

放射線像研究

VOL. 2. No. 2. (通巻31号) 1972年7月

目次

研究会記事・会告	1頁
特別講演資料 画像情報処理	
東工大 辻内順平	5
論文	
32-2 リアルタイムによるX線像の空間周波数スペクトル	
日大歯学部 西岡敏雄	23
32-4 X線撮影用解像力チャートの問題点	
伊藤放射線機器研究所 酒井光明	29
32-5 X線による蛍光板のシンチレーションのゆらぎ(II)	
電通大 長谷川伸, 塚越照和	37

賛助会員名簿

従来の名簿に代えて大きく扱わせて頂くことにしました。

目次裏，裏表紙にもあります。

nac
ナック

映像システム
株式会社 ナック

本社 東京都港区西麻布1-2-7 第17興和ビル
電話 (904) 2321-4

健康づくりと医療の進歩に貢献する 日立レントゲン



診察用X線装置

- X線テレビ装置
- 胃部集団検診用装置
- 断層撮影装置
- 回診撮影装置

治療用装置

核医学機器

- RI データ処理装置
- シンチ カメラ
- ホールボディスキャンナ
- RI レノグラム装置

その他各種付属機器

日立レントゲン株式会社 東京都千代田区内神田1-1-4 (日立鎌倉橋別館) 電話 (292) 8111

Beautiful Color

フジカラー



第 32 回 研 究 会 記 事

第 32 回 R I I 研究会は下記のように開催されました。

日 時 昭和 47 年 6 月 10 日 (土) 10:30 ~

場 所 東京大学医学部好仁会会議室

特別講師 東京工業大学 辻 内 順 平 教授

出席者 (敬称略)

池田祐之, 鶴沢弘侑, 内田 勝, 梅垣洋一郎, 柄川 順, 江副正輔, 木下幸次郎,
桑山武司, 小泉勝三, 斉藤一彦, 酒井尙信, 酒井光明, 竹中栄一, 田中 仁,
塚越照和, 津田元久, 恒岡卓二, 中島緑彦, 中西省三, 西岡敏雄, 野辺地篤郎,
長谷川伸, 速水昭宗, 松川収作, 宮代彰一, 森矢達人, 矢仲重信, 山口奉頼,
山本 昭, 他数名

プログラム (*印のものは本誌に論文が掲載されています)

特別講演 *不鮮明像の鮮明化 東工大: 辻内順平教授

研究発表 1. フラウンホーフェ装置について 東大医: 竹中栄一

* 2. リアルタイムによる X 線像の空間周波数スペクトル

日大歯放: 西岡敏雄

3. 中性子ラジオグラフィ 東京原子力産業: 小泉勝三

* 4. X 線撮影用解像力チャートの問題点 伊藤放射線機器: 酒井光明

* 5. X 線による蛍光板のシンチレーションのゆらぎ (II)

電通大: 長谷川伸, 塚越照和

会 告

— 第33回研究会について —

第33回研究会は下記のように開催予定しています。

日 時 昭和47年9月2日(土)

場 所 京都市 私学会館(予定)

演題をお寄せ下さるようお願いいたします。

申込期限 昭和47年8月15日

申 込 先 〒182 調布市調布ヶ丘1-5-1
電気通信大学電子工学科 長谷川 伸
Tel 0424 (83) 2161 (内) 420

— 新 入 会 員 —

下記の方々を会員として迎えました。

氏 名	〒	勤務先および所在地	Te l
中 村 豊	241	神奈川県立成人病センター 横浜市旭区中尾町54-2	
西 沢 睦 雄	108	厚生中央病院放射線科 目黒区三田1-11-27	
山 下 富 雄	893	鹿児島県立鹿屋病院放射線科 鹿屋市打馬1-5-10	

— 住 所 変 更 —

氏 名	〒	新勤務先および所在地	Te l
大 森 久 生	594	和泉市立病院放射線科 和泉市府中町780	
広 瀬 正 治	590	耳原総合病院放射線科 大阪府堺市協和町4-465	

