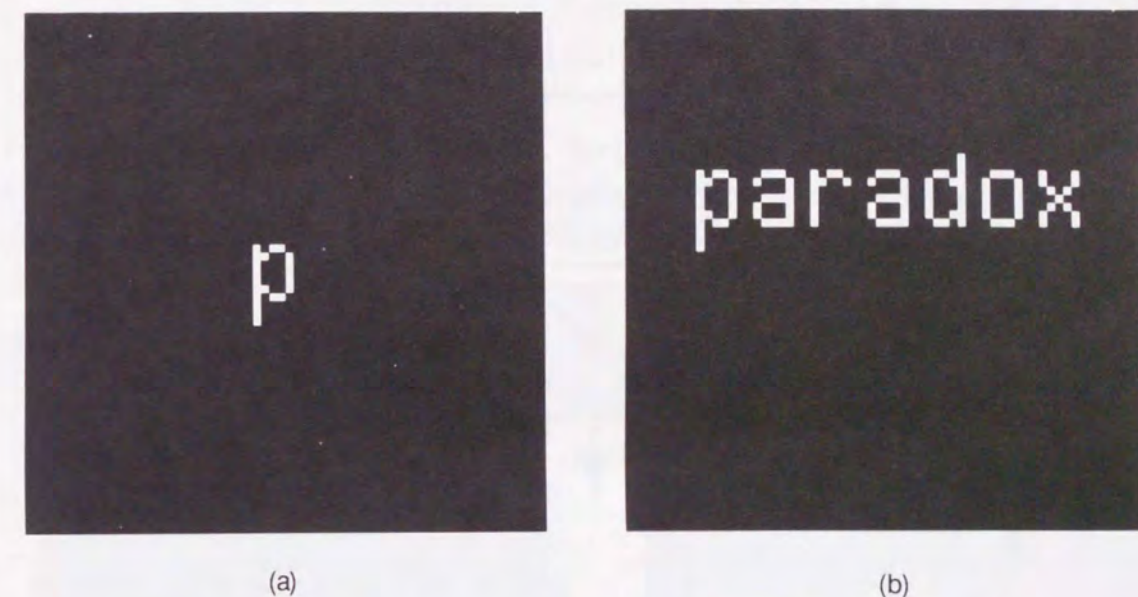


Fig. 3-2. 計算機シミュレーションに用いた画像：(a)参照物体；(b)テスト物体

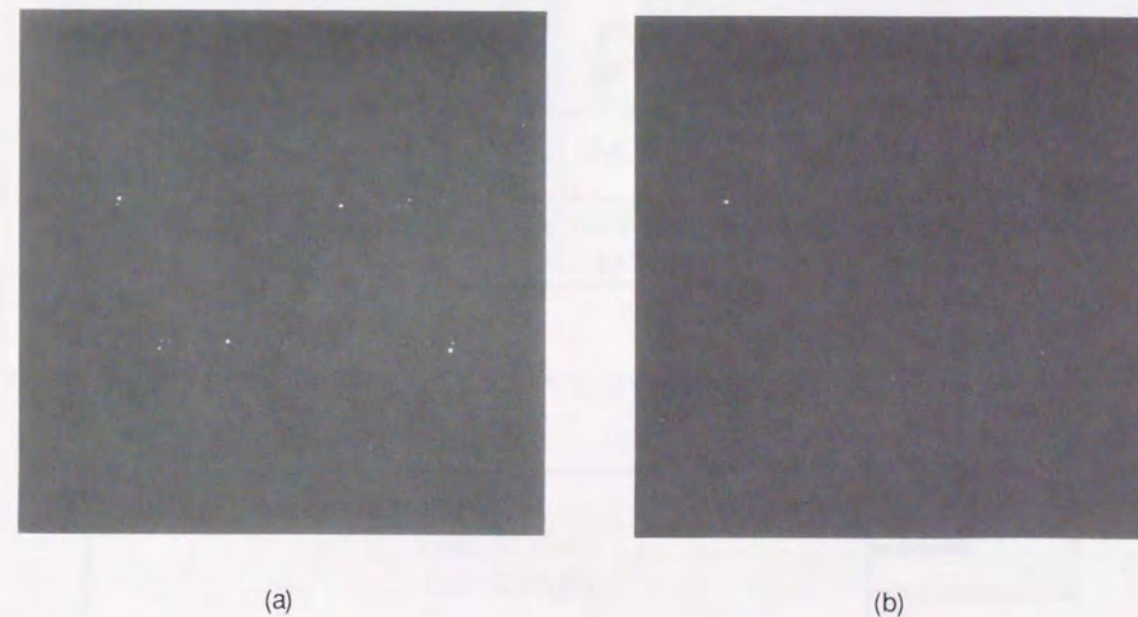


Fig. 3-3. (a)余弦変換と(b)ハートレー変換による相関関数の比較（計算機シミュレーションの結果）

§ 3-3-2 ハイブリッドシステムにおける実験

実験は、§ 2-5-1 に示したシステムにフォトロン社のイメージメモリーボード FDM98-4を付加したシステムを用いて行なった。実験系のブロック図をFig. 3-4に示す。FDM98-4はCRTに画像などを表示するために用い、Series100は干渉計からの出力を取り込むために用いた。Series100は、画像取り込み時に1フレーム前の画像との平均を実時間で求めることができる。

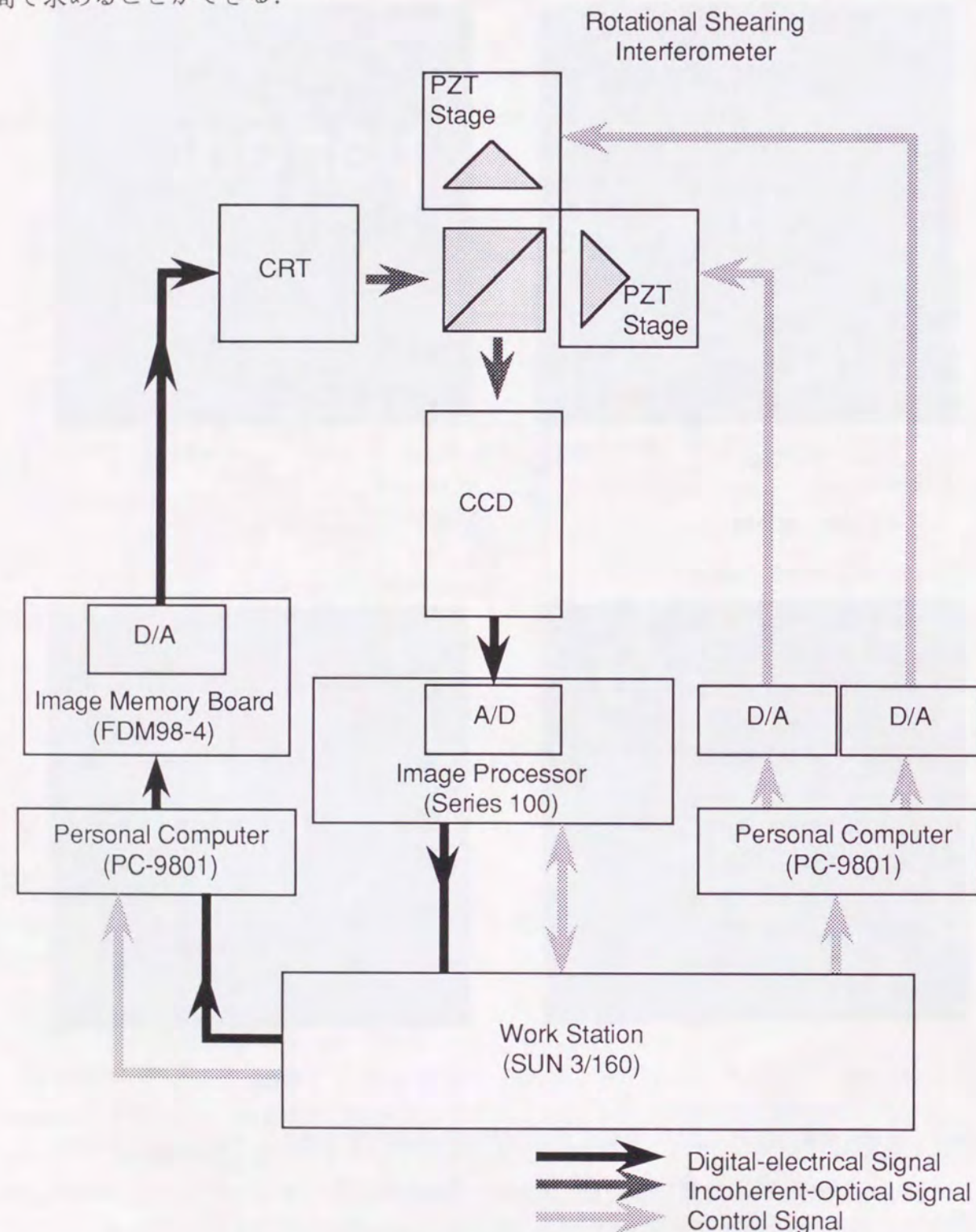


Fig. 3-4. 実験系

本実験においてもインコヒーレントホログラムを2値化する際の照明むらなどの影響を避けるため、第1章で述べた適応2値化の手法を用いた。すなわち、(1-16)式で $k\Delta z = \alpha$ ($\alpha = -\pi/2, -\pi/4, 0$, あるいは, $\pi/4$)のときの $I(\xi, \eta)$ を $I_+(\xi, \eta)$ とし、 $k\Delta z = \alpha + \pi$ のときの値を $I_-(\xi, \eta)$ として、バイナリーインコヒーレントホログラム $I_B(\xi, \eta)$ を次式から求めた。

$$\begin{aligned} I_B(\xi, \eta) &= 1 & \text{if } (I_+(\xi, \eta) - I_-(\xi, \eta)) > 0, \\ I_B(\xi, \eta) &= 0 & \text{otherwise.} \end{aligned} \quad (3-8)$$

参照物体とテスト物体をFigs. 3-5に示す。画素数は 256×240 である。テスト物体のBHTと参照物体のBCTとの積 (equivalent operation) のハートレー変換をFig. 3-6 (a)に示す。また、テスト物体のBRHTと参照物体のBSTとの積 (equivalent operation) のハートレー変換をFig. 3-6 (b)に示す。Figures 3-6 (a)と(b)の差をFigs. 3-7に示す。(3-7)式に相当する正しい相関信号のみが得られていることがわかる。この結果から実験的にもハートレー変換を用いたパターンマッチングのアルゴリズムの有用性が証明された。

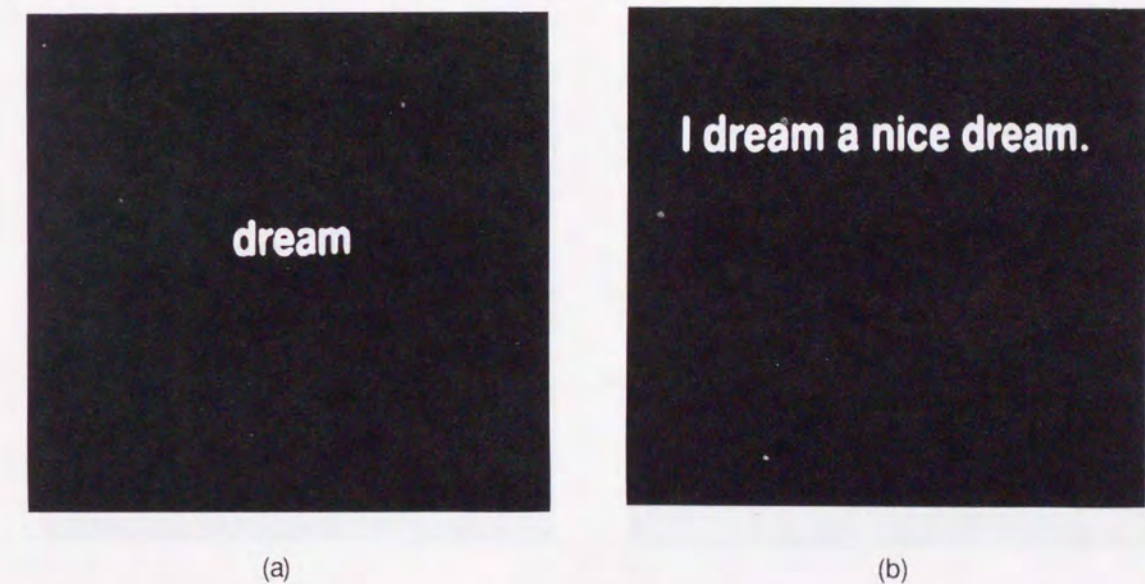


Fig. 3-5. ハイブリッドシステムによる実験に用いた画像：(a)参照物体；(b)テスト物体

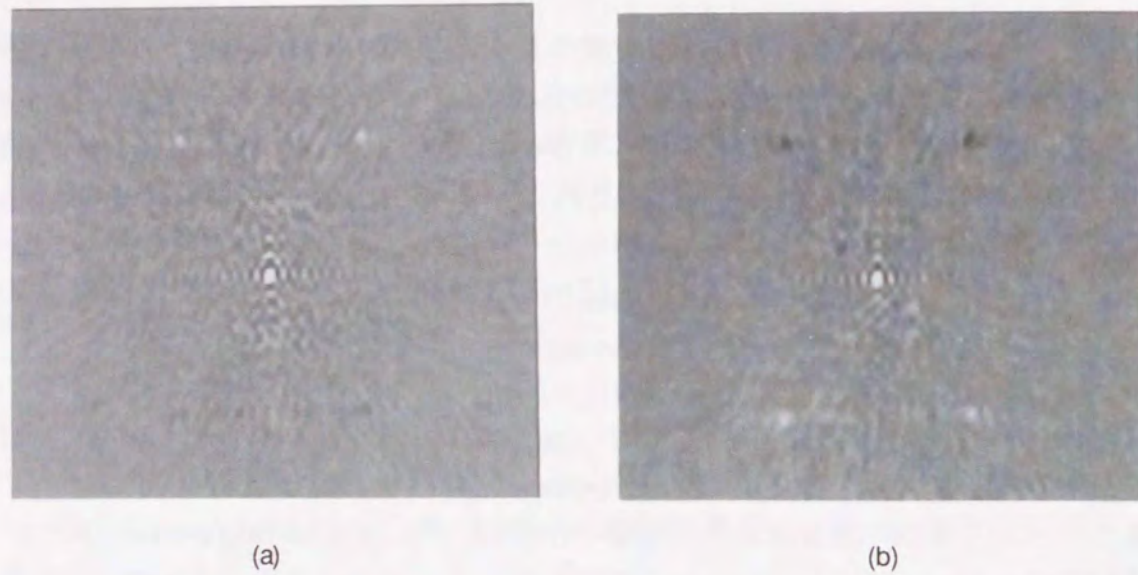


Fig. 3-6. (a)テスト物体のBHTと参照物体のBCTとの積 (equivalent operation) のハートレー変換；
(b)テスト物体のBRHTと参照物体のBSTとの積 (equivalent operation) のハートレー変換
(ハイブリッドシステムによる実験結果)

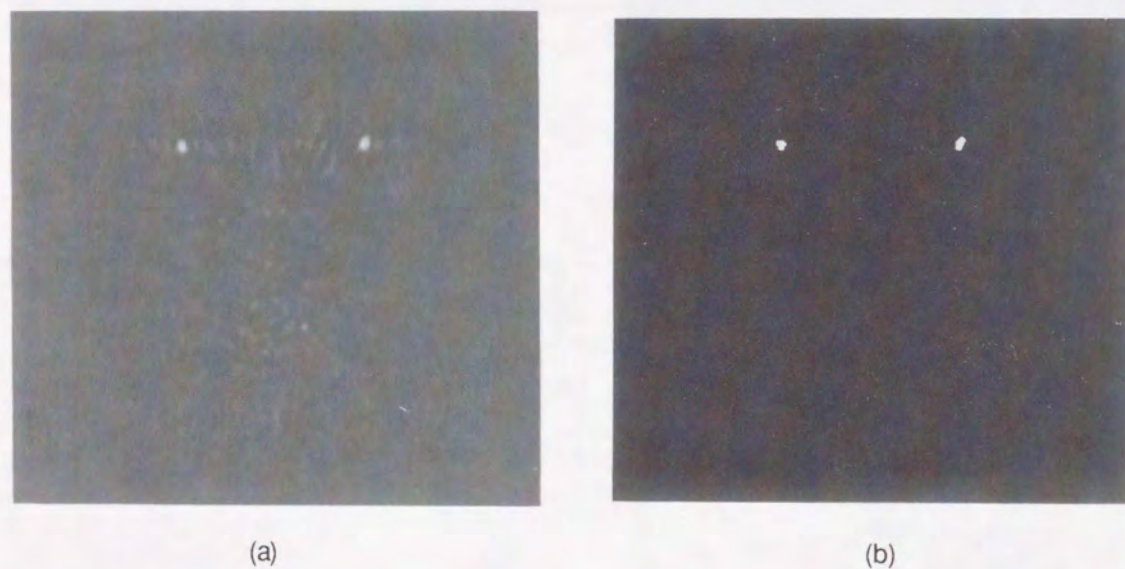


Fig. 3-7. (a)相関信号と (b) 2 値化処理された相関信号 (ハイブリッドシステムによる実験結果)

§ 3-4 結言

ハートレー変換を用いたハイブリッドパターンマッチングを提案した。提案した手法では、余弦変換を用いた際に生じていた偽出力などの不要な信号を取り除くことができた。

§ 3-2 では、回転シアリング干渉計を用いることによって余弦変換、正弦変換、ハートレー変換や回転ハートレー変換が得られることを示した。さらに、それらを適切に組み合わせれば、必要な相関信号のみが得られることを理論的に示した。

§ 3-3 では、計算機シミュレーションとハイブリッドシステムによる実験の両面から提案したアルゴリズムが有用であることを示した。

本章で提案したアルゴリズムは、第2章で提案した余弦変換を用いた場合よりも手順が増加する。しかし付加する処理は、数フレームの時間内で実行できるため、高速パターンマッチングへの応用が可能である。

第4章 2値フーリエ位相相関

§4-1 緒言

相関関数を用いてパターンマッチングを行なう場合、自己相関関数の形状はなだらかなものよりも鋭いものの方が望ましい。すなわち理想的にはデルタ関数状の形状が望ましい。そこで、本章では、相関関数の形状を鋭くする方法である2値フーリエ位相相関(Binary Fourier Phase-Only Correlation, 以下BPOCと略す)を提案する。

BPOCの位置づけをするため従来の方法、マッチトフィルタリング、位相フィルタ、2値位相フィルタ、フーリエ位相相関を、簡単に説明する。これらの従来の相関関数の形状とBPOCの形状を比較し、簡単な処理にもかかわらず、BPOCの識別能力が高いことを示す。さらに、BPOCの問題点を述べ、その解決策を示す。最後に偏光素子を用いて光学的にBPOCを実行する方法を提案する。

なお、本論文では「2値化」という単語は「0, または, +1にすること」の意味で用いているが、本章に限り、従来の2値位相フィルタとの共通性を持たせるため「-1, または, +1にすること」の意味で用いる。

§4-2 位相フィルタと2値位相フィルタ

1964年にVander Lugtによって提案された光学的マッチトフィルタリング⁵(Matched Filtering, 以下MFと略す)は、参照物体を $f(x)$ 、テスト物体を $g(x)$ とすれば、両者の相関関数は第1章で示したように次のような式で表すことができる。

$$f(x) \star g(x) = \text{FT}^{-1}[\text{FT}[f(x)]^* \text{FT}[g(x)]], \quad (4-1)$$

ここで、 $\star$ は相関演算を、 $\text{FT}[\cdot]$ はフーリエ変換演算を、 $\text{FT}^{-1}[\cdot]$ は逆フーリエ変換演算を、 $*$ は複素共役を表している。 $\text{FT}[f(x)]^*$ はマッチトフィルタ(あるいは、単にフィルタ)と呼ばれ、ホログラフィーの技術を用いて作成される。フィルタは、振幅と位相の情報を持っているため、振幅透過率が小さい部分では光の吸収が起こり、光の利用効率の面では良くない。MFは形状の似た物体ではほとんど同じ相関値を示してしまうといった性質を持っている。これは、かすかに形状が異なった物体を区別するような場合には、大きな欠点となる。

この欠点を克服するために、フィルタを位相のみの情報にするアイデアが1984年にHornerら⁸によって提案された。これが、位相フィルタ(Phase-Only Filter, 以下POFと略す)と呼ばれる手法で、MFの相関ピークの形状を尖鋭化する研究の火付け役となった。POFを用いた相関は次式で定義される。

$$\text{POF} \equiv \text{FT}^{-1}[\text{P}[\text{FT}[f(x)]^*] \text{FT}[g(x)]], \quad (4-2)$$

ここで、 $\text{P}[\cdot]$ は位相抽出演算を表し、次式で定義される。

$$\text{P}[\text{FT}[f(x)]] = \frac{\text{FT}[f(x)]}{|\text{FT}[f(x)]|}. \quad (4-3)$$

ただし、振幅が0のときの扱いについては、明確に定義されていない。位相のみの情報にするということは、空間周波数面において振幅をすべて等しくすることになるため、高周波成分を強調している(実空間面においてはエッジに相当する部分を強調している)ことになる。なぜなら一般に物体の持つ空間周波数は、低周波成分に多くの情報が含まれているからである。そのため、POFを用いれば自己相関ピークが鋭くなる。このPOFは、フィルタの振幅透過率は1であり、それによる光の吸収がないため光の利用効率がよいという特徴も備えている。しかし、連続な値をとる位相情報のみにすることは極めて困難であったため、実用的ではなかった。位相情報のみにする方法としてブリーチ(bleach, 漂白)があるが、完全に漂白しきれる(振幅を1にそろえきれる)ものではない。実用的な方法としては、計算機ホログラムによるPOFの作成しかなかったといえる。

POFよりも実用的な手法、2値位相フィルタ(Binary Phase-Only Filter, 以下BPOFと略す)がHornerら⁹によって提案された。一方、フィルタをSLMを用いて作成する動きもこのころから活発になってきた。しかし、SLMにおいて位相情報を連続的に表現することは非常に難しい。そのため、実験する側の立場からPsaltisら¹⁰によって位相情報を離散的な2値の情報として表す手法(ただし彼らはBPOFとは呼んでいない)がHornerらと、ときを同じくして提案された。BPOFは次式で定義される。

$$\text{BPOF} \equiv \text{FT}^{-1}[\text{B}[\text{FT}[f(x)]^*] \text{FT}[g(x)]], \quad (4-4)$$

ここで、 $\text{B}[\cdot]$ は位相2値化演算を表し、次式で定義される。

$$\begin{aligned} \text{B}[\text{FT}[f(x)]] &= +1 && \text{if } \text{Re}[\text{FT}[f(x)] \exp \phi] > 0, \\ &= -1 && \text{otherwise,} \end{aligned} \quad (4-5)$$

ここで、 $\text{Re}[\cdot]$ は実部抽出演算を表す。すなわち、フィルタの位相情報が0または π のどちらかに分けられるため、2値位相フィルタと呼ばれる。 ϕ は、位相定数である。 $\phi=0$ のときは余弦変換の符号、 $\phi=\pi$ のときは正弦変換の符号に等しい。位相定数 ϕ を決定する基準はFarnらの手法⁴⁷を始め、いろいろとあるが、本章では $\phi=0$ として議論を進めていく。このBPOFも空間周波数面において振幅をすべて等しくするため、高周波成分を強調していることになる。そのために、POFと同様に自己相関ピークが鋭くなる。このBPOFも、フィルタによる光の吸収がないため光の利用効率がよいという特徴も備えている。これらのフィルタの比較については後節において行なう。

§4-3 フーリエ位相相関と2値フーリエ位相相関

前節のPOFやBPOFは、何れもフィルタ（参照物体のフーリエ変換）のみに手を加え相関ピークを尖鋭化する手法であった。テスト物体のフーリエ変換には全く手が加えられていなかった。これは、参照物体のフーリエ変換が一旦、フィルタとして記録されるのに対し、テスト物体のフーリエ変換は、単にフィルタを通過するだけであるため、手を加えることそのものが難しいためである。しかし、何らかの形で、テスト物体のフーリエ変換に手を加えることが可能であるならば、§4-2において示した手法よりも効果的な相関ピークの尖鋭化が期待できる。

分光学の分野では、実験から得られたスペクトルがライブラリースペクトルのどれと一致するかを調べるのが重要である。スペクトルの検索の一つの手法に計算機によるマッチング（相関演算）がある。計算機によるフーリエ変換であるため、参照物体、テスト物体（分光スペクトル）両方のフーリエ変換（分光学で意味するところのスペクトルのフーリエ変換）に手を加えることは容易である。そのため、両フーリエ変換の位相のみどうしによって相関をとる手法が1987年にKawataら⁴⁸により、両フーリエ変換の位相を2値化したものどうしによって相関をとる手法が1981年にLamら⁴⁹により、それぞれ提案されている。前者をフーリエ位相相関（Fourier Phase-Only Correlation, 以下POCと略す）、後者をBPOCと呼ぶことにする。それぞれ、

$$\text{POC} \equiv \text{FT}^{-1}[\text{P}[\text{FT}[f(x)]^*]\text{P}[\text{FT}[g(x)]]], \quad (4-6)$$

$$\text{BPOC} \equiv \text{FT}^{-1}[\text{B}[\text{FT}[f(x)]^*]\text{B}[\text{FT}[g(x)]]], \quad (4-7)$$

と定義できる。分光学の分野では次元は1次元であり、しかもテスト物体と参照物体との位置ずれ（波長軸方向のシフト）は考えなくてよい。そのため、BPOCは単に一致した要素の個数を数え、その値を相関値としている。しかし、フーリエ変換の移動性により、位置ずれにも対応するシフト・インヴァリアントなパターンマッチングを行なうことができる。BPOCは、電子工学の分野ではPolarity Correlationと呼ばれている⁵⁰。

スペckル分野では、スペckルそのものの相関を求めるために、片方の信号をクリッピングしたのち相関を求める手法をシングルクリッピング、両方の信号をクリッピングしたのち相関を求める手法をダブルクリッピングと呼んでいる⁵¹。それぞれが、BPOF, BPOCに相当する手法であるといえる。

光学的に、POCやBPOCを行なう場合には、先にも述べたように、如何にして、テスト物体のフーリエ変換に手を加えるかにかかっている。現在のところ、光学的POCは、非線形光学材料（フォトリソミック材料）を用いたフィードバック光学系の使用が松岡により提案されている⁵²。

普通のコヒーレント光を用いたフーリエ変換では、実部のみを得ることは難しいためBPOCも容易には行なえない。しかしながら、著者が提案するハイブリッド処理系ではシアリング干渉計によって物体の余弦変換、すなわち、フーリエ変換の実部が得られるため、容易に2値化することができる。位相定数 ϕ を変えるには、光路差を変えればよ

い。しかも、しきい値レベルは、バイアスに等しいため容易に決定できるという特徴も有している。すなわち、BPOCを実行することができる。第2章や第3章で示した、インコヒーレントホログラムをバイナリーインコヒーレントホログラムとして相関を求めることは、BPOCにはかならなかったのである。もちろん、BPOCは純デジタルな処理系にも適している。特に、位相を求める必要がなく、三角関数を使用せずにすむという他の方法にない特徴を持っている。三角関数を使用せずにすむということは処理時間も少ないということである。POCもBPOCもPOFやBPOFと同様に高周波強調であるために自己相関ピークが鋭くなる。

§4-4 従来の相関法との比較⁵³

今までに述べた五つの手法（MF, POF, BPOF, POC, およびBPOC）をまとめたものがFig. 4-1である。BPOCと他の手法とのフーリエ面における関係がよくわかる。

		Reference Object $f(x)$		
		$F^*(v)$	$\text{P}[F^*(v)]$	$\text{B}[F^*(v)]$
Test Object $g(x)$	$G(v)$	MF	POF	BPOF
	$\text{P}[G(v)]$		POC	
	$\text{B}[G(v)]$			BPOC

$\text{P}[\bullet]$: Phase-only operation of $[\bullet]$

$\text{B}[\bullet]$: Binary phase-only operation of $[\bullet]$

Fig. 4-1. 相関関数を得る五つの方法

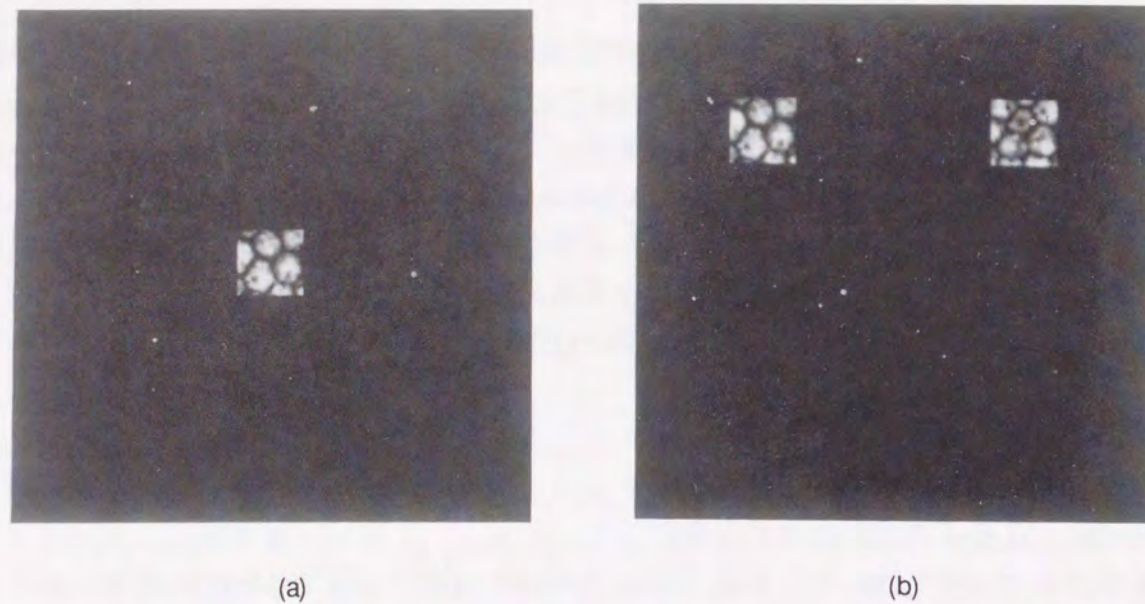


Fig. 4-2. 相関関数の比較のために用いた(a)参照物体と(b)テスト物体

以下、BPOCの効果と他の相関法の効果との比較を数値解析により行ない、BPOCの識別能力の高さを示す。参照物体とテスト物体をFigs. 4-2 (a)と(b)に示す。これらの写真は、ヒト角膜内皮細胞である。テスト物体の左側の物体が参照物体と同一の物体である。画像全体の大きさは 256×256 画素であり、その中を 32×32 画素からなるヒト角膜内皮細胞が占めている。画像のグレイレベルは256階調である。この両物体の相関関数を計算機によって求め、3次元的にプロットしたものがFigs. 4-3である。相関信号は、それぞれの最大値（自己相関信号）によって規格化されている。これらの図から、POCとBPOCがほかに較べて非常に鋭い自己相関値と低い相互相関値を示すことがわかる。BPOCに現われている偽出力は、余弦変換の性質によるものである。しかし、この偽出力は、第3章で述べたように、ハートレー変換を用いれば取り除くことができる。Table 4-1に5種類の手法による自己相関と相互相関の比（CAR, Crosscorrelation to Autocorrelation Ratio）、自己相関の半値全面積（FAHM, Full Area at Half-Maximum of autocorrelation）をまとめた。CARは、大きければ大きいほど、FAHMは、小さければ小さいほど自己相関関数がデルタ関数状の形状に近づき、二つの物体の識別能力が上がる。この表から、POCとBPOCが非常に高い識別能力を有し、デルタ関数状の自己相関関数を持っていることがわかる。

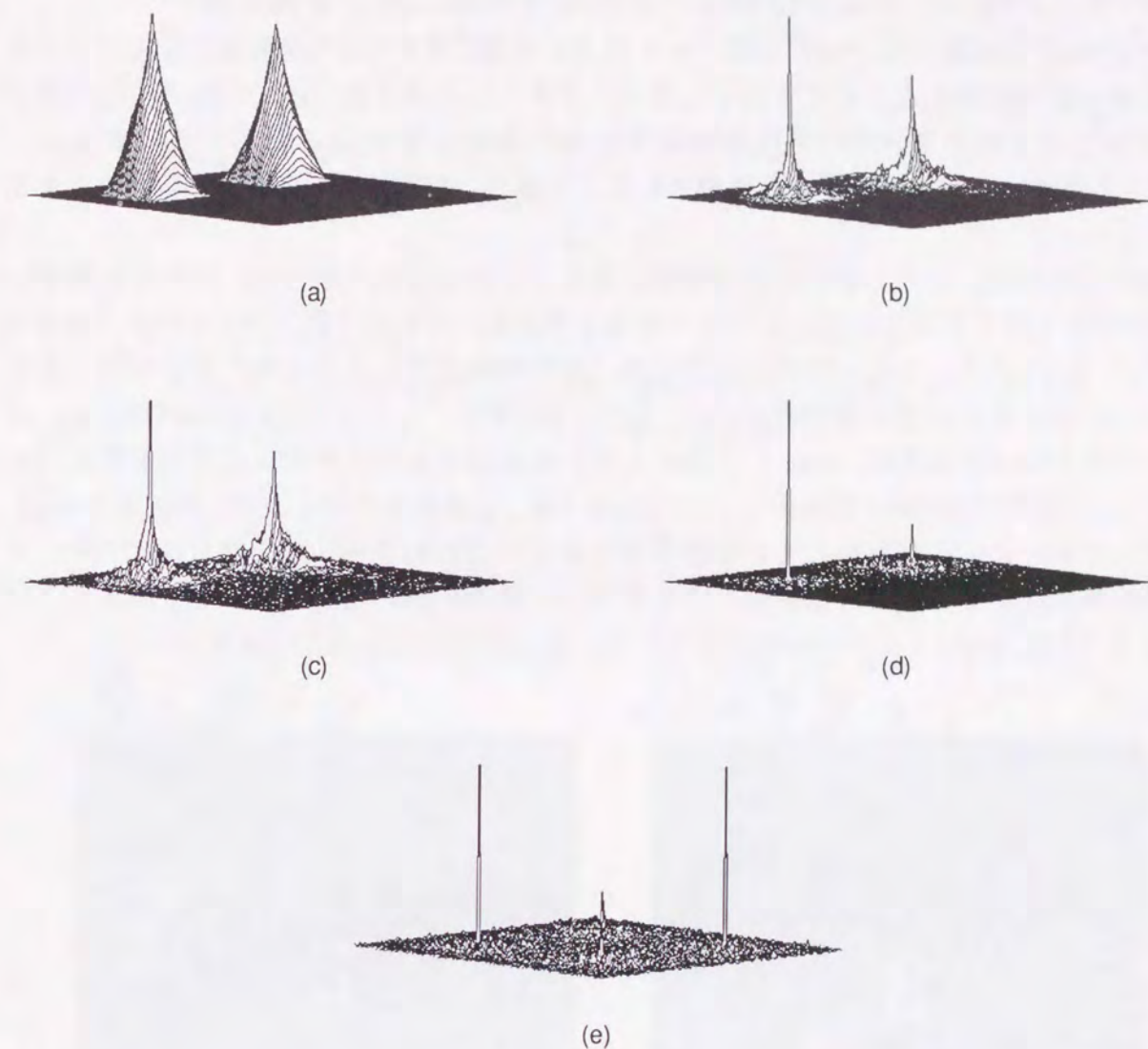
Fig. 4-3. 相関関数の形状：(a) MF；(b) POF；(c) BPOF；(d) POC；(e) BPOC
(計算機シミュレーションの結果)

Table 4-1. 五つの光学的相関の振る舞い

手法	CAR	FAHM
MF	87	469
POF	60	5
BPOF	64	7
POC	24	1
BPOC	23	1

CAR: Crosscorrelation to Autocorrelation Ratio (%)

FAHM: Full Area at Half-Maximum of autocorrelation (pixel)

§4-5 2値フーリエ位相相関の空間周波数面における振る舞い

ここでは、BPOCが鋭い自己相関ピークを与える理由をBPOCの空間周波数面における振る舞いから説明する。そのために、まず、§4-3で述べた、POCが鋭い自己相関ピークを与える理由をPOCの空間周波数面における振る舞いから説明する。さらに、BPOCとPOCとの間には密接な関係があることを示し、BPOCの識別能力が高いことを示す。

簡単のために、テスト物体は参照物体に対して1次元方向（縦方向）にのみ位置ずれ（5画素分上方に移動）を起こした同一物体を考える。それらをFigs. 4-4に示す。画素数は 256×256 である。それらのフーリエ変換（参照物体はフーリエ変換の複素共役）の縦方向の1成分をそれぞれ複素表示（Re; 実部, Im; 虚部）したものをFigs. 4-5に示す。グラフの右上部は周波数軸（freq.）方向から見た投影図である。POCは空間周波数面ではFigs. 4-5の振幅を1に揃えたものどうし（Figs. 4-6）を掛け合わせるため、Fig. 4-7のようになる。きれいに位相が回転している様子がわかる。これをフーリエ変換すればフーリエ変換の移動性からすべての情報が1点に集中し、非常に高い相関ピークを生成することになる（Figs. 4-8）。これがPOCが非常に高い識別能力を示す理由である。