昭和46年度会計報告

第32回研究会昼食時を利用して総会を開き、下記の通り会計報告し、出席会員の承認を得ました。

放射線イメージ・インフォメーション研究会

昭和46年度会計報告

S46.4.1～S47.3.31

収 入		支 出	
費 目	金 額 (円)	費 目	金 額 (円)
会 費	74,900	前 期 未 払 金	0
賛 助 会 費	400,000	印 刷 費	326,036
利 子	704	通 信 費	37,604
前 年 度 繰 越	95,595	人 件 費	21,000
		交 通 費	96,600
		事 務 , 雑 費	6,075
		会 合 費	10,090
		謝 礼	15,000
		次 期 繰 越 金	58,794
計	571,199	計	571,199

—— 第15回委員会議事録 ——

日 時 昭和47年6月10日 16:00～

場 所 東京大学医学部好仁会会議室

出席者 (敬称略)

内田 勝, 木下幸次郎, 竹中栄一, 津田元久, 恒岡卓二, 長谷川伸, 矢仲重信

議 事 1) 会費について

会費改訂について検討した結果、本年度は従来通りすえおくこととした。

2) 次回予定

第33回研究会は京都で開催することとし、特別講師は常任委員に一任した。

医療用機器



富士電機製造株式会社

本社 (100) 東京都千代田区有楽町1丁目11番地 電話 東京(211)7111(大代表)

電子技術で未来をひらく 松下通信工業

高品質・高信頼性を誇る———!

デジタルX線テレビジョン装置



松下通信工業株式会社

電波機器事業部

松下通信 〒222 横浜市中区北区綱島町880 電話(045)531-1231(大代表)

Canon

キヤノン株式会社

東京都中央区銀座5-9-9〒104

☎ 572-4251 (大代表)

情報化時代をになう感材製品



小西六写真工業株式会社

東京都中央区日本橋室町3-1 電 (270) 5311 大代表

〈営業所〉 大阪(252)5246 名古屋(231)6241 福岡(29)5731

札幌(261)0261 広島(91)5246 仙台(21)1651

画 像 情 報 処 理

— 相 関 お よ び 像 修 正 を 中 心 と し て —

東京工業大学工学部印写工学研究施設 辻内 順平

Image Information Processing

—Correlation and Restoration—

Jumpei TSUJIUCHI

Imaging Science and Engineering Laboratory, Faculty of Engineering
Tokyo Institute of Technology, O-Okayama, Meguro-ku, Tokyo

(Received April 25, 1972)

Image information processing is a technique to perform an operation on an image in such a way that one can extract certain information from the image more easily after the operation. In this paper, a brief review of the research on two examples of the operation, the correlation and the restoration, is presented with their mathematical principles, possible hardwares and applications.

1. ま え が き

物体の形を記録した写真像や文字、図面などのパターンは、視覚にうったえる情報の表示、記録伝達などに広く用いられている。このような空間的な分布をもつ写真像やパターンは、画像と呼ばれ、近年これに演算を施すことにより、画像に含まれる必要な情報を抽出したり、または特定の目的に適するような画像に仕立て上げたりする技術が要求されるようになり、幅広い研究が行なわれるようになってきた。このような処理は一般に画像情報処理と呼ばれ、その目的に応じてきわめて多くの種類があり、また同一の目的に対して異なった多くの技術が使われている。

これらの技術のうちには、昔から経験的に用いられてきたものも少なくないが、むしろ最近の新しい技術の応用によって開発されたものが多い。殊にレーザーの実用以後、コヒーレント光学、特にホログラフィーが果してきた役割のきわめて大きいことが注目される。本稿では

これらの画像情報処理のうち、最も代表的でしかも用途の多い相関と像修正を対象にえらび、その研究状況を概観してみることにする。

2. 相 関

与えられた画像は、 (x, y) 面内における濃度、強度または振幅透過率分布を与えるものと考え、二つの画像 q_1 と q_2 の間の依存関係を知るためには

$$\begin{aligned} \phi_{12}(X, Y) &= \lim_{\substack{L_Y \rightarrow \infty \\ L_X \rightarrow \infty}} \frac{1}{4L_X L_Y} \int_{-L_X}^{L_X} \int_{-L_Y}^{L_Y} q_1(x, y) \\ &\quad \cdot q_2(x+X, y+Y) dx dy \\ &\equiv q_1(X, Y) \star q_2(X, Y) \end{aligned} \quad (1)$$