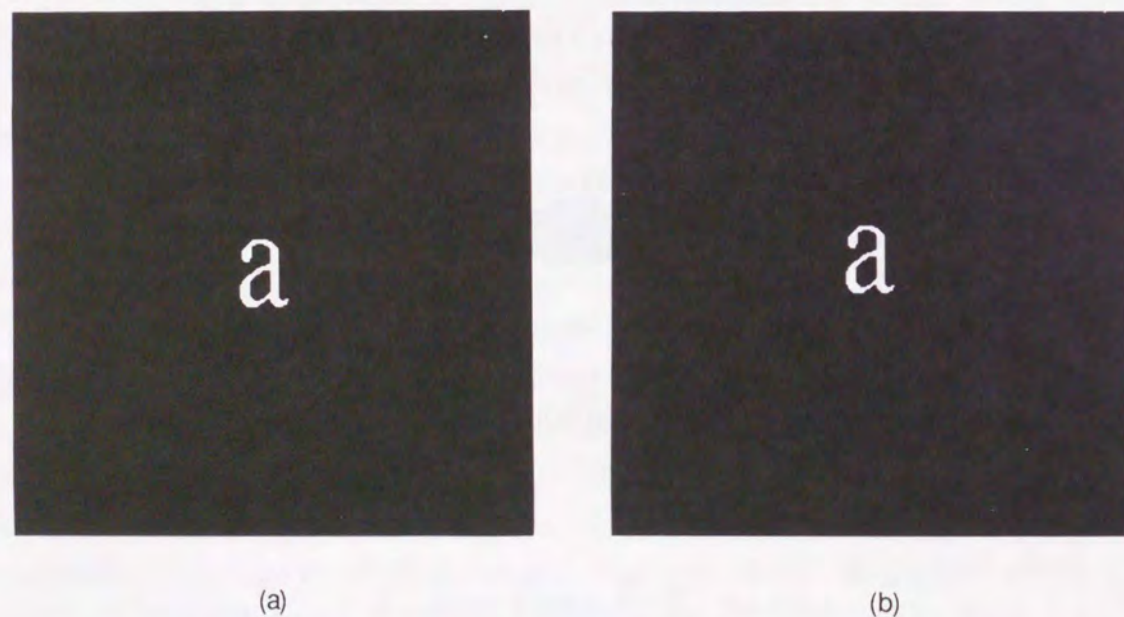


Fig. 4-4. POCとBPOCとの関係を示すために用いた(a)参照物体と(b)テスト物体

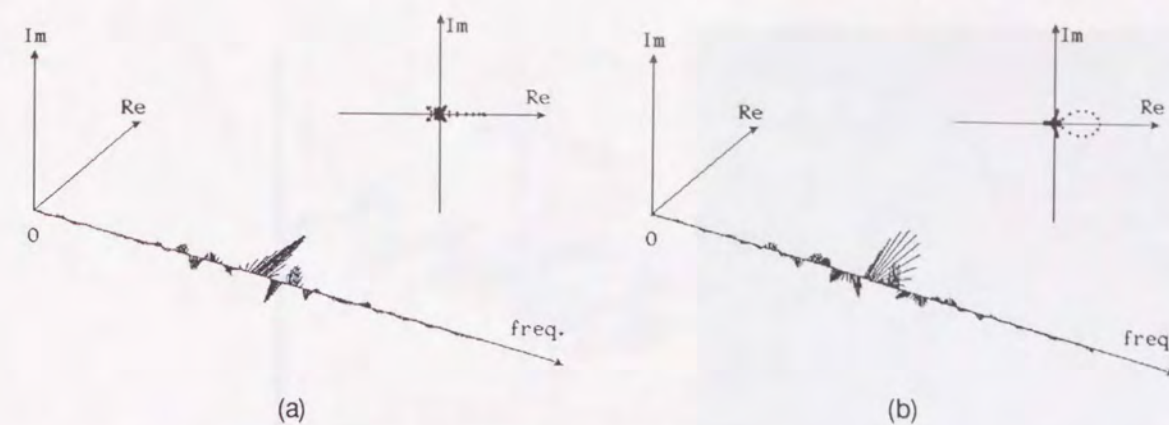


Fig. 4-5. (a)参照物体のフーリエ変換の複素共役と(b)テスト物体のフーリエ変換それぞれの一部分の複素表示

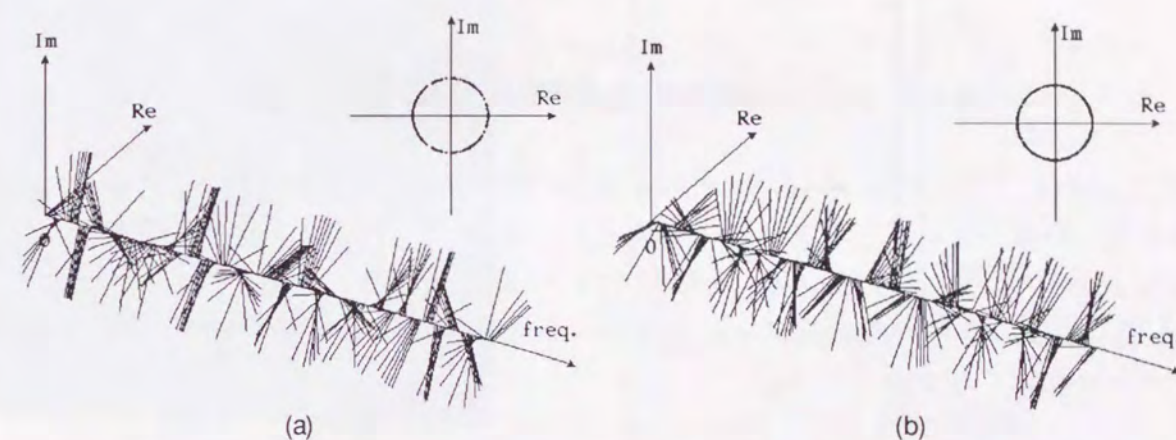


Fig. 4-6. (a)参照物体のフーリエ変換の複素共役と(b)テスト物体のフーリエ変換それぞれを位相化したものの一部分の複素表示

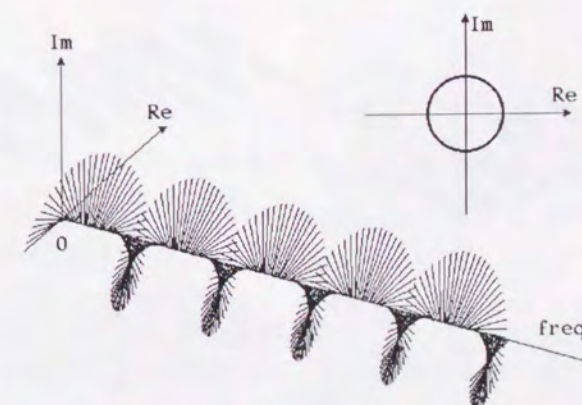


Fig. 4-7. Figure 4-6の積

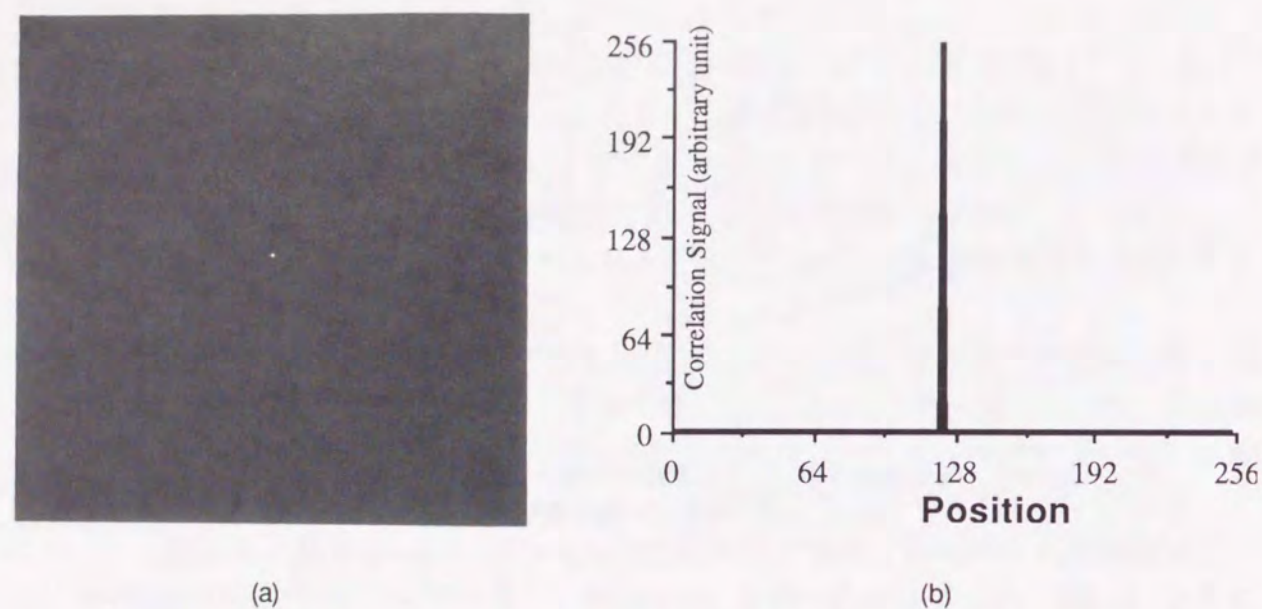


Fig. 4-8. フーリエ位相相関: (a)振幅分布; (b)縦方向の断面図

一方, BPOCはFig. 4-7に示したフーリエ変換の積の実部の符号によって2値化するのではなく, Figs. 4-6に示したフーリエ変換それぞれをそれぞれの実部の符号によって2値化したものどうし (Figs. 4-9) を掛け合わせる手法である. 掛け合わせた結果をFig. 4-10に示す. さらにこれをフーリエ変換 (余弦変換) したものがFigs. 4-11であり, 鋭いピークが二つ現われている.

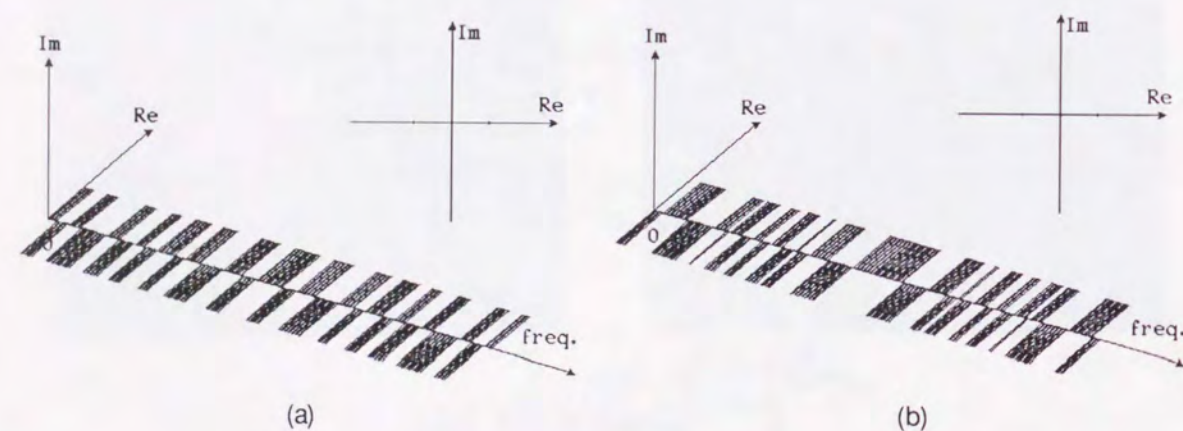


Fig. 4-9. (a)参照物体のフーリエ変換の複素共役と(b)テスト物体のフーリエ変換それぞれを2値位相化したもの一部分の複素表示

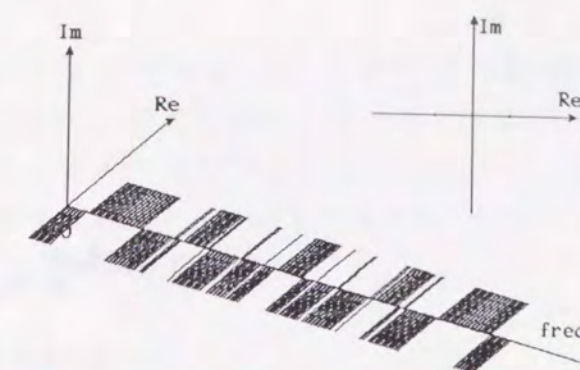


Fig. 4-10. Figure 4-9の積

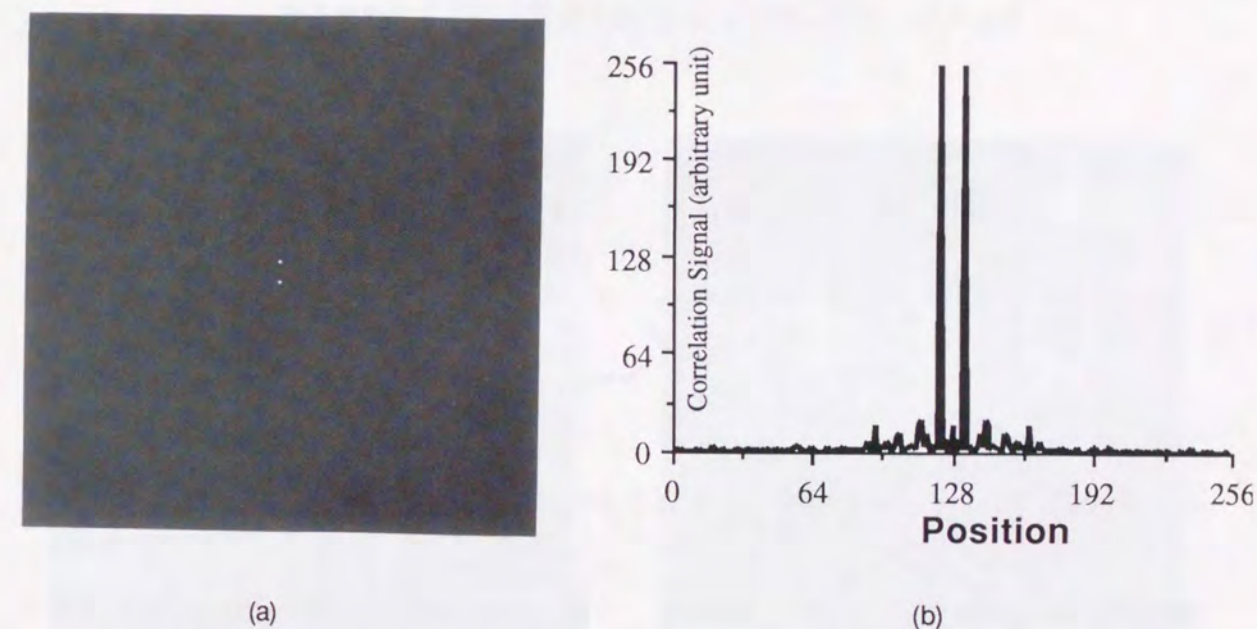


Fig. 4-11. 2値フーリエ位相相関: (a)振幅分布; (b)縦方向の断面図

BPOCの場合は, 個々の物体のフーリエ変換の実部しか考慮に入れていないことに注目すべきである. フーリエ変換が実部のみになるようにするには, その複素共役 (Fig. 4-12) を加えればよい. その結果をFig. 4-13に示す. Fig. 4-13を位相化しても, 2値位相化しても実部のみ情報があるため, 得られる結果は同じである. すなわちフーリエ変換にその複素共役を加えればPOCとBPOCとの区別はできない. フーリエ変換に複素共役を加えるということは, 実空間では座標の符号の反転したものを加えることに等しい. 結局, Figs. 4-4に示した物体のBPOCは, Figs. 4-14に示した物体どうしのPOCにほかならず, 鋭い相関ピークを形成することになる.

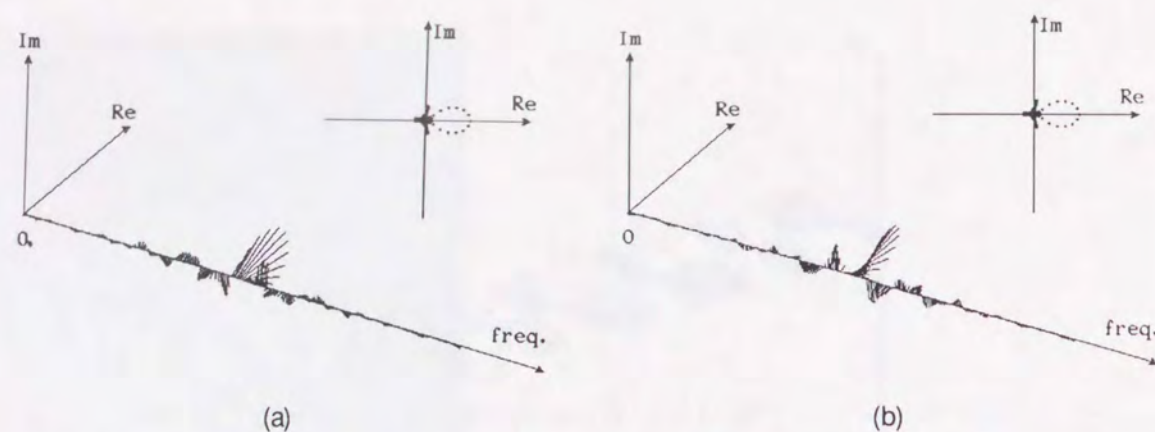


Fig. 4-12. テスト物体の(a)フーリエ変換と(b)その複素共役

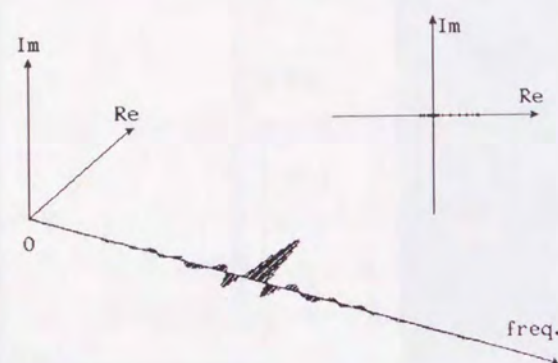


Fig. 4-13. Figures 4-12の(a)と(b)の和

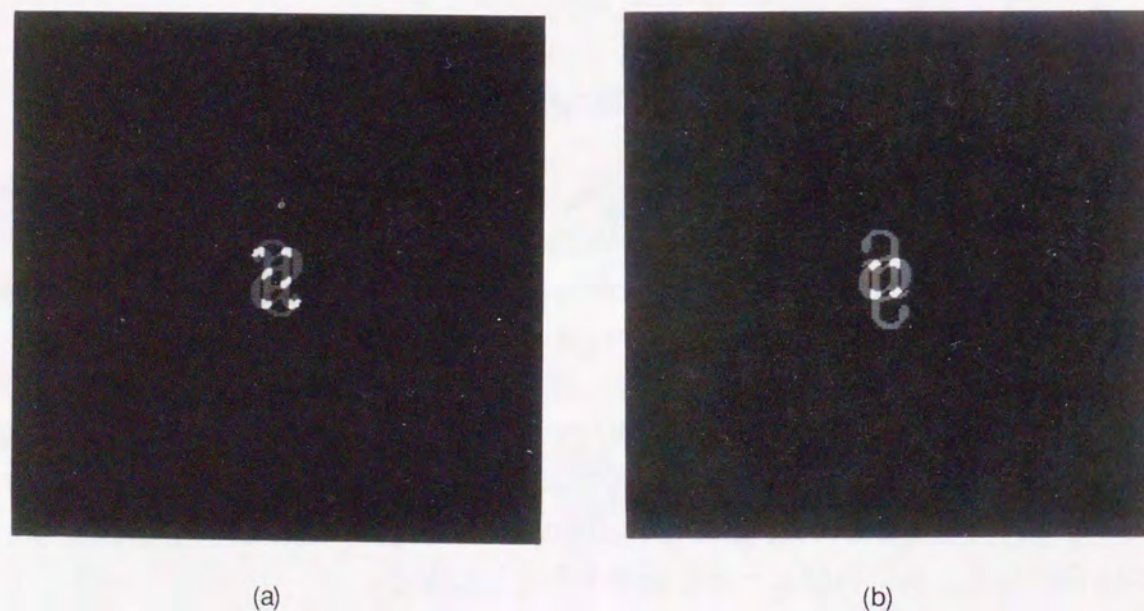


Fig. 4-14. Figures 4-4の2値フーリエ位相相関とフーリエ位相相関を求めると等価になる物体

§ 4-6 2値フーリエ位相相関の問題点とその解決策

2値フーリエ位相相関は、処理の簡便さにもかかわらず、識別能力が高いことを § 4-4 の数値解析と、 § 4-5 の空間周波数面における振る舞いで示した。しかし、BPOCには処理は簡便さに起因するリスクが少なからず伴う。そこで、BPOCのうまくいかない例を示し、その解決案を提案する。

§ 4-6-1 高調波の問題

BPOCのうまくいかない例を、計算機シミュレーションによって示す。Figures 4-15に示した二つの画像のBPOCを求める場合を考える。画素数は256×256である。テスト物体は、参照物体と同じ画像を等間隔に三つ並べたものである。

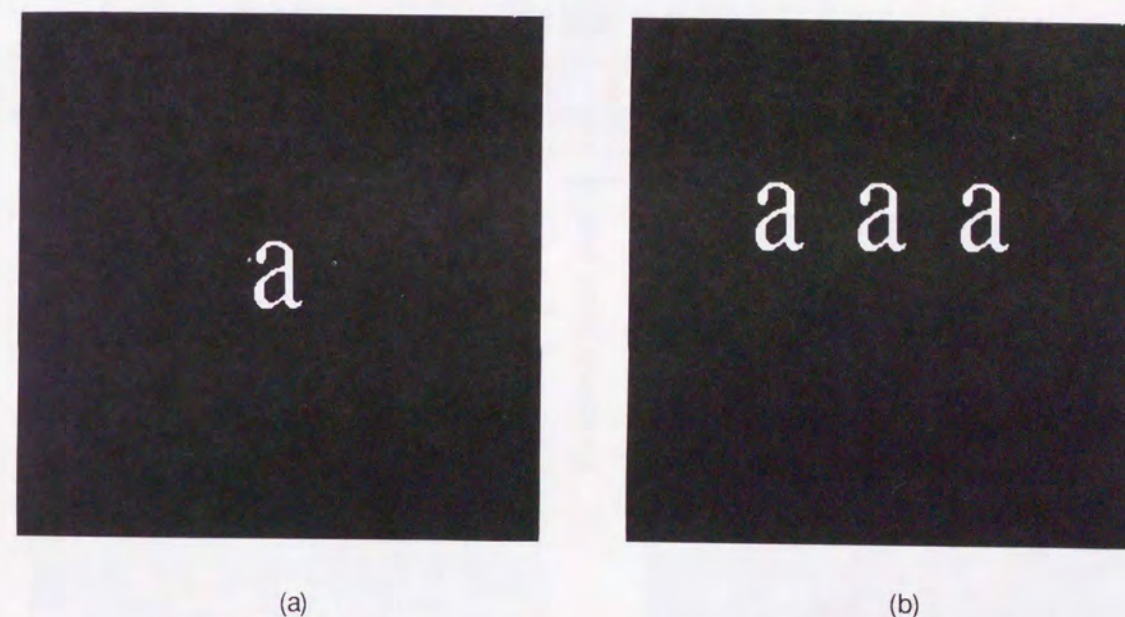


Fig. 4-15. 計算機シミュレーションに用いた(a)参照物体と(b)テスト物体

これらのBPOCを求めた結果をFig. 4-16に示す。相関ピークを通る二つの軸の断面図をFigs. 4-17に示す。



Fig. 4-16. 2値フーリエ位相相関 (計算機シミュレーションの結果)

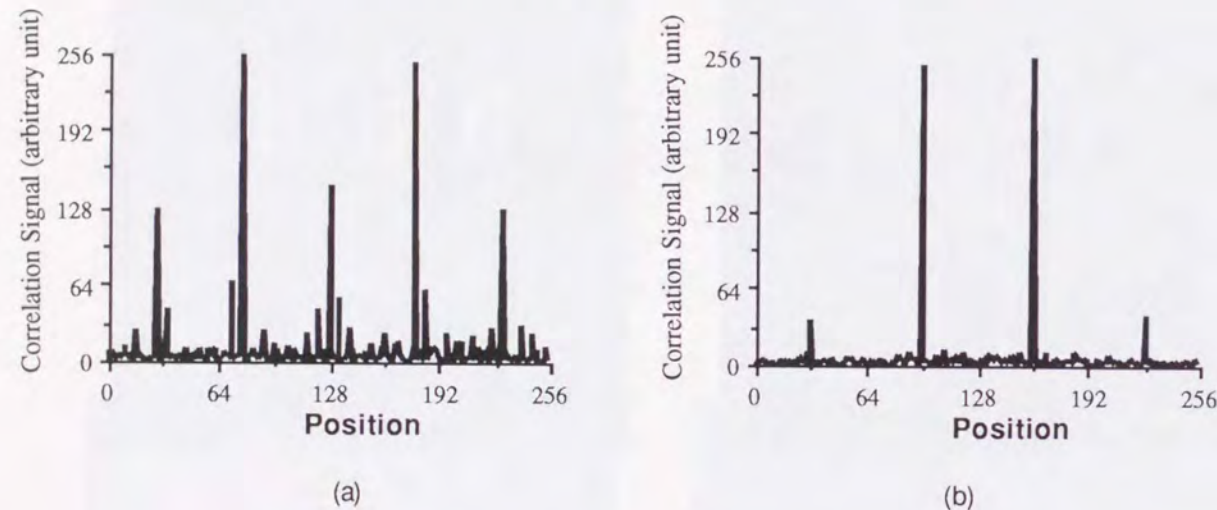


Fig. 4-17. 2値フーリエ位相相関の断面図: (a)横軸; (b)縦軸

正しく相関関数が求められているならば、横軸方向には三つの相関ピークが並んでいなければならない。この図からは相関ピークが横方向に五つ並んでいるのが認められる。これでは、正しい相関が得られたことにはならない。原因としては、テスト物体や参照物体のフーリエ変換を2値化したために高調波が発生し、それによる相関が現われたということが考えられる。この問題はJTCにおいて、2値化することによる類似の問題点がF. T. S. Yuら⁵⁴により指摘されている。

§ 4-6-2 テスト物体のフーリエ変換の3値化

BPOCの問題点を解決する一つの方法を提案する。高調波の問題は、物面上で、ほぼ同じ形状の物体が当間隔に並んだときに起こりやすい。いままでは、テスト物体および参照物体のフーリエ変換は値がいくら小さくても+1, または, -1のどちらかに2値化さ

れていた。実際には余りにも小さい値は、信号なのか雑音なのかわからない場合がある。そこで、あまりにも値が小さいものは0としてしまうこと、すなわち3値化することを提案する。参照物体は通常一つの物体であるため2値化のまま扱うことにする。テスト物体のフーリエ変換のみ、2値化ではなく3値化する。なお、3値化は次の式にしたがって行なった。

$$\begin{aligned} T[FT[g(x)]] &= +1 && \text{If } \text{Re}[FT[g(x)]\exp\phi] \geq \varepsilon, \\ T[FT[g(x)]] &= -1 && \text{If } \text{Re}[FT[g(x)]\exp\phi] \leq -\varepsilon, \\ T[FT[g(x)]] &= 0 && \text{otherwise.} \end{aligned} \quad (4-8)$$

ここで、 ε はシステムのノイズレベルなどから決定されるあるしきい値である。これまでと同様に位相定数 ϕ は0とした。比較のために、テスト物体の2値化されたフーリエ変換と3値化されたフーリエ変換をFigs. 4-18に示す。ここではしきい値はフーリエ変換の最大値の1%とした。かなりの部分の情報が0になったことがわかる。

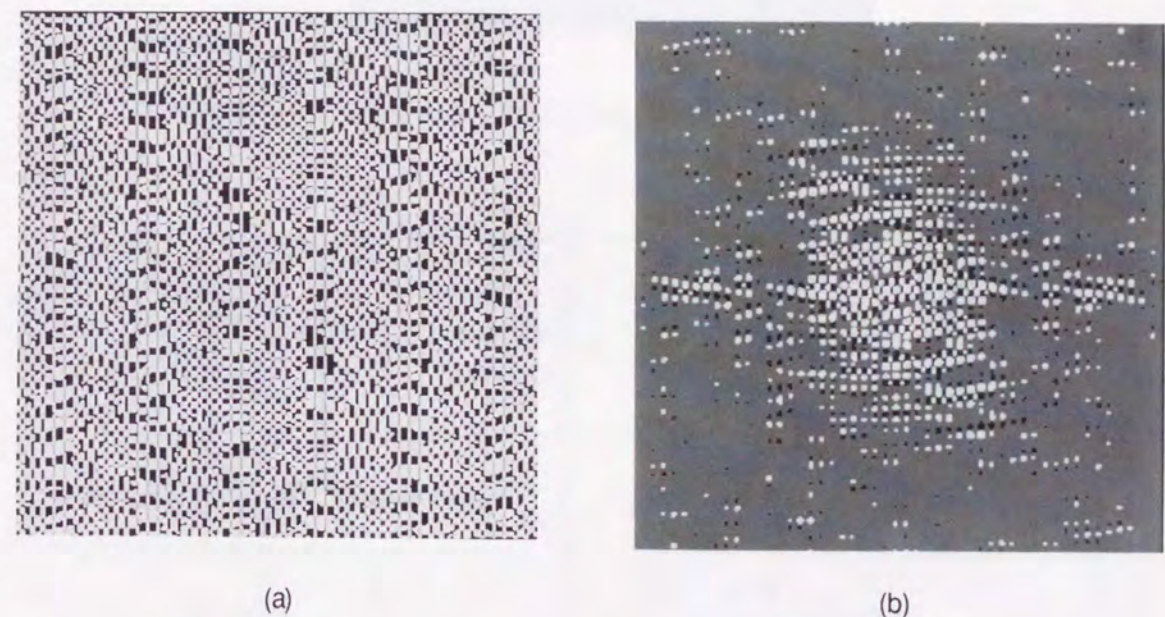


Fig. 4-18. テスト物体の(a) 2値化されたフーリエ変換と(b) 3値化されたフーリエ変換 (計算機シミュレーションの結果)

テスト物体の3値化されたフーリエ変換と参照物体の2値化されたフーリエ変換を用いた相関を、準2値フーリエ位相相関 (Quasi-Binary Fourier Phase-Only Correlation, 以下QBPOCと略す) と呼ぶことにする。QBPOCは次式で定義される。

$$\text{QBPOC} \equiv FT^{-1}[B[FT[f(x)]^*]T[FT[g(x)]]]. \quad (4-9)$$

この式に基づき、先ほどと同じFigs. 4-15に示した画像のQBPOCを求めた結果をFig. 4-19に示す。その断面をFigs. 4-20に示す。高調波成分に起因する偽の相関ピークが消失していることがわかる。すなわち、テスト物体のフーリエ変換を3値化し、QBPOCとすることの有用性が示されている。



Fig. 4-19. 準2値フーリエ位相相関 (計算機シミュレーションの結果)

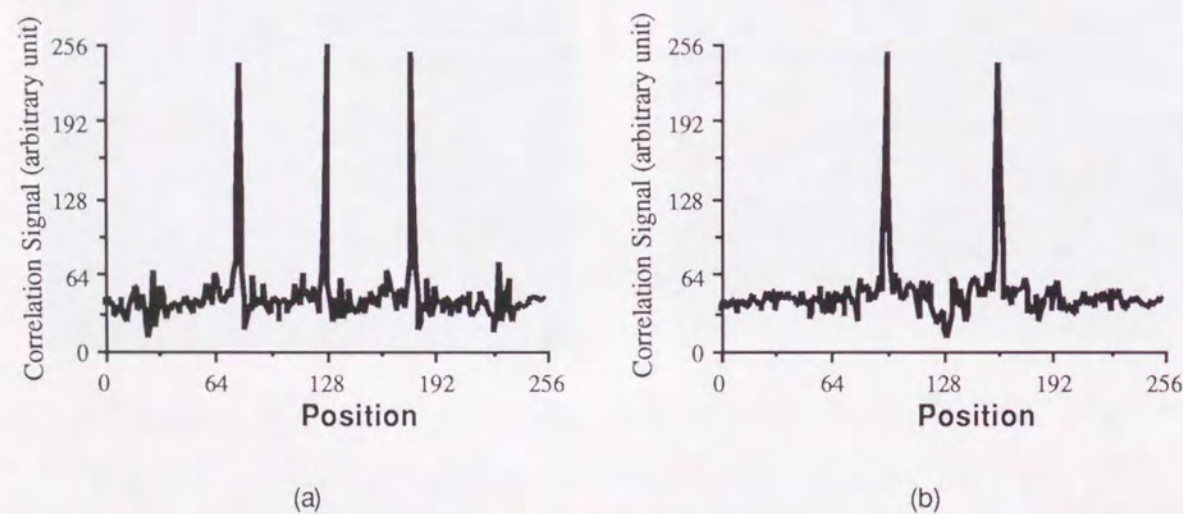


Fig. 4-20. 準2値フーリエ位相相関の断面図：(a)横軸；(b)縦軸

§ 4-7 偏光素子を用いた2値フーリエ位相相関

2値フーリエ位相相関を偏光素子を用いて得る方法を提案する。この方法は、第2章、第3章において提案した方法よりも光学情報処理に処理の比重を大きくした方法である。

Fig. 4-21にその概略を示す。2つの干渉計、インコヒーレントホログラムを2値化するための検出器としきい値素子、バイナリーインコヒーレントホログラムを表示するた

めの液晶テレビ (LCTV)、フィルタの情報を示す磁気光学素子 (MOD)、偏光板 (PP)、相関関数を検出する検出器とモニターから構成されている。第2章で述べたハイブリッドシステムでは、インコヒーレントホログラムの情報、すなわち、0、または、1を光の off、または、onによって表していた。ここで提案する手法ではテスト物体のインコヒーレントホログラムを直線偏光の方向、すなわち、水平、または、垂直によって表し、参照物体のそれを磁気光学効果により偏光面を45度回転させる方向で表す。偏光板は、積の結果を光の on、または、offに変調するために用いられる。想定する各素子の働きをFig. 4-22に示す。すでに述べたハイブリッドシステムでは、積をデジタル処理装置によって求めていたが、ここで提案するシステムでは、光がMODを通過することが積を求めることに等しい。積を求め、その結果を改めてCRTに表示するという処理が不要となり、処理速度が向上する。