を求めれば、 ϕ_{12} は常に (X, Y) のみの関数となり、相互相関関数と呼ばれる。特に $q_1 = q_2$ のとき自己相関関数 $\phi_{11}(X, Y)$ が得られる。一般に $\phi_{11}(X, Y)$ は (X, Y) に関して偶関数であって、 $X=Y=0$ で最大値をとりその微分値は 0 である。また相互相関関数との間に

$$\phi_{12}(X, Y) \leq \phi_{11}(0, 0) \phi_{22}(0, 0) \quad (2)$$

が成立つことが知られている。このような相関の性質は $X=Y=0$ で最大の相関関数値を得る二つの画像 $g_1(x, y)$, $g_2(x, y)$ を求めることにより, g_1 と g_2 の一致を知り, パターン認識に利用されている。[†]

2.1 インコヒーレント光学系による方法

光学的な相関の測定は, 結晶解析の手段として, Robertson¹⁾ が提案して以来多くの方法が用いられている。Robertson は Fig. 1 のように平面 P_1 上にある光源のアレイがこれと平行においた平面 P_2 に記録されたパターンの影を P_3 面に投影, P_1 と P_2 の相関図形が観察できることを示した。この方法は Meyer-Eppler²⁾ によって一般の場合に拡張され, P_1 には $g_1(x, y)$ という強度分布をもった光源, または拡散光源で照明された強度透過率 $g_1(x, y)$ の原板, P_2 には強度透過率 $g_2(u, v)$ の原板をおき, P_1, P_2 の距離を a , P_2, P_3 の距離を b とすれば, P_3 面の強度分布 $E(X, Y)$ は

$$E(X, Y) = \frac{\text{const.}}{(a+b)^2} \iint_{-\infty}^{+\infty} g_1(x, y) g_2$$

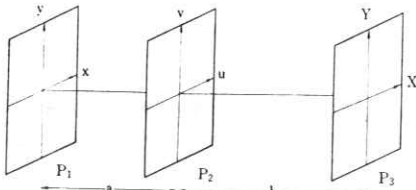


Fig. 1 Coordinates of Correlator

† 近年, 相関とコンボリューションを明確に区別して使うようになってから, これらを表わす演算記号が一定せず, 人によっては同じ記号をまったく逆の意味に使う例さえあって混乱し勝ちである。この小文をまとめるに当たって, 手近にある数学や光学関係の単行本, 原著論文を調査した結果, 特に相関を表わす記号がまちまちであるが, コンボリューションについては*を使っている例が多いことがわかった。このような演算記号は記述を簡単にするための方便であって, 一々断って使えば何であってもよいはずであるが, 不用意に使われはじめると混乱のもとになるし, 現にそのきざしが感じられるため, できることなら皆が統一して使える記号を定めた方がよいことはいうまでもない。このような記号としては, できるだけ従来の慣用を尊重し, 明確でいつでも使える活字であることが望ましい。このような見地から, 本稿では相関には★, コンボリューションには*を採用した。筆者自身も従来これと異なった使い方をした一人であるが, 今後はこの流儀に統一したいと考えているので, 読者諸賢の御賛同を賜われれば幸である。なお, この問題に因って, 東京大学工学部田中俊一教授から有益な助言をいただいた。特に記して御礼を申し上げたい。

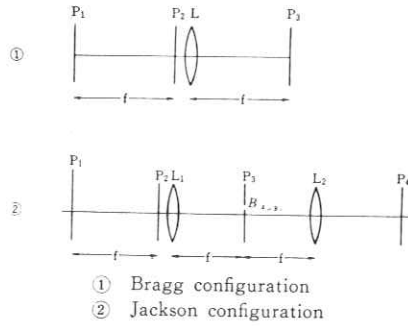


Fig. 2 Incoherent Optical Correlator

$$\left(\frac{(p-1)X+x}{p}, \frac{(p-1)Y+y}{p} \right) dx dy \quad (3)$$

で求められるから, $E(X, Y)$ を写真撮影すれば, g_1 および g_2 の相関図形が得られることを導いた。このとき

$$p = (a+b)/b \quad (4)$$

であって, P_2 面の座標 (u, v) は

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{(p-1)X+x}{p} \\ v &= \frac{(p-1)Y+y}{p} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