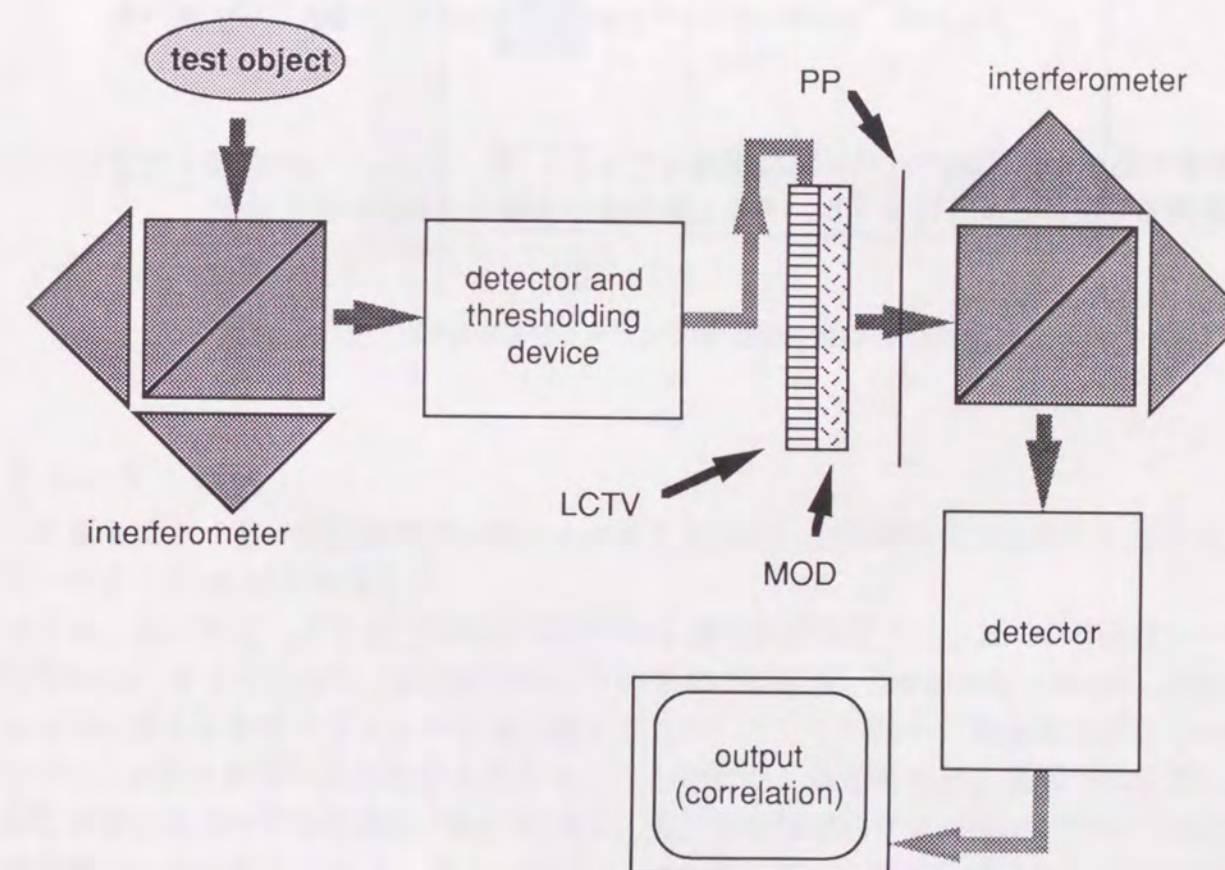


Fig. 4-21. 光学的2値フーリエ位相相関器

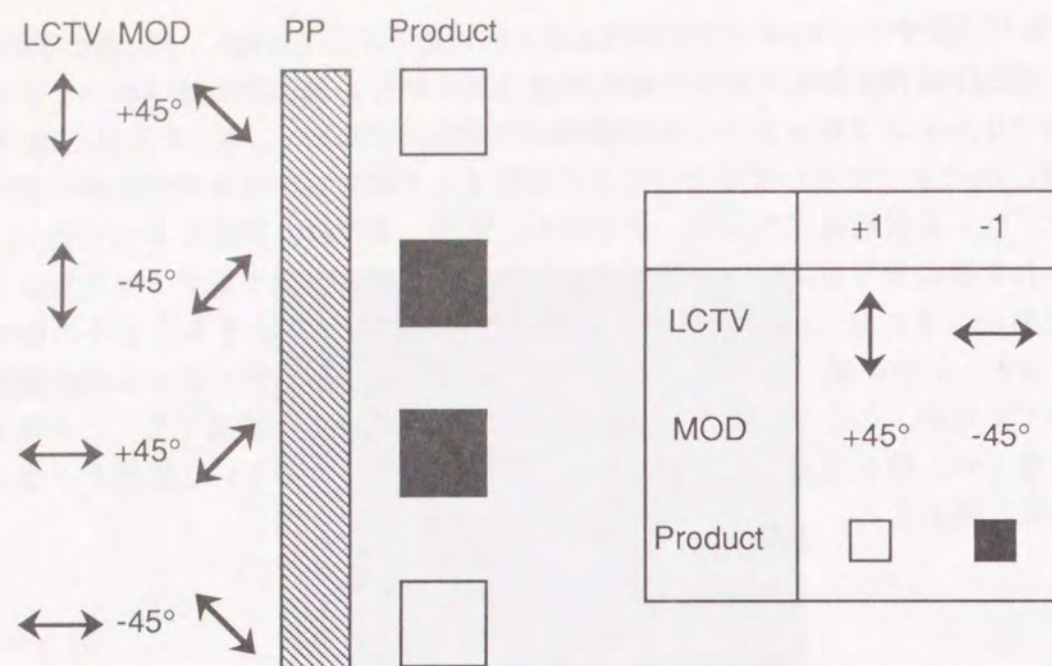


Fig. 4-22. 光学的2値フーリエ位相相関器の各素子の働き

前節で述べた準2値フーリエ位相相関を行なうには、LCTVにて0の状態を45度傾いた直線偏光で表わせば実行できる。そのときの素子の働きをFig. 4-23に示す。

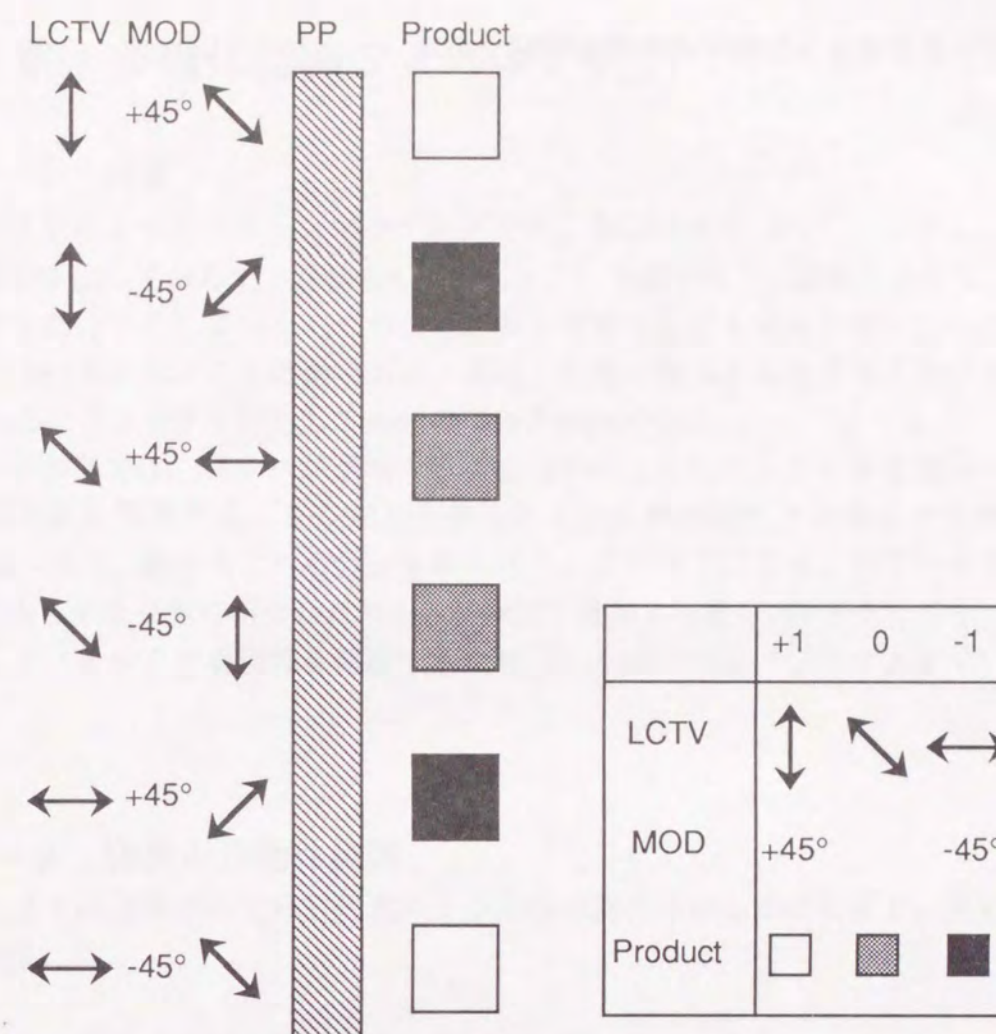


Fig. 4-23. 光学的準2値フーリエ位相相関器の各素子の働き

§ 4-8 結言

本章では、パターン認識能力を向上させる見地から、相関関数の尖鋭化を行なう手法の一つとしてBPOCを提案した。

§ 4-2, § 4-3では、従来の相関関数を得る手法を紹介し、BPOCの位置づけを行なった。§ 4-4では、BPOCの振る舞いをほかの手法(MF, POF, BPOF, POC)による効果と計算機シミュレーションにより比較した。その結果、簡単な処理にもかかわらず、POCと同等の識別能力を有することを示した。定量的には、従来の相関法と比較して自己相関対相互相関比で3倍から4倍、自己相関関数の半値面積で5倍から400倍の識別能力の向上が見られた。§ 4-5では、BPOCはPOCと密接な関係があることを示し、その識別能力が高い理由を説明した。

§ 4-6では、BPOCの問題点を指摘し、一つの解決策を提案した。§ 4-7では、光学情報処理の比重を大きくするために、BPOCを偏光素子を用いて実現する新しい方法を提案した。BPOCは、簡単な処理にもかかわらず識別能力が高いためデジタル電

子計算機を含むさまざまな分野への応用が期待される。

第5章 多物体認識フィルタの設計

§5-1 緒言

これまでに述べたパターンマッチングでは、参照物体が一つで、しかも、入力物体の大きさは変化しておらず、回転もしていないという条件の下で議論を進めてきた。唯一、位置ずれだけを許していた。しかしながら、実際の応用を考えた場合、このような理想的な状況におかれることは稀である。また、複数の物体を認識する必要がある場合、参照物体毎にフィルタを用意していたのでは不経済である。

そこで本章では、パターン認識の識別能力の向上のために多物体を認識できるフィルタの設計法を提案する。ここでいう多物体とは広義の意味で物体そのものの形状変化（回転、拡大、縮小など）も含むものとする。これまでに提案されている多物体認識の代表的なものを簡単に紹介したのち、本研究で考案した新しい手法を二つ示す。さらに、提案したフィルタの有用性を確認するために、ハイブリッドシステムを用いて実験を行なう。

§5-2 従来の多物体認識

これまでに提案されている代表的な多物体認識の手法を簡単に示し、それぞれの特徴を述べる。

§5-2-1 座標変換を利用した多物体認識

座標変換を用いて、大きさの変化や回転といった画像の一次変換に対して、その変化を位置の情報に変換し、認識が可能となるようにする手法がある。

大きさの変化に対しては、Casasentら^{55,56}は与えられた画像の座標 (x,y) を

$$\begin{aligned} u &= \log x \\ v &= \log y \end{aligned} \quad (5-1)$$

のように変換する手法を提案している。すなわち、参照物体 $f(x,y)$ 、テスト物体 $g(x,y)$ を新たに、 $f_M(u,v)$ 、 $g_M(u,v)$ と変換し、これらを用いて相関を得る方法である。特に、このような座標変換を受けてフーリエ変換されたものはメラン（Mellin）変換と呼ばれる。大きさが変化し、例えば、 x が ax となった場合には $u + \log a$ と変換され倍率は $\log a$ という位置ずれに置き換えられ、大きさの変化量もわかる。

回転に対しては、

$$\begin{aligned} u &= \tan^{-1} \frac{y}{x} \\ v &= \sqrt{x^2 + y^2} \end{aligned} \quad (5-2)$$

と変換し、回転角が位置ずれに置き換えられる⁵⁷。(5-1)式と(5-2)式とを組み合わせれば、倍率・回転の両方の変化にも対応できる処理が可能である⁵⁷。座標変換の方法には、計算機ホログラムや非線形TVスキニングを用いる方法、計算機そのものによる方法がある。

これらの座標変換は、倍率や回転の情報を位置ずれに換算するため、それらの変化量がわかるという長所を有するが、物体の位置が空間的に上下左右にずれた場合には適応できない。そこで、画像そのものを用いずに、一旦、スペースインヴァリアントであるフーリエパワースペクトルに変換し、それを新たな入力として用いる方法も提案されている⁵⁷。しかし、この場合はそのための光学系が新たに必要となり、系が複雑になる。

§ 5-2-2 関数展開を利用した多物体認識

回転に対しては不変で、しかも、位置ずれに対しても対応できる手法がArsenaultらによって示されたcircular harmonics expansionである^{12,13}。参照物体 $f(x,y)$ を次のように展開する。

$$f(r, \theta) = \sum_{M=-\infty}^{\infty} f_M(r) \exp(jM\theta), \quad (5-3)$$

ここで、

$$f_M(r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(r, \theta) \exp(-jM\theta) d\theta, \quad (5-4)$$

である。いま参照物体が α だけ回転した場合には、

$$f(r, \theta + \alpha) = \sum_{M=-\infty}^{\infty} f_M(r) \exp(jM\theta) \exp(jM\alpha), \quad (5-5)$$

となり、回転角の情報は位相の情報に変換される。実際には、ある一つの次数の M のみ用いられる。この展開は、すべて、計算機により行なわれる。さらに展開された関数は、複素数であるため、光学的にフーリエ変換することは事実上不可能である。そのため、フーリエ変換は計算機によって行なわれ、フィルタはCGHにて作成される。検出されるのは強度であるため、回転角の検出はできない。最近では、このようにして作成したフィルタをPOFとしたり、BPOFとしたりする研究も行なわれている^{14,15}。

§ 5-2-3 合成識別関数フィルタ

多物体を認識するフィルタの設計法として、認識すべき物体のフィルタから合成することは自然な考え方である。多物体を認識する通常のマッチトフィルタの設計法として、Hesterら⁵⁸によって開発された合成識別関数フィルタ (Synthetic Discriminant Function フィ

ルタ、以下SDFフィルタと略す)がある。

SDFは、各識別クラスに属するパターン (トレーニングセットと呼ぶ) を多数用意し、それらの線形和として表される。すなわち、 N 個のトレーニングセットを $g_i (i=1, 2, \dots, N)$ とすると、SDFを表す関数 f は次のように表される。

$$f = \sum_{i=1}^N a_i g_i. \quad (5-6)$$

フィルタ関数 f を求めるには、係数 a_i を求めなければならない。係数 a_i は、フィルタ関数 f と各トレーニングセット g_i とのあらかじめ設定された相関値 c_i から決定される。すなわち、

$$c_i = f^t \cdot g_i \quad (5-7)$$

を満足するように係数 a_i を決定する。係数 a_i と相関値 c_i をそれぞれベクトル a, c で表せば、係数ベクトル a は、

$$a = R^{-1} \cdot c \quad (5-8)$$

として求まる。ただし、 R はトレーニングセット g_i の相関行列で、各成分 r_{ij} は、

$$r_{ij} = g_i^t \cdot g_j \quad (5-9)$$

である。逆行列が存在する限り、いかなるトレーニングセットに対してもフィルタを設計することができる。ただし、相関関数そのものを決定しているのではなく、相関値のみを決定していることに注意が必要である。相関値 c_i の値によってSDFフィルタの名前が異なっている。Casasentら¹¹は、Equal Correlation Peak (以下ECPと略す) SDFフィルタ、Mutual Orthogonal Function (以下MOFと略す) SDFフィルタ、multilevel SDFフィルタ、K-tuple SDFフィルタの4種類に分類している。それぞれ、簡単な例を挙げて説明する。

1) ECP SDFフィルタ

すべての N 個のトレーニングセットに対して、相関値が1となるように設計したフィルタのことをECP SDFフィルタという。

$$c^t = \underbrace{(1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1)}_N. \quad (5-10)$$

2) MOF SDFフィルタ

クラス1のトレーニングセット N_1 個に対して、相関値が1となるようにフィルタ f_1

を, 相関値が0となるようにフィルタ f_2 を設計し, クラス2のトレーニングセット N_2 個に対して, 相関値が0となるようにフィルタ f_1 を, 相関値が1となるようにフィルタ f_2 を設計したときのそれぞれのフィルタのことをMOF SDFフィルタという.

$$c_1^t = (\underbrace{1\ 1\ 1\ \dots\ 1}_{N_1} \underbrace{0\ 0\ 0\ \dots\ 0}_{N_2}), \quad (5-11a)$$

$$c_2^t = (\underbrace{0\ 0\ 0\ \dots\ 0}_{N_1} \underbrace{1\ 1\ 1\ \dots\ 1}_{N_2}). \quad (5-11b)$$

3) multilevel SDFフィルタ

クラス k (全部で K クラス) のトレーニングセット (各 N_k 個) に対して, 相関値が k となるように設計したフィルタのことを multilevel SDFフィルタという.

$$c^t = (\underbrace{1\ 1\ 1\ \dots\ 1}_{N_1} \underbrace{2\ 2\ 2\ \dots\ 2}_{N_2} \dots \underbrace{K\ K\ K\ \dots\ K}_{N_K}). \quad (5-12)$$

4) K-tuple SDFフィルタ

例えば, 4クラス (h_1, h_2, h_3, h_4), 2フィルタ (f_1, f_2) の場合を考える. なお, k 番目のクラス h_k には, N_k 個のトレーニングセットが含まれているとする. 相関値がTable 5-1に従うように設計されたフィルタのことをK-tuple SDFフィルタという.

Table 5-1. K-tuple SDFフィルタの応答

	f_1	f_2
h_1	0	0
h_2	0	1
h_3	1	1
h_4	1	0

$$c_1^t = (\underbrace{0\ 0\ 0\ \dots\ 0}_{N_1+N_2} \underbrace{1\ 1\ 1\ \dots\ 1}_{N_3+N_4}), \quad (5-13a)$$

$$c_2^t = (\underbrace{0\ 0\ 0\ \dots\ 0}_{N_1} \underbrace{1\ 1\ 1\ \dots\ 1}_{N_2+N_3} \underbrace{0\ 0\ 0\ \dots\ 0}_{N_4}). \quad (5-13b)$$

今まで述べたSDFフィルタは, フィルタ関数 f をフーリエ変換してマッチトフィルタ (SDFマッチトフィルタと呼ぶことにする.) として用いられるのが一般的である. 第3章で述べたPOFやBPOFの技術を用いたSDFマッチトフィルタの研究もなされているが, それほど高い効果はない^{16,17}. そのため, 理想的な出力との差が小さくなるように反復法を用いてPOFやBPOFを設計する研究もなされている⁵⁹.

§ 5-3 多数決法による多物体認識フィルタの設計

ここでは多物体認識フィルタの設計法の一つとして多数決法による設計法^{60,61}を提案する. これは, BPOC (あるいは, BPOF) における, ECP-SDFマッチトフィルタの設計法の一つである. 以下に, 設計法, 計算機シミュレーション, 実験結果の順に述べる.

§ 5-3-1 設計法

トレーニングセットをSDFフィルタの例に倣い, g_i ($i=1, 2, \dots, N$)とする. そのフーリエ変換を2値化した, バイナリーインコヒーレントホログラムを B_i ($i=1, 2, \dots, N$)とする. すなわち, B_i は余弦変換 (もしくはハートレー変換と回転ハートレー変換の一方) を2値化したものを差す. B_i のとり得る値は, 0, または, 1である. 合成されたフィルタを B_s とすれば,

$$B_s = H[\sum_{i=1}^N \omega_i B_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \omega_i] \quad (5-14)$$

と書くことができる. ここで, $H[\cdot]$ はHevisideのステップ関数を表し, 次式で定義される.

$$H[x] = \begin{cases} 1 & \text{if } x \geq 0, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (5-15)$$

ω_i は重み係数である. 重み係数 ω_i の決定法として, 次に示す三つが考えられる.

- 1)すべてを1とする.
- 2)SDFフィルタの係数を用いる.
- 3)各トレーニングセットのエネルギーを規格化した後のSDFフィルタの係数を用いる.

それぞれの理由としては,

- 1)もっとも簡単である,
- 2)ECP-SDFは効果がある,
- 3)トレーニングセットのフーリエ変換を2値化した時点で, エネルギーが規格化されていると考えられる,

からである.

§ 5-3-2 多数決法

前述の3種類とECP-SDF-BPOFを用いてBPOCを求め, 得られたシミュレーション結果を示す. ECP-SDF-BPOFは比較のために掲げる. このフィルタはECP-SDFを設計した

後、フーリエ変換を2値位相化したものであり、他の三つとは設計法が全く異なっていることに注意が必要である。相関を求める手法としては、第3章で提案したハートレー変換による方法を用いた。トレーニングセットとして、Figs. 5-1に示す4種類の字体のアルファベットの「a」を用いた。各フィルタの設計に用いた重み係数をTable 5-2に示す。



Fig. 5-1. トレーニングセット

Table 5-2. 重み係数

	case 1	case 2	case 3	case 4
c_1	1.00	4.03	1.34	4.03
c_2	1.00	1.59	1.43	1.59
c_3	1.00	-1.06	0.83	-1.06
c_4	1.00	3.57	1.67	3.57
c_5	1.00	4.78	1.06	4.78

テストパターンとしては、Fig. 5-2に示す16種類の文字（内、4つは「a」）を用いた。画像全体の画素数は 256×256 、1つの文字が占める画素数は 64×64 である。扱った画像は、2値画像である。もちろん、濃淡画像でも同様の処理を行なうことができる。4種類の設計法による結果をFigs. 5-2に示す。相関面をそれぞれの最大値で規格化したものを3次元的にプロットしたものである。これらは、それぞれTable 5-2に示した(a) case 1, (b) case 2, (c) case 3による係数を用いてフィルタを設計したものと(d)ECP SDF-BPOFである。



Fig. 5-2. フィルタ設計のための係数を決定するために用いた画像

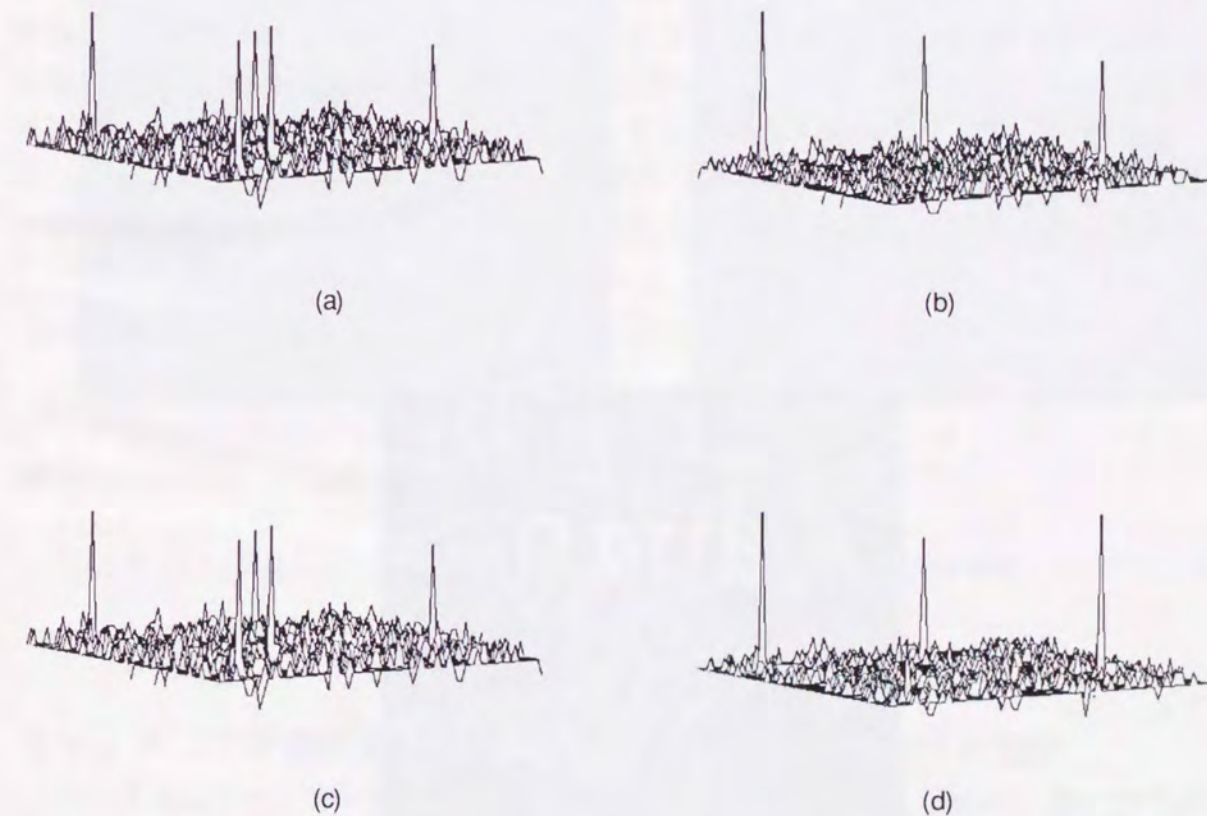


Fig. 5-3. さまざまな係数による相関関数の形状：(a)すべて1；(b)SDFフィルタの係数；
(c)規格化した後のSDFフィルタの係数；(d)ECP SDF-BPOF
(計算機シミュレーションの結果)