となり, 実際の計算に当っては scale factor p を考慮して P_1 および P_2 におく画像の倍率をきめなければならない。Bragg³⁾ は, Fig. 2① に示すように P_2 の直後にレンズ L をおき, P_3 をその焦点におく方法を提案したが, これは(4)式で $b \rightarrow \infty$, すなわち $p \rightarrow 1$ の場合に相当し, P_1 および P_2 の画像の尺度は同一となり実験がやりやすい。

Jackson⁴⁾ は Fig. 2② に示すように P_3 面に小さな孔 B をあけ, レンズ L_2 を通して P_1 面の像を P_4 面に作って観察する方法を提案した。このとき, P_3 面の孔の位置を (x_i, y_i) とし, 二つの画像の距離がレンズの焦点距離に等しいときには P_1, P_2, P_3, P_4 面の座標はすべて同一のスケールとなり, P_4 面の像の形は $g_1(x, y)g_2(x+x_i, y+y_i)$ となる。また, この際 P_3 面をレンズの焦点からずらせると, scale factor を 1 からずらせることも可能である。

これらのインコヒーレント光による光学的相関の場合には, 取扱いが簡単であり, また P_1 として CRT を用いる可能性のあることが大きく評価できる。この方法はあくまでも幾何光学的近似であるが, このときに考慮すべき回折の影響は Green⁵⁾ によって論じられている。

この方法によって画像の自己相関を求める場合には, 同一の画像を2枚用意する必要がある。Fig. 3 は Kovásznay-Arman⁶⁾ による, 一枚の原板を用いる自己相関計であって, 一様な面光源 S がレンズ L の焦点面におかれ,

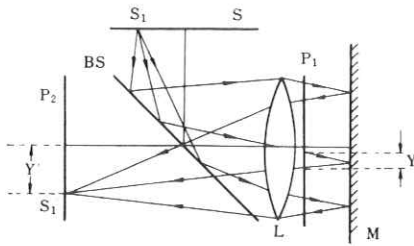


Fig. 3 Incoherent Optical Auto-Correlator (Kovaszny and Arman)

S上の一点、たとえば S_1 から出る光が原板 P_1 を通過し平面鏡 M で反射して再び P_1 に戻ったときのずれ (X, Y) が P_2 面上における S_1 の像 S_1' の中心からの距離 (X', Y') に対応し、 P_2 面上に P_1 の自己相関像が得られる。Sとしてフライングスポット走査管をおき、 P_2 においた積分光度計の出力をCRTで観察する方法も提案されている。

2.2 コヒーレント光学系による方法

広い光源を用いるかわりに、単色の点光源を用いた相関測定もしばしば行なわれる。Fig. 4はその代表的な配置⁷⁾であって、点光源Sとコリメーター L_1 で実現した平行光線束中に P_1, P_2 の二つの原板をおき、たとえば P_2 を (X, Y) だけ P_1 に対してずらしたとすると、 P_2 の後にレンズ L_2 をおき、その焦点面 P_3 で得られる強度分布は

$$E(X, Y; \omega_x, \omega_y) = \text{const.} \left| \int_{-\infty}^{+\infty} g_1(x, y) g_2^*(x+X, y+Y) e^{-2\pi i(x\omega_x + y\omega_y)} dx dy \right|^2 \quad (6)$$

となる。 (ω_x, ω_y) は空間周波数であって、 P_3 面上の座標 (ξ, η) と

$$\omega_x = \xi / \lambda f, \quad \omega_y = \eta / \lambda f \quad (7)$$

の関係がある。

したがって、光軸上の一点、 $\omega_x = \omega_y = 0$ にピンホールをおいてそれを通過する光量を計算すると、

$$E(X, Y; 0, 0) = \text{const.} \left| \int_{-\infty}^{+\infty} g_1(x, y) g_2^*(x+X, y+Y) dx dy \right|^2 = \phi_{12}(X, Y) \quad (8)$$