以上の計算機シミュレーションにより、係数 ω_i は1,あるいは各トレーニングセットのエネルギーを規格化した後のSDFフィルタの係数にすればよいことが明らかになった。設計の簡便さからは、1とするほうが望ましい。 ω_i がすべて1に等しいとき(5-14)式は

$$B_s = H\left[\sum_{i=1}^N B_i - \frac{1}{2}N\right] \quad (5-16)$$

となり、結局これは、各トレーニングセットのバイナリーインコヒーレントホログラムの各画素の状態(0または1)の多いほうに多物体認識フィルタの画素の値が決定されるということである。すなわち、多数決によって決定されるわけである。このような多物体認識フィルタの決定法を多数決法と呼ぶことにする。

§5-3-3 実験結果

計算機シミュレーションによって多数決の有用性が示された。そこで、ハイブリッドシステムによる実験を行ない、その有用性を確認する。実験システムは§3-3-2で示したシステムを用いた。参照物体には、2種類の「a」を用いた。これらのバイナリーインコヒーレントホログラムを光学的に求めた後、(5-16)式に従い、多物体認識フィルタを設計した。テスト物体にはFig.5-4に示す4種類の文字を用いた。Figs.5-5に結果を示す。それぞれ、(a)2種類の「a」、(b)活字体の「a」、(c)筆記体の「a」の認識結果である。(a)は多数決法によって2種類の文字を認識するように設計したフィルタを用いたもの、(b)と(c)はそれぞれの字体のみから作成したフィルタを用いたものである。これらの結果から実験的にも多数決法による多物体認識フィルタの設計法の有用性が明らかになった。



Fig.5-4. 多数決フィルタの有用性を確認するために用いたテスト物体



(a)



(b)



(c)

Fig.5-5. ハイブリッドシステムによる実験結果：(a) 筆記体、活字体の同時認識；(b) 活字体の認識；(c) 筆記体の認識

§5-4 二乗誤差最小化法による多物体認識フィルタの設計

多数決法は設計手順が極めて簡単であるという特徴を持っているが、検出すべきでないパターン(非検出パターンと呼ぶ)の相関値を抑制することはできない。特に、非検出パターンが検出パターンと形状が比較的似ている場合、所望の出力を得ることが困難であることは容易に予想される。そこで、設計手順は複雑にはなるが、より高度なフィルタの設計法について述べる。

§5-4-1 評価関数の決定

作成するフィルタとトレーニングセットとの相関値と、予め設定した値（目標値と呼ぶ）との残差が小さくなるようにフィルタを作成すれば、識別能力の高いフィルタを設計することができる。Kimら⁶²は、文字「P」, 「R」を識別するBPOFを設計する際に、

$$E = (H_A - AC[P, P])^2 + (H_A - AC[R, R])^2 + (H_C - CC[P, R])^2 + (H_C - CC[R, P])^2, \quad (5-17)$$

という評価関数を導入している。ここで H_A , H_C はそれぞれ自己相関、相互相関の目標値であり、 H_A は H_C よりもじゅうぶんに大きい。また、 $AC[\cdot, \cdot]$ は自己相関値、 $CC[\cdot, \cdot]$ は相互相関値である。それぞれ括弧内の右側が入力、左側が設計するBPOFを表している。すなわち、この手法は文字「P」, 「R」に対するBPOFをそれぞれ作成することを考えており、MOF-SDF-BPOFの一種と考えることができる。評価関数 E を最小にするフィルタが、求めるフィルタである。

著者は、この評価関数を基に、より一般的に拡張したマルチレベル問題に適用できる次のような評価関数を導入することを提案する^{60,61}。

$$E = \sum_{k=1}^K \left(\sum_{i=1}^{N_k} (P_k - C[FG_{ki}])^2 \right). \quad (5-18)$$

ここで、 P_k はレベル k ($k=1, 2, \dots, K$) に対する目標相関値、 G_k はレベル k に属する第 i 番目 ($i=1, 2, \dots, N_k$) のバイナリーインコヒーレントホログラム（トレーニングバイナリーインコヒーレントホログラムセットと呼ぶ）である。 F は設計するバイナリーフィルタ（BPOF）であり、 $C[\cdot]$ は相関値を表す演算子である。

§5-4-2 サイドローブの問題

前節で述べた評価関数は、SDFフィルタと同様に相関値（中心ピーク）しか考慮していない。特に非検出パターンの場合には、中心ピークの値を小さく抑え込んだために隣の画素へ移動してしまうという恐れが生じる。この隣へ移動したピークをサイドローブと呼ぶことにする。サイドローブが生じた場合には、隣の画素に検出パターンが存在すると判断されて、これでは、正しいフィルタとして働いているとはいえない。そこで、サイドローブを抑えるために次のような方法を提案する^{60,61}。すなわちFig. 5-6に示すように、もとの画像の8近傍の画素を中心とする新たな八つの画像を用意する。それらについてもバイナリーインコヒーレントホログラムを用意し、トレーニングバイナリーインコヒーレントホログラムセットとして用いる。都合、一つのパターンに対して九つのトレーニングバイナリーインコヒーレントホログラムセットが用意されることになる。本手法をサイドローブ・リダクションと呼ぶ。

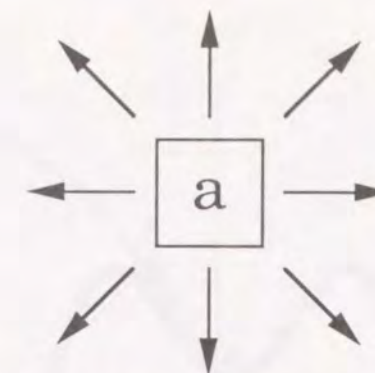


Fig. 5-6. サイドローブを抑えるための新たな八つの画像

§5-4-3 シミュレーティッド・アニーリングによる解法

先に述べた評価関数を最小にするフィルタを求めるということは、最適化問題を解くことに等しい。そこで、最適化問題を解くための有力な手段であるシミュレーティッド・アニーリングのアルゴリズムについて簡単に説明する。いま、最適化問題で対象となっている関数を x 、その目標とする未知の関数を x_0 と仮定する。この目標関数 x_0 を求める手続きは次のようになる。

1) 目標とする値と x による出力の差の二乗和で表される評価関数 E を決める。

2) 評価関数を最小にする関数 x_0 を求める。

一般に評価関数はFig. 5-7に示すように多数の極小値を持つ。最小値でない極小値のことをlocal minimumという。評価関数が最小となるような x_0 を求める際に、評価関数が減少する方向にのみ、 x を変化させる場合を考える。例えば初期状態がFig. 5-7のAのような場合には、評価関数がlocal minimumの状態Bに陥ってしまい、そこから抜け出すことはできない。すなわち、最小にする x_0 を求めることができない。しかし、シミュレーティッド・アニーリングのアルゴリズムを用いると、local minimumに留まらずに未知の目標関数 x_0 とはほぼ同じ関数 x_0' を求めることができる。シミュレーティッド・アニーリング法では、評価関数が増えるような x の変化においても、ある確率でその変化を認めるからである。すなわちBの状態から抜け出し、Cのような状態になることができる。これが、シミュレーティッド・アニーリングの大きな特徴である。この確率は、目標関数に対して逆の方向への状態変化を認める確率である。今後この確率を、逆の状態変化をする確率と呼ぶことにする。評価関数の変化量を ΔE で

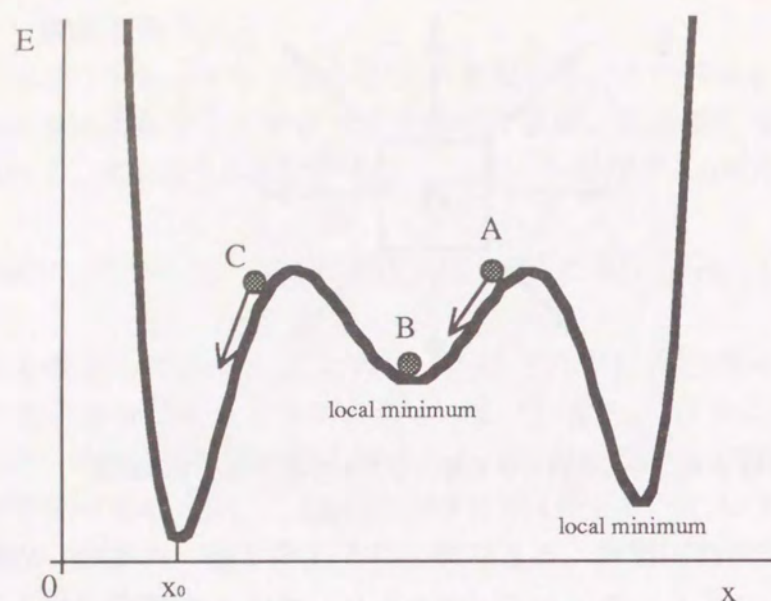


Fig. 5-7. 一般的な評価関数

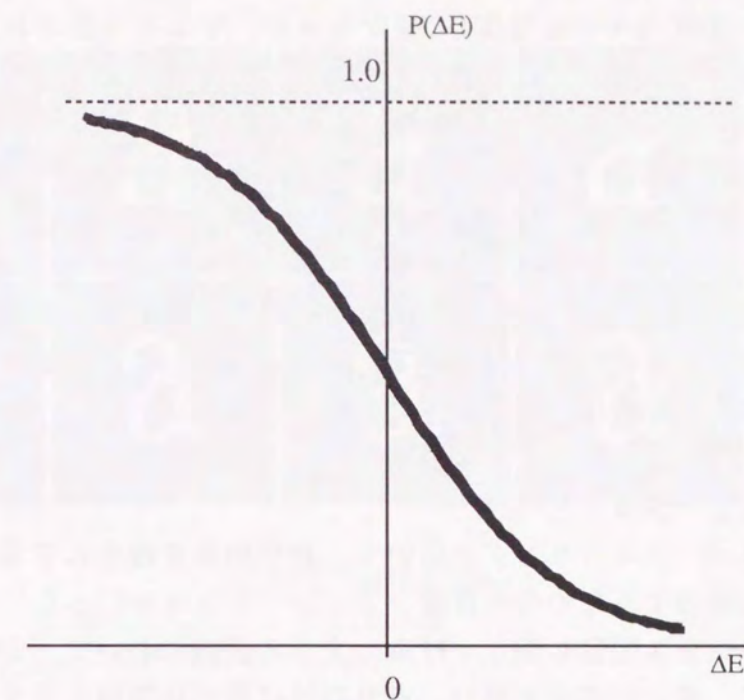
表すと、一般に逆の変化をする確率 $P(\Delta E)$ は、

$$P(\Delta E) = \frac{1}{1 + \exp(\Delta E/T)} \quad (5-19)$$

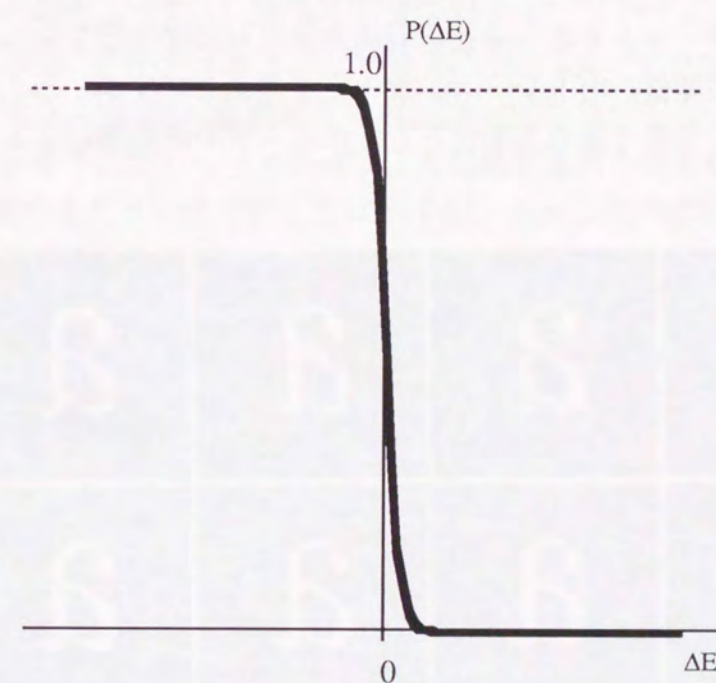
で与えられる。ここで、 T は温度と呼ばれる変数である。温度 T は、最初のうち大きい値を持ち、徐々に小さくなって、最後には0に収束するような特性を持つ関数であればよい。本論文では次式で表されるような温度 T を使用する。

$$T = \frac{T_0}{\log(n+1)}, \quad (5-20)$$

ただし、 n はシミュレーテッド・アニーリングの繰り返し回数、 T_0 は初期温度である。



(a)



(b)

Fig. 5-8. 温度が確率に与える影響：(a)温度 T の値が大きいとき；(b)温度 T の値が小さいとき

この温度 T が確率 $P(\Delta E)$ に与える影響は、Figs. 5-8に示すように、同じ ΔE に対しても逆の状態変化をする確率が、温度 T の値が大きいときは大きく、温度 T の値が小さいときは小

さい。したがって、最初のうちは温度 T の値が大きい、すなわち逆の状態変化をする確率が大きいため、local minimum に陥ったとしても抜け出すことができる。もちろん、これらは、 ΔE が正のときの議論であり、負のときは無条件にその変化を受け入れる。この処理を何回も繰り返していくうちに、評価関数は local minimum から脱出し最小値付近の状態になる。そのころには、繰り返し回数 n の増加にともない温度 T が小さくなっているため、逆の状態変化をする確率も小さくなっている。温度 T の値が0になる極限の状態では、逆の状態変化をする確率が0になるので、充分時間をかけて温度を減少させていけば評価関数が最小となる状態で収束する。このようにして評価関数を最小にする関数を求めることができ、最適化問題を解くことができる。

a 計算機シミュレーション

シミュレーティッド・アニーリングを用いて、評価関数を最小にするフィルタを設計することの有用性を確認するための計算機シミュレーションを行った。

簡単のために、2クラス問題を取り上げる。文字の認識において、ある角度内の回転は許容範囲内として、高い相関値を示し、それ以外は低い相関値を示すという問題を想定する。Fig. 5-9に示す、 ± 5 度の範囲で回転させた文字「a」を検出パターンとする。それぞれのバイナリーインコヒーレントホログラムがレベル1（高い相関値）のトレーニングセットである。Fig. 5-10に示す、 ± 10 度の範囲（ ± 5 度の範囲は除く）で回転させたものを非検出パターンとする。それぞれのバイナリーインコヒーレントホログラムがレベル2（低い相関値）のトレーニングセットである。文字一つの大きさは、 64×64 画素である。なお、相関を求める手法としてはハートレー変換による方法を用いた。

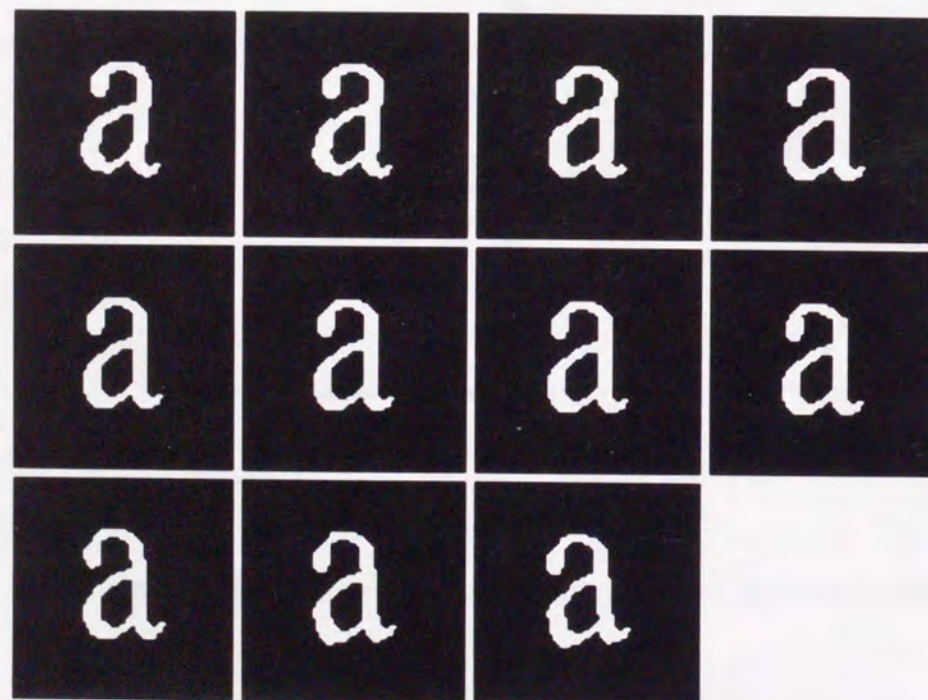


Fig. 5-9. 検出パターン

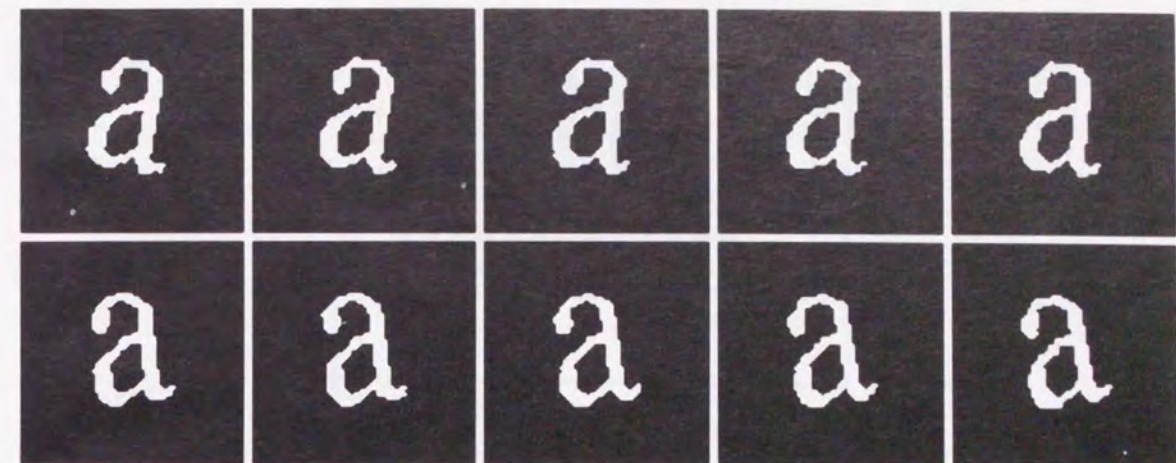


Fig. 5-10. 非検出パターン

計算機シミュレーションによりBPOCを求めた結果をFigs. 5-11に示す。それぞれ、(a)0度回転した「a」との相関値、(b) ± 5 度の範囲のバイナリーインコヒーレントホログラムを用いて多数決法によって設計したフィルタとの相関値、(c)2クラス問題用に設計したフィルタとの相関値である。なお、シミュレーティッド・アニーリングの初期温度は1.0、繰り返し回数は100回である。(a)の図からは、BPOCの識別能力の高さを表しており、このままでは、 ± 5 度の範囲の文字の認識には利用できないことがわかる。そこで、多数決法によって設計したフィルタによる相関を求めた結果が(b)の図である。確かに、 ± 5 度の範囲では大きい値を示しているが、それ以外の非検出パターンのところでも比較的大きな値を示している。ところが、(c)の図では、 ± 5 度の範囲において大きな相関値を示し非検出パターンのところでは小さな値を示しており、シミュレーティッド・アニーリングを用いて設計したフィルタの有用性が示されている。特に、多数決法を用いて設計したフィルタには見られなかった非検出パターンを抑える効果が現われているのがわかる。