となり、 $g_1(x, y)$ と $g_2(x, y)$ の相関関数の二乗に比例していることがわかる。そこでこの値 $E(X, Y; 0, 0)$ を

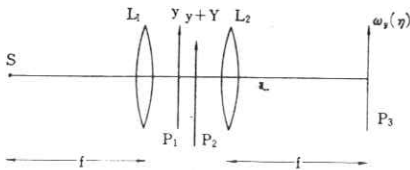


Fig. 4 Coherent Optical Correlator

測定しながら (X, Y) を動かせば相関関数を求めることができるわけである。特に $g_1 = g_2$ の場合、 $X=Y=0$ で鋭いピークを生じることを利用して、簡単なパターン認識の用途に使われることもある⁸⁾。

さらに、入力画像 g_1, g_2 が特別な空間周波数 ω_c および $\omega_c + \Delta\omega_c$ で変調されている場合、すなわち

$$\left. \begin{aligned} g_1(x, y) &= a_0 + a_1(x, y) \cos(\omega_c x + \alpha_1(x, y)) \\ g_2(x, y) &= a_0 + a_2(x, y) \cos((\omega_c + \Delta\omega_c)x + \alpha_2(x, y)) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

とすると、 P_3 面上で $\omega_x = \Delta\omega_c$ (または $\omega_x = -\Delta\omega_c$) の位置においたピンホールを通して、 $|\phi_{12}(X, Y)|^2$ に比例する出力が得られる。 $g_2(x, y)$ のかわりにその共役な形

$$g_2^*(x, y) = a_0 + a_2(x, y) \cos((\omega_c + \Delta\omega_c)x - \alpha_2(x, y)) \quad (10)$$

を用いれば、 $\omega_x = -(\Delta\omega_c + \Delta\omega_c)$ の位置で $|\phi_{12}(X, Y)|^2$ を測定できることになる。このような搬送波をもつ画像に対する処理は、入力装置として超音波光変調器⁹⁾を使用するとき好都合であり、またレーダー信号から物体までの距離と Doppler 偏移の両者を測定するのに用いることができる。

2.3 ホログラフィック・フィルタリング

ホログラフィ¹⁰⁾は光の振幅と位相の記録方法として重要な技術であって、コヒーレント光学系による画像処理ではきわめて大きな役割を果たしている。

Fig. 5は Rayleigh 干渉計を用いたホログラフィック・フィルタリング装置の一例であって、単色点光源Sとレンズ L_0 によって得られた平行光線束を入力面 P_1 に入射させ、レンズ L_1 によって P_2 面に P_1 面の画像のフーリエ・スペクトルが生じるようになっていく。 P_1 面は二つに分割され、たとえば光軸を中心とする P_{11} には振幅透過率が $g_1(x, y)$ の画像、 $(x_0, 0)$ を中心とする P_{12} には $g_2(x-x_0, y)$ の画像をおくと、 P_2 面には、それぞれ $G_1(\omega_x, \omega_y)$ 、 $G_2(\omega_x, \omega_y) e^{-2\pi i \omega_x x_0}$ で表わされるフーリエ・スペクトルに対応する波面が得られ、ここに乾板をおいてこれらの波面による干渉縞を記録すると、一種のフーリエ変換ホログラムが得られる。今、簡単な場合として、乾板のガンマを $\gamma = -2$ とすると、ホログラムの振幅透過率 $T_H(\omega_x, \omega_y)$ は

$$T_H(\omega_x, \omega_y) = |G_1|^2 + |G_2|^2 + G_1^* G_2 e^{-2\pi i x_0 \omega_x} + G_1 G_2^* e^{2\pi i x_0 \omega_x} \quad (11)$$