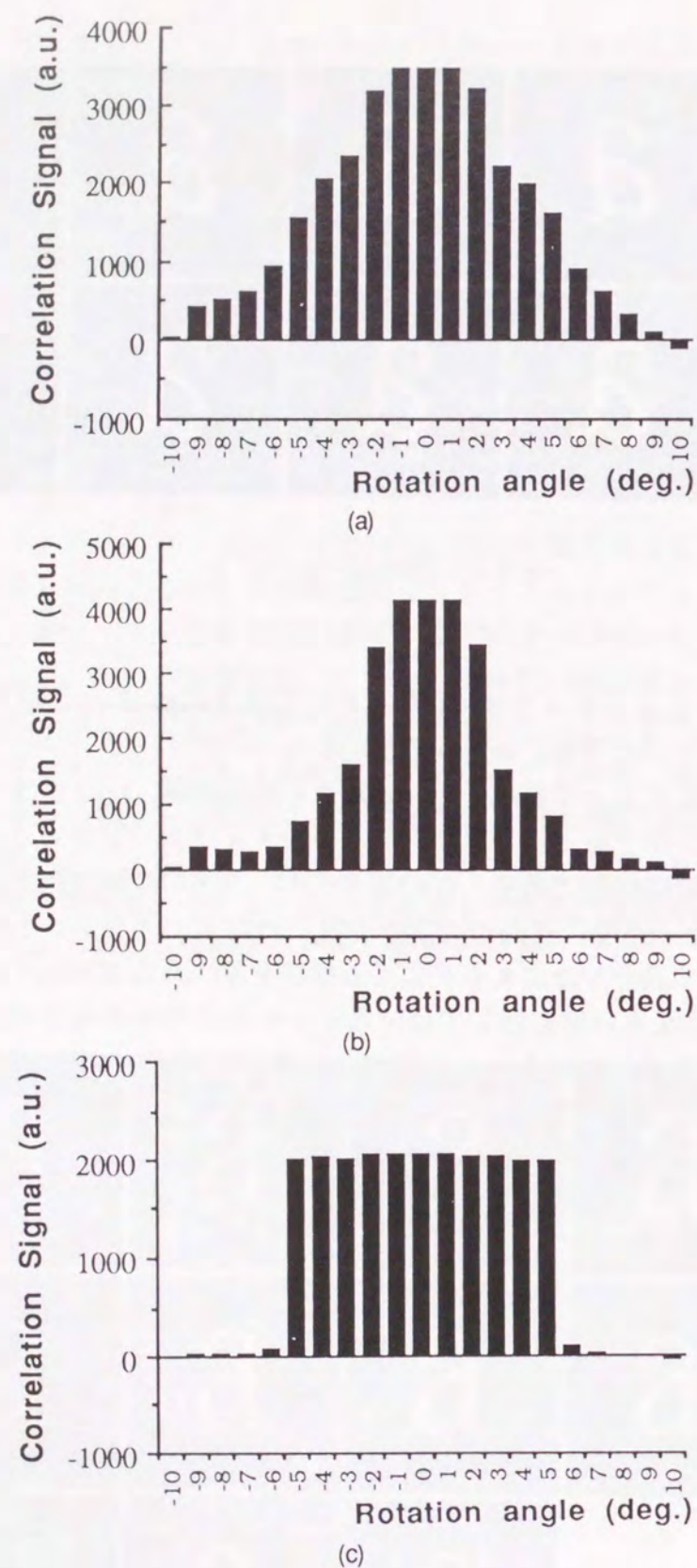


Fig.5-11. さまざまなフィルタとの相関値の比較：(a)回転角0度の文字から作成したフィルタ；(b)多数決法により作成したフィルタ；(c)二乗誤差最小化法により作成したフィルタ
(計算機シミュレーションの結果)

次に、サイドローブ・リダクションの有用性を確かめるために、サイドローブ・リダクションを行なったものと、行なっていないものとの比較を行なった結果をFigs. 5-12に示す。非検出パターンである6度回転した「a」の中心ピークから1画素隣の断面図である。(a)では見られていたサイドローブが(b)では抑えられており、サイドローブ・リダクションの効果があることがわかる。

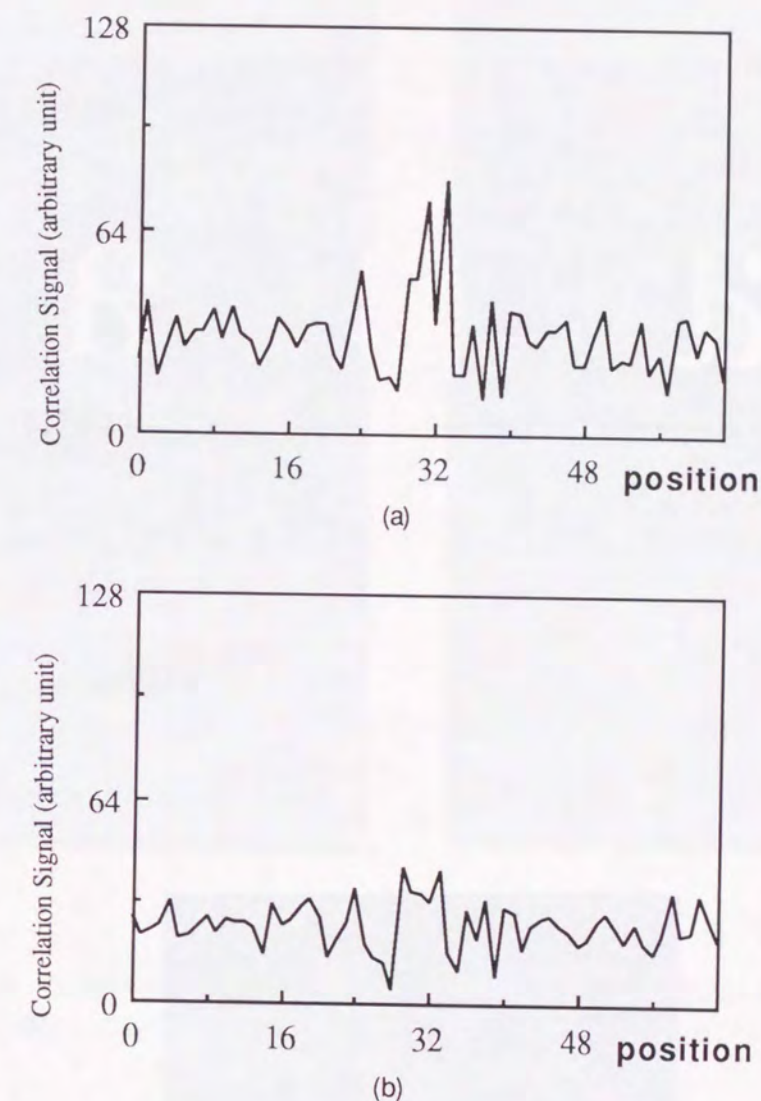


Fig.5-12. サイドローブの抑制効果：(a)サイドローブ・リダクションなし；
(b)サイドローブ・リダクションあり（計算機シミュレーションの結果）

b 実験結果

二乗誤差最小化法による多物体認識フィルタをシミュレーティッド・アニーリングによって設計したフィルタを用いて、ハイブリッドシステムで実験した結果を示す。実験システムは§ 3-3-2に示したシステムを用いた。

例として2クラス問題を想定する。検出パターン、非検出パターンを、それぞれFigs.

5-13に示す。テスト物体として検出パターン、非検出パターンからなるFig. 5-14に示す画像を用いた。画素数は 256×256 である。Figs. 5-13に示す画像からそれぞれ、光学系にてバイナリーインコヒーレントホログラムを作成し、それらをトレーニングセットとしてフィルタを設計した。ただし、サイドローブ・リダクションは行なわなかった。検出パターンのみのフィルタによる相関出力と設計したフィルタによる出力をFigs. 5-15に示す。

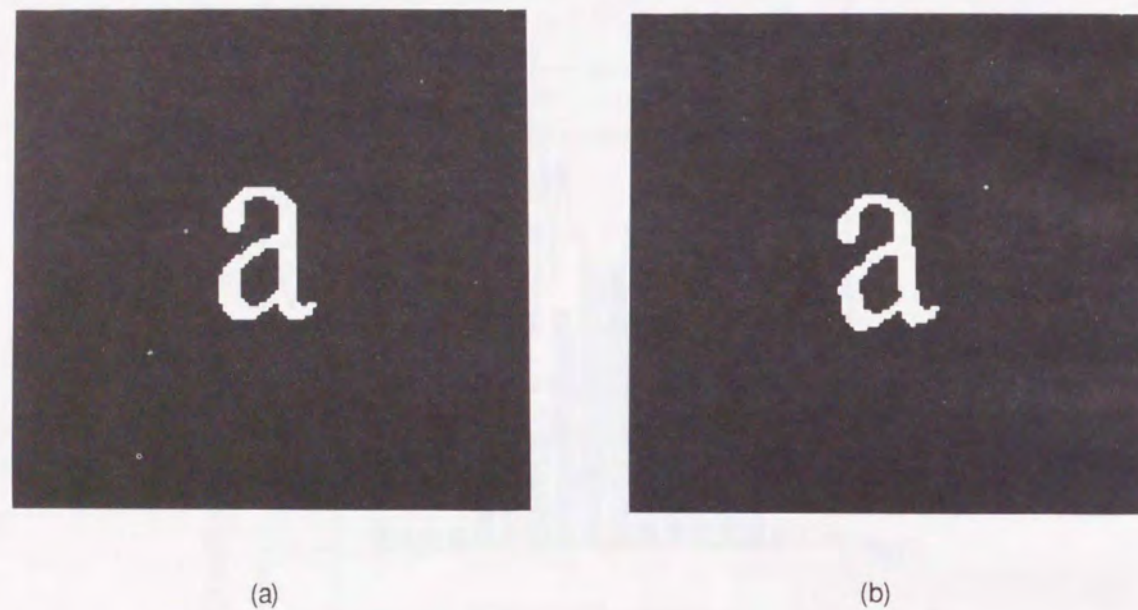


Fig. 5-13. (a)検出パターンと(b)非検出パターン

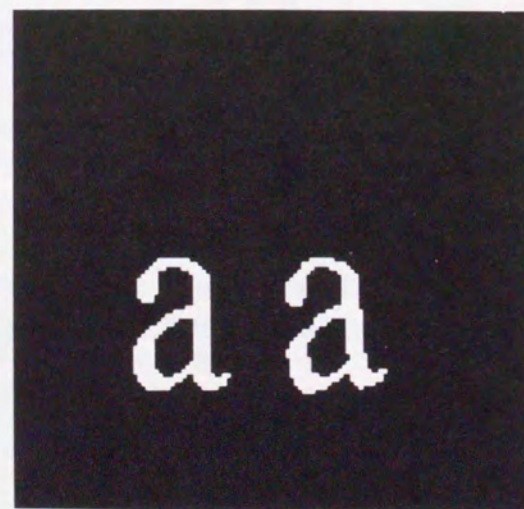


Fig. 5-14. テスト物体

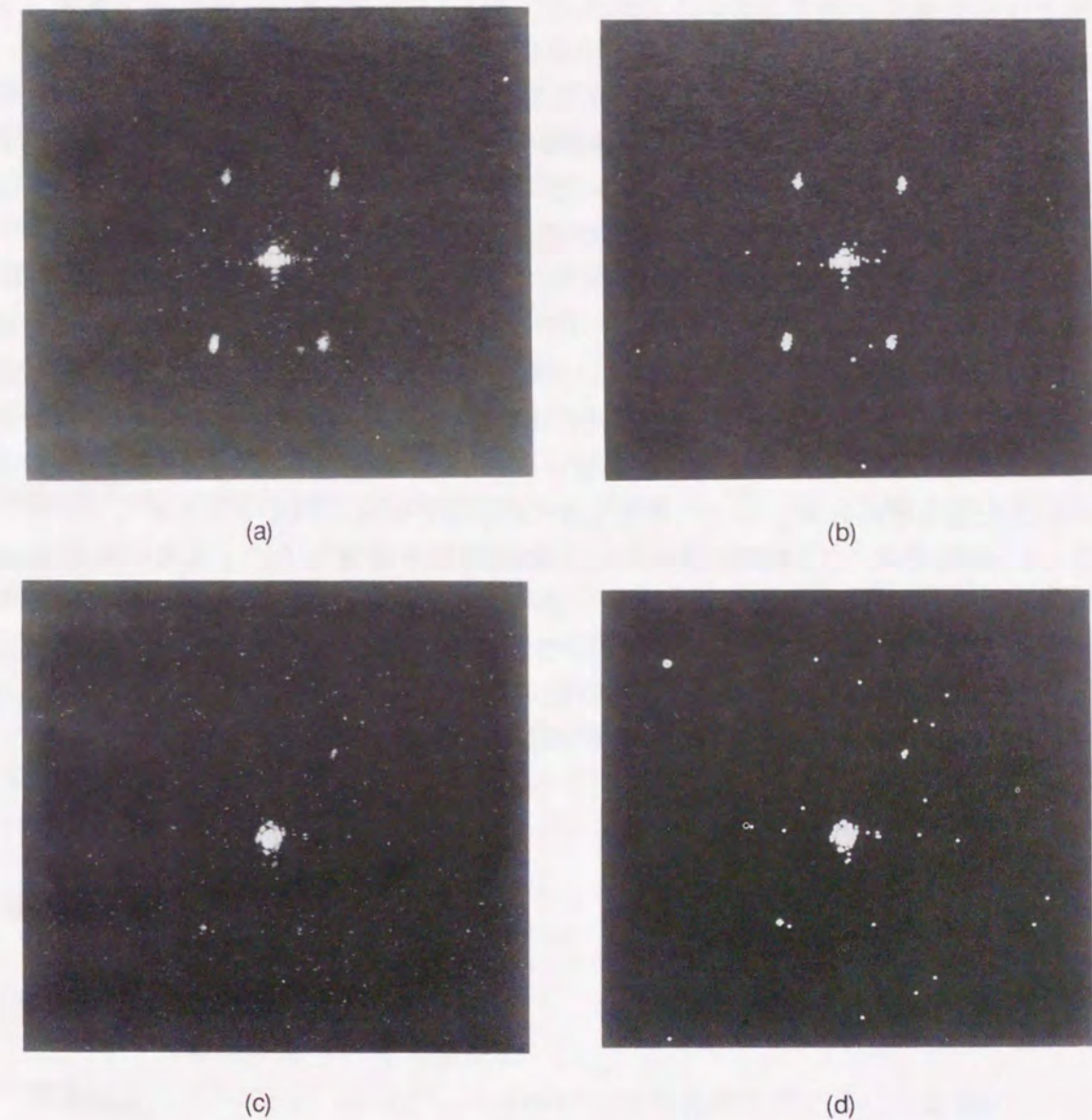


Fig. 5-15. 相関出力：(a)検出パターンから作成したフィルタとの相関；(b)検出パターンから作成したフィルタとの相関を2値化したもの；(c)設計したフィルタとの相関；(d)設計したフィルタとの相関を2値化したもの（ハイブリッドシステムによる実験結果）

ノイズがある程度含まれてはいるが、検出パターンのみから作成したフィルタでは現われていた、5度回転した文字の相関（右下の輝点）が設計したフィルタでは消えているのがわかる。すなわち、二乗誤差最小化法によるフィルタを設計することの効果が現われていることがわかる。なお、いずれの画像にも見られる画面中央の輝点はバイナリーインコヒーレントホログラムどうしの積をCRTに表示する際に加えたバイアスによるものである。ノイズの原因としては光学系の調整不足、光学素子の位相誤差などが考えられる。これらの影響を避ける一つの方法としては光学系そのものを用いたシミュレーション・アニーリングを行なうことが挙げられる。

§ 5-5 結言

本章では多物体を認識するという見地から、新しいフィルタを合成する手法を二つ提案した。そのため、従来からある手法を簡単に紹介し、それらの問題点を指摘した。

簡単な処理にもかかわらず、比較的良好な結果が得られる多数決法と、さまざまな要求に応じたフィルタを設計し得る二乗誤差最小化法を提案した。そして、提案した手法の有効性を計算機シミュレーション、ハイブリッドシステムによる実験の両面から確認した。二乗誤差最小化法は、最適化問題を解くことに等しく、シミュレーテッドアニーリングを用いて解くことを試みた。バイナリーインコヒーレントホログラムを用いた場合には、評価関数の変数が0, または, 1であるため, 0-1 整数計画問題⁶³に帰着することができる。0-1 整数計画法を用いて解を求めることができれば, 評価関数の能力を明らかにすることができる。(5-18)式におけるトレーニングバイナリーインコヒーレントホログラムセットをトレーニングセットのフーリエ変換に置き換え, それに適するように式を書き改めれば, より一般的なBPOFの設計にも応用できるものと思われる。

しかし, 本章では, (5-18)式で表わされる評価関数を提案したが, この評価関数が必ずしも最適であるとはいえない。例えば, (5-18)式以外に, 2クラス問題に対するフィルタの設計法としてエントロピーを利用したものが提案されている⁶⁴。一般に, より高性能な評価関数を設定することは, 計算時間の増加を招くことに直結するため, 処理の要求に応じて適切な評価関数を設定する必要があると考えられる。

総 括

本論文では, インコヒーレント光学系とデジタル電子処理系とを組み合わせた画像認識システムの構築を提案し, 試作し, 実験的な評価を行なった。本研究で得られた成果を以下, 各章毎に総括し, 今後の研究課題について考察する。

第1章では, 相関関数を用いたパターンマッチングについて述べた。まず, フーリエ変換を用いたパターンマッチングについて概説した。インコヒーレント光学系を用いることの長所を述べ, インコヒーレント光学系で画像のフーリエ変換を得るのに不可欠なシアリング干渉計について詳述した。さらに, 対象となる画像光源がスペクトル分布を持つときのフーリエ変換に及ぼす影響について考察し, スペクトルの半値幅を狭くする, または, 波長依存性をなくす必要があることを示した。

第2章では, 光学的余弦変換を用いたハイブリッドパターンマッチングの手法を提案し, 余弦変換を用いてパターンマッチングを行なう新しいアルゴリズムを提案した。すなわち, 余弦変換を用いて画像の相関関数を求めることができることを示した。ただし, 画像の相関関数以外にコンボリューションや座標の符号の反転した物体どうしの相関関数やコンボリューションが得られるため, 参照物体とテスト物体の配置に注意する必要があることを説明した。次に, シアリング干渉計で得られるインコヒーレントホログラムを2値化し, バイナリーインコヒーレントホログラムとすることを提案し, その有用性について述べた。バイナリーインコヒーレントホログラムを用いることで, 次のような点で有利となることを明らかにした。

相関関数を求めるという観点から

- 1) バイナリーインコヒーレントホログラムを用いる方法は, 自己相関ピークのみを強調する。

ハイブリッドシステムとしての観点から

- 2) インコヒーレントホログラムを用いて相関関数を求めるのに必要なバイアスの除去・乗算・バイアスの付加といった一連の処理と等価な処理が, 2値論理演算のEquivalentで行なうことができる。
- 3) 参照物体のバイナリーインコヒーレントホログラムの方が, インコヒーレントホログラムよりも画像処理装置の占有するメモリが少ない。
- 4) バイナリーインコヒーレントホログラムどうしの積を表示する場合の方が, インコヒーレントホログラムどうしの積を表示する場合よりも, 要求されるCRTのダイナミックレンジは遥かに小さい。2レベルの輝度が表示できればよいからである。

実験システムを試作し, その性能評価のための実験を行なった。最後にパターンマッチングの実験を行ない提案したアルゴリズム, バイナリーインコヒーレントホログラムの有用性の確証を得た。処理速度を純デジタル処理と比較し, 画素数がある程度以上になると, 提案したハイブリッドシステムは, 純デジタル計算機よりも高速に相関演算を行なうことができることを示した。例えば, 512×512 画素の場合, 数倍から数百倍速

く処理が行なえることを示した。

第3章では、ハートレー変換を用いたパターンマッチングの新しいアルゴリズムを提案し、試作システムにおいて実験を行なった。ハートレー変換を用いれば余弦変換を用いたパターンマッチングの際に生じていた次のような不要な信号が除去できることを計算機シミュレーション、および、ハイブリッドシステムによる実験の両面から示した。

- 1) 参照物体とテスト物体のコンボリューション。
- 2) 参照物体の180度回転したものテスト物体との相関関数。
- 3) 座標の符号の反転した物体どうしの相関関数やコンボリューション。
- 4) 光軸上に生じるデルタ関数上のピーク。

第4章では、バイナリーインコヒーレントホログラムを用いたパターンマッチングを相関関数の尖鋭化という観点から整理し、バイナリーインコヒーレントホログラムを用いたパターンマッチングが、2値フーリエ位相相関となっていることを示した。そして、従来の相関法との比較を行ない、その認識能力が飛躍的に向上していることを計算機シミュレーションによって示した。従来の相関法と比較して自己相関対相互相関比で3倍から4倍、自己相関関数の半値面積で5倍から400倍の識別能力の向上が見られた。さらに、2値フーリエ位相相関の問題点を指摘し、その解決策の一つとして、テスト物体のフーリエ変換を3値化する準2値フーリエ位相相関を提案した。2値フーリエ位相相関、準2値フーリエ位相相関を偏光素子を用いて実行する方法を提案した。2値フーリエ位相相関は処理が簡単であるため、ハイブリッド処理のみならず、純デジタルな処理系にも応用することができる。また、ハードウェア化することも容易である。

第5章ではシステムの性能向上のため多物体認識フィルタの設計方法を新たに二種、提案した。簡単な処理にもかかわらず、比較的良好な結果が得られる多数決法、および、任意の相関値を得ることができる二乗誤差最小化法である。二乗誤差最小化法に対しては、サイドローブを抑制する方法を新たに提案した。提案した多数決法、および、二乗誤差最小化法、それぞれについて、計算機シミュレーション、および、ハイブリッドシステムによる実験の両面から、その有用性を示した。

本論文では、識別能力の高い相関法である2値フーリエ位相相関を提案した。2値フーリエ位相相関の識別能力の高い理由を第4章で説明した。しかし、第4章の説明では充分であるとはいえない。物体のフーリエ変換に対して非線形な処理である2値化処理を施しているため、厳密な解析は困難であると思われる。しかしながら、何らかの形で、解析的に2値フーリエ位相相関の高い識別能力を説明する必要があると思われる。あるいは、数多くの画像に対して、画像に雑音加わった場合も含めて、2値フーリエ位相相関の識別能力を調べる必要もあると思われる。

識別能力の評価は計算機上で行なったが、実際には光学系を用いた実験結果を用いて比較を行なう必要がある。試作システムでは、光学素子の位相誤差などのためにノイズが多いものとなっている。位相誤差の除去法の確立が必要であり、どの程度まで光学素子の位相誤差の排除が可能であるかが課題として残されている。位相誤差を排除したうえでハイブリッドシステム上での識別能力の評価が必要である。

提案したインコヒーレント光／電子複合型画像認識システムは、余弦変換を用いてパターンマッチングを行なう場合には、基本的には駆動部を必要としない。そのため、ビームスプリッタとプリズムが一体となったコンパクトな干渉計⁶⁵を用いれば、より実用的なものとなるであろう。

謝 辞

本論文は、大阪大学工学部応用物理学科において、一岡芳樹教授のご指導の下に行なった研究をまとめたものである。終わりに臨み、終始懇切丁寧なご指導、ご鞭撻を賜りました一岡芳樹教授に心から感謝の意を表します。

実際の研究の遂行から、論文の作成に至るまで、終始、貴重なご教示と温かいご助言を賜りました本学工学部伊東一良助教授に心から厚く御礼申し上げます。

本学工学部南茂夫教授には、本論文作成にあたりご検討いただきました。ここに深く御礼申し上げます。

本学工学部助手谷田純博士には、研究者の先輩として、貴重なご助言をいただきました。心より感謝いたします。同助手井上卓氏には、良き友人として、多大なご協力をいただきました。厚く感謝いたします。

学部・前期課程の3年間の研究生活はもちろん、その後も、よき仲間として温かいご助言、ご鞭撻をいただいた中川純氏（現、コニカ株式会社）、林篤司氏（現、東燃システムプラザ株式会社）、藤原紳吾氏（現、株式会社オージー情報システム総研）に深く感謝いたします。特に、林篤司氏には、C言語のプログラミングのいろはを丁寧にご教示いただきました。本論文の画像の写真を撮影する際には、すべて、彼の作成したソフトウェアを使用させていただきました。ここに記し、感謝の意を表わします。

一岡研究室の張偉氏には、同じドクターコースに在籍し、日頃から、良き友人として、ご助言などをいただきました。厚く御礼申し上げます。同、長瀬隆光氏には、第5章の計算機シミュレーションを行なう際に、多大なご協力をいただきました。厚く感謝いたします。

最後に本研究を遂行するに当たり、さまざまな形でご協力、ご援助、ご鞭撻いただいた研究室内外の友人たちに感謝いたします。

参考文献

1. "知識ビークルシステムに関する調査研究報告書," 財団法人機械システム振興協会 (1986).
2. "身体情報を用いた個人照合装置," 日経エレクトロニクス, No. 464, 171-177 (1988).
3. J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics* (McGraw-Hill, San Francisco, 1968).
4. 辻内順平, 一岡芳樹, 峯本工, *光情報処理* (オーム社, 1988).
5. A. B. VanderLugt, "Signal Detection by Complex Filters," *IEEE Trans. Inf. Theory* **IT-10**, 139-145 (1964).
6. C. S. Weaver and J. W. Goodman, "A Technique for Optical Convolving Two Functions," *Appl. Opt.* **5**, 1248-1249 (1966).
7. J. E. Rau, "Detection of Differences in Real Distributions," *J. Opt. Soc. Am.* **56**, 1490-1494 (1966).
8. J. L. Horner and P. D. Gianino, "Phase-Only Matched Filtering," *Appl. Opt.* **23**, 812-816 (1984).
9. J. L. Horner and J. R. Leger, "Pattern Recognition with Binary Phase-Only Filter," *Appl. Opt.* **24**, 609-611 (1985).
10. D. Psaltis, E. G. Paek, and S. S. Venkatesh, "Optical Image Correlation with a Binary Spatial Light Modulator," *Opt. Eng.* **23**, 698-704 (1984).
11. D. Casasent, W. Rozzi, and D. Ferrerly, "Projection Synthetic Discriminant Function Performance," *Opt. Eng.* **23**, 716-720 (1984).
12. Y.-N. Hsu, H. H. Arsenault, and G. April, "Rotation-Invariant Digital Pattern Recognition Using Circular Harmonic Expansion," *Appl. Opt.* **21**, 4012-4015 (1982).
13. Y.-N. Hsu and H. H. Arsenault, "Optical Pattern Pattern Recognition Using Circular Harmonic Expansion," *Appl. Opt.* **21**, 4016-4019 (1982).
14. L. Leclerc, Y. Sheng, and H. H. Arsenault, "Rotation Invariant Phase-Only and Binary Phase-Only Correlation," *App. Opt.* **28**, 1251-1256 (1989).
15. H. F. Yau and C. C. Chang, "Phase-Only Circular Harmonic Matched Filtering," *Appl. Opt.* **28**, 2070-2074 (1989).
16. J. L. Horner and P. D. Gianino, "Applying the Phase-Only Filter Concept to the Synthetic Discriminant Function Correlation Filter," *Appl. Opt.* **24**, 851-855 (1985).
17. A. Dahdouh, W. J. Hossack, and R. E. Burge, "Properties of Computer-Generated, Phase-Only Synthetic Discriminant Filters," *J. Phys. D: Appl. Phys.* **22**, 500-504 (1989).
18. B. Javidi and C.-J. Kuo, "Joint Transform Image Correlation Using a Binary Spatial Light Modulator at the Fourier Plane," *Appl. Opt.* **27**, 663-665 (1988).
19. A. D. Fisher, "Spatial Light Modulators: Functional Capabilities, Applications, and Devices," *Int. J. Optoelectronics*, **5**, 125-167 (1990).
20. J. Tanida and Y. Ichioka, "Optical Logic Array Processor Using Shadowgrams," *J. Opt.*

- Soc. Am. **73**, 800-809 (1983).
21. M. Taniguchi, K. Matsuoka, and Y. Ichioka, "Hybrid Associative Memory Using an Incoherent Correlation System," Jpn. J. Appl. Phys. **29**, L1843-L1845 (1990).
 22. "特集：最近の画像処理システム," Oplus E, No. 120, 78-147 (1989).
 23. 一岡芳樹, "ハイブリッド画像処理," 日本写真学会誌 **49**, 273-281 (1986).
 24. T. Minemoto and K. Hara, "Hybrid Pattern Recognition by Features Extracted from Object Patterns and Fraunhofer Diffraction Patterns: Development of a More Useful Method," Appl. Opt. **25**, 4065-4070 (1986).
 25. F. T. S. Yu, S. Jutamulia, T. W. Lin, and D. A. Gregory, "Adaptive Real-Time Pattern Recognition Using a Liquid Crystal TV Based Joint Transform Correlator," Appl. Opt. **26**, 1370-1372 (1987).
 26. 清水勲, 浅川修一郎, 亀丸俊一, "マッチトフィルタの多重化とそれを用いた複数の物体形状とその位置の同時識別法," 光学 **17**, 361-366 (1988).
 27. S. Kamemaru, T. Nagaoka, M. Kakuta, and I. Shimizu, "Multiple Matched Spatial Filtering with Corresponding Symbols by the Hybrid System," Jpn. J. Appl. Phys. **29**, L1157-L1160 (1990).
 28. S. Jutamulia, T. Asakura, and H. Fujii, "Incoherent Optical Sampled Fourier Transforms for Pattern Recognition and Counting," Appl. Opt. **24**, 930-933 (1985).
 29. S. Wang and N. George, "Fresnel Zone Transforms in Spatially Incoherent Illumination," Appl. Opt. **24**, 842-850 (1985).
 30. J. B. Breckinridge, E. Ribak, and C. Habecker, "Real-Time Optical Correlation Using White Light Fourier Transforms," Final Report of the Technical Work, Jet Propulsion Laboratory, 4800 Oak Grove Dr., Pasadena, CA 91109 (1988).
 31. "高速画像処理システム," 株式会社東芝宇宙開発営業部カタログ (1986).
 32. A. S. Marathay, "Noncoherent-Object Hologram: Its Reconstruction and Optical Processing," J. Opt. Soc. Am. A **4**, 1861-1868 (1987).
 33. T. Nomura, K. Itoh, and Y. Ichioka, "Optical-Digital Hybrid Processor for High-Speed Pattern Matching," Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. **963**, 430-436 (1989).
 34. T. Nomura, K. Itoh, and Y. Ichioka, "Hybrid High Speed Pattern Matching Using a Binary Incoherent Hologram Generated by a Rotational Shearing Interferometer," Appl. Opt. **28**, 4987-4991 (1989).
 35. T. Nomura, K. Itoh, and Y. Ichioka, "Hartley Transformation for Hybrid Pattern Matching," Appl. Opt. **29**, 4345-4350 (1990).
 36. L. Mertz, *Transformations in Optics* (Wiley, New York, 1965), Chap. 4.
 37. M. V. R. K. Murty, "Interference Between Wavefronts Rotated or Reversed with Respect to Each Other and its Relation to Spatial Coherence," J. Opt. Soc. Am. **54**, 1187-1190 (1964).
 38. C. Roddier and F. Roddier, "Imaging with a Coherence Interferometer in Optical Astronomy," in *Image Formation from Coherence Function in Astronomy*, C. van Schooneveld, Editors (Ridel, Dordrecht, The Netherlands, 1979), pp. 175-178.
 39. R. V. L. Hartley, "A More Symmetrical Fourier Analysis Applied to Transmission Problems," Proc. IRE **30**, 144-150 (1942).
 40. 野村孝徳, 伊東一良, 一岡芳樹, "共通光路干渉計によるバイナリーインコヒーレントホログラムを用いたハイブリッドパターンマッチング," 第19回画像工学コンファレンス論文集, pp. 141-144 (1988).
 41. T. Nomura, K. Itoh, and Y. Ichioka, "Incoherent-Holographic Hybrid Image Processing," Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. **1183**, pp. 619-624 (1990).
 42. N. George and S. Wang, "Cosinusoidal Transforms in White Light," Appl. Opt. **23**, 787-797 (1984).
 43. K. Itoh, T. Inoue, T. Yoshida, and Y. Ichioka, "Interferometric Supermultispectral Imaging," Appl. Opt. **29**, 1625-1630 (1990).
 44. D. M. Cottrell, R. A. Lilly, J. A. Davis, and T. Day, "Optical Correlator Performance of Binary Phase-Only Filters Using Fourier and Hartley Transforms," Appl. Opt. **26**, 3755-3761 (1987).
 45. トーマス ハイニンリッヒ バーンズ, "光学的相関系フィルターによるパターン認識," 応用物理 **58**, 877-885 (1989).
 46. T. H. Barnes, K. Matsuda, and N. Ooyama, "Reduction of False Correlations with Binary Phase-Only Filters," Appl. Opt. **27**, 3785-3790 (1988).
 47. M. W. Farn and J. W. Goodman, "Optimal Binary Phase-Only Filters," Appl. Opt. **27**, 4431-4437 (1988).
 48. S. Kawata, T. Noda, and S. Minami, "Spectral Searching by Fourier-Phase Correlation," Appl. Spectrosc. **41**, 1176-1182 (1987).
 49. R. B. Lam, S. J. Foulk, and T. L. Isenhour, "Clipped Fourier Transform Mass Spectral Compression Algorithm for MicroComputer-Compatible Search System," Anal. Chem. **53**, 1679-1684 (1981).
 50. J. Jordan, P. Bishop, and B. Kiani, *Correlation-Based Measurement Systems* (ELLIS HORWOOD LIMITED, Chichester, 1989), 46-50.
 51. 大坪順次, 萩原昭文, "レーザースペックル強度のクリッピングとその応用," 応用物理 **58**, 1463-1472 (1989).
 52. 松岡克典, "オプティカルフェイズオンリーマッチング," 第22回光コンピュータ研究会&第12回光情報処理セミナー, 1987年10月9日 (口頭発表) .
 53. T. Nomura, K. Itoh, K. Matsuoka, and Y. Ichioka, "Binary Fourier Phase-Only Correlation," Opt. Lett. **15**, pp. 810-811 (1990).
 54. F. T. S. Yu, F. Cheng, T. Nagata, and D. A. Gregory, "Effects of Fringe Binarization of Multiobject Joint Transform Correlation," Appl. Opt. **28**, 2988-2990 (1989).
 55. D. Casasent and D. Psaltis, "Scale Invariant Optical Correlation Using Mellin Transforms," Opt. Commun. **17**, 59-63 (1976).
 56. D. Casasent, S.-F. Xia, A. J. Lee, and J.-Z. Song, "Real-Time Deformation Invariant Optical Pattern Recognition Using Coordinate Transformations," Appl. Opt. **26**, 938-942

- (1987).
57. D. Casasent and D. Psaltis, "Position, Rotation, and Scale Invariant Optical Correlation," *Appl. Opt.* **15**, 1795-1799 (1976).
 58. C. F. Hester and D. Casasent, "Multivariate Technique for Multiclass Pattern Recognition," *Appl. Opt.* **19**, 1758-1761 (1980).
 59. D. A. Jared and D. J. Ennis, "Inclusion of Filter Modulation in Synthetic-Discriminant-Function Construction," *Appl. Opt.* **28**, 232-239 (1989).
 60. T. Nomura, T. Nagase, K. Itoh, and Y. Ichioka, "Analysis of a Multiple-Object Binary Phase Only Correlator," *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **1359**, pp. 339-340 (1990).
 61. T. Nomura, T. Nagase, K. Itoh, and Y. Ichioka, "Designing a Binary Fourier-Phase-Only Correlation Filter Using a Simulated Annealing Algorithm," *Jpn. J. Appl. Phys.* **29**, pp. L2074-L2076 (1990).
 62. M. S. Kim, M. R. Feldman, and C. C. Guest, "Optimum Encoding of Binary Phase-Only Filters with a Simulated Annealing Algorithm," *Opt. Lett.* **14**, 545-547 (1989).
 63. W. P. Adams and H. D. Serali, "A Tight Linearization and an Algorithm for Zero-One Quadratic Programming Problems," *Manage. Sci.* **32**, 1274-1290 (1986).
 64. M. Fleisher, U. Mahlab, and J. Shamir, "Entropy Optimized Filter for Pattern Recognition," *Appl. Opt.* **29**, 2091-2098 (1990).
 65. C. Roddier, F. Roddier, and J. Demarcq, "Compact Rotational Shearing Interferometer for Astronomical Applications," *Opt. Eng.* **28**, 66-70 (1989).

著者発表論文

学術論文誌等

1. 野村孝徳, 伊東一良, 一岡芳樹, "共通光路干渉計によるバイナリーインコヒーレントホログラムを用いたハイブリッドパターンマッチング," 第19回画像工学コンファレンス論文集, pp. 141-144 (1988).
2. T. Nomura, K. Itoh, and Y. Ichioka, "Optical-Digital Hybrid Processor for High-Speed Pattern Matching," *Optical Computing* 88, J. W. Goodman, P. Chavel, G. Roblin, Editors, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **963**, pp. 430-436 (1989).
3. T. Nomura, K. Itoh, and Y. Ichioka, "Hybrid High Speed Pattern Matching Using a Binary Incoherent Hologram Generated by a Rotational Shearing Interferometer," *Appl. Opt.* **28**, pp. 4987-4991 (1989).
4. Takanori Nomura, Kazuyoshi Itoh, and Yoshiki Ichioka, "Incoherent-Holographic Hybrid Image Processing," *Holography '89, International Conference on Holography, Optical Recording, and Processing of Information*, Y. N. Denisyuk, T. H. Jeong, Editors, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **1183**, pp. 619-624 (1990).
5. Takanori Nomura, Takamitsu Nagase, Kazuyoshi Itoh, and Yoshiki Ichioka, "Analysis of a Multiple-Object Binary Phase Only Correlator," *Conference Record of 1990 International Topical Meeting on Optical Computing*, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.* **1359**, pp. 339-340 (1990).
6. Takanori Nomura, Kazuyoshi Itoh, Katsunori Matsuoka, and Yoshiki Ichioka, "Binary Fourier-Phase Only Correlation," *Opt. Lett.* **15**, pp. 810-811 (1990).
7. Takanori Nomura, Kazuyoshi Itoh, and Yoshiki Ichioka, "Hartley Transformation for Hybrid Pattern Matching," *Appl. Opt.* **29**, 4345-4350 (1990).
8. Takanori Nomura, Takamitsu Nagase, Kazuyoshi Itoh, and Yoshiki Ichioka, "Designing a Binary Fourier-Phase-Only Correlation Filter Using a Simulated Annealing Algorithm," *Jpn. J. Appl. Phys.* **29**, pp. L2074-L2076 (1990).

解説

9. 野村孝徳, 伊東一良, 一岡芳樹, "共通光路干渉計によるバイナリーインコヒーレントホログラムを用いたハイブリッドパターンマッチング," *オプトロニクス*, No. 88, pp. 94-98, オプトロニクス社 (1989).

著書

10. 野村孝徳, 伊東一良, 一岡芳樹, "第14章 パターン計測装置," *光センサ・テクノロジー集成*, pp. 164-168, オプトロニクス社 (1989). (文献9より転載)