で表わされる。

次に、このホログラムをもとの位置におき、 P_{12} を遮断し P_{11} に $g_3(x, y)$ の振幅分布をもつ画像を入れ、そのフーリエスペクトル $G_3(\omega_x, \omega_y)$ に比例する波面でホログラムを照明すると、波面再生が行なわれ、レンズ L_2 を経て P_3 面に再生像が生じる。このとき、再生像の振

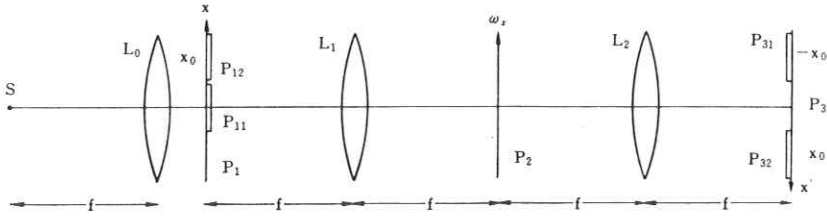


Fig. 5 Holographic Spatial Filtering Using Modified Rayleigh Interferometer

幅分布は

$$g'(x', y') = F^{-1}\{(|G_1|^2 + |G_2|^2)G_3\} \\ + F^{-1}\{G_1^*G_2G_3e^{-2\pi i x_0 \omega x}\} \\ + F^{-1}\{G_1G_2^*G_3e^{2\pi i x_0 \omega x}\} \quad (12)$$

となる。\$F^{-1}(\)\$ はフーリエ逆変換を表わす演算記号である。第1項はここでは興味はなく、第2項は \$x' = x_0\$ を中心とする \$P_{32}\$ に生じる像で

$$g_2'(x', y') = g_2(x', y') * (g_1^*(x', y') \star g_3(x', y')) * \\ \delta(x' - x_0, y') \\ = g_3(x', y') * (g_1^*(x', y') \star g_2(x', y')) * \\ \delta(x' - x_0, y') \quad (13)$$

の振幅分布をもち、第3項は \$x' = -x_0\$ を中心とする \$P_{31}\$ に生じ

$$g_1'(x', y') = g_1(x', y') * (g_2^*(x', y') \star g_3(x', y')) * \\ \delta(x' - x_0, y') \\ = g_3(x', y') * (g_2^*(x', y') \star g_1(x', y')) * \\ \delta(x' + x_0, y') \quad (14)$$

となる。ここで \$*\$ はコンボリューションを表わす演算記号である†。したがって、\$g_1, g_2, g_3\$ のえらび方を適当にすれば、(13), (14) で表わされるような演算を、画像処理に利用できることになり、相関の問題としては、光学的マッシュフィルタリングとコード変換の二つの処理がある。次にこれらについてのべる。

(1) 光学的マッシュフィルタリング

任意のスペクトルをもつ雑音に、既知の形をもつ信号が重畳されている場合、これを一つのフィルターを通してその出力の信号対雑音比を最大にするには、フィルターはどのような形となるかという問題は、情報理論で検討され、マッシュフィルター¹³⁾と呼ばれるフィルターが提案されている。この結論を画像の場合に拡張したものが、光学的マッシュフィルターであって、その空間周波数特性は

$$T(\omega_x, \omega_y) = \frac{S^*(\omega_x, \omega_y)}{|N(\omega_x, \omega_y)|^2} \quad (15)$$

で表わされている¹²⁾。\$S^*(\omega_x, \omega_y)\$ は信号のフーリエ・スペクトルの複素共役量、\$|N(\omega_x, \omega_y)|^2\$ は雑音のパワー・

† p. 3 脚註参照のこと。

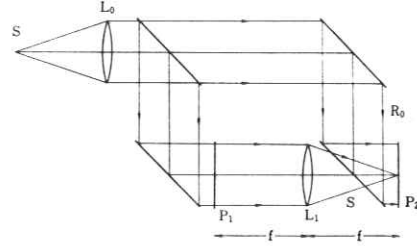


Fig. 6 Optical Matched Filtering Using Modified Mach-Zehnder Interferometer (Vander Lugt)

スペクトルである。もし、雑音が白色雑音の場合には \$|N(\omega_x, \omega_y)|^2\$ は常数となるため、\$T(\omega_x, \omega_y) \propto S^*(\omega_x, \omega_y)\$ とすれば十分である。

最初の光学的マッシュフィルターは、Vander Lugt¹²⁾ によって Mach-Zehnder 型干渉計を用いて作られた。

Fig. 6 に示すように、Mach-Zehnder 干渉計の一つの光路中に信号 \$s(x, y)\$ を記録した原板 \$P_1\$ を入れ、フーリエ変換用レンズ \$L_1\$ の焦点面 \$P_2\$ に生じる \$s(x, y)\$ のフーリエ・スペクトル \$S(\omega_x, \omega_y)\$ に比例する波面を、他方の光路からの一様な平面波 \$R_0\$ と干渉させ、

$$E(\omega_x, \omega_y) = |S(\omega_x, \omega_y) + R_0(\omega_x, \omega_y)|^2 \\ = (|S|^2 + |R_0|^2) + S^*(\omega_x, \omega_y)R_0(\omega_x, \omega_y) \\ + S(\omega_x, \omega_y)R_0^*(\omega_x, \omega_y) \quad (17)$$

で表わされる強度分布をもつ干渉縞を \$P_2\$ 面においた乾板 \$H\$ に記録する。この乾板を現像し、\$E(\omega_x, \omega_y)\$ がその振幅透過率 \$T(\omega_x, \omega_y)\$ に比例するようにすると、(17) がフィルターの振幅透過率に比例するようになり、第2項が(16)式の条件を満すマッシュフィルターとしての働きを持つようになる。

このフィルターはホログラフィー以前に報告されたものであるが、Fig. 5 の Rayleigh 干渉計を用いた場合と比べると、信号 \$s(x, y)\$ が \$g_1(x, y)\$、これと干渉させた平面波 \$R_0\$ は \$g_2(x - x_0, y) = \delta(x - x_0, y)\$ で表わされる点光源に対応することになり、ホログラフィック・フィルタリングに外ならない。したがって相関の測定に当っては、このフィルター \$H\$ に被処理画像 \$g(x, y)\$ のフー

リエ・スペクトルに相当する波面をあてて照明すると、(13)式に示した

$$g^2(x', y') = [s^*(x', y') \star g(x', y')] * \delta(x' - x_0, y') \\ = \phi_{ss}(x', y') * \delta(x' - x_0, y') \quad (18)$$

が再生され、 $s(x, y)$ と $g(x, y)$ の相互相関 ϕ_{sg} に比例した振幅分布をもつ像が現われることになる。特にパターンや文字識別の場合には $\phi_{sg}(0, 0)$ が $s=g$ のとき最大の値をとることからこの値のみを光電測定して、 g の中に s が含まれることを検出する。

Kozma¹³⁾ は $s(x)$ が一次元のランダム・バイナリーパターンの場合について、(17)式で定義した干渉縞 $E(\omega_x)$ をコンピューターで求め、正弦波形を矩形波にクリップしてプロッターで描き、乾板に撮影してフィルター $T(\omega_x)$ を合成した。信号 $s(x)$ にランダムな雑音を加え $S/N = -10.5 \text{ dB}$ の場合でも、上にのべたフィルターにより信号の存在を確実に検出できることを明らかにした。これがコンピューター・ホログラムの最初の試みである。

マッチトフィルタリングの装置については、構成の単純な Fig. 5 にのべた Rayleigh 型干渉計がよく使われるほか、種々の変形も考慮されるようになり、Fig. 7 に示すように、 P_1 面をフーリエ変換レンズ L_1 の後におき P_2 面との距離 z をかえることにより物体の倍率の補正を可能にする方法¹⁴⁾などが用いられるようになった。この方法は、原板の製作のときにおこるわずかな倍率の誤差を補正するのに有用である。また、フィルターの使用に伴う収差の発生、フィルターの設定のわずかな誤差が測定精度へおよぼす影響¹⁵⁾についても論じられ、雑音抑制のためのフィルター $1/|N|^2$ と信号検出フィルター $S^*(\omega)$ を分離してリレーレンズでつなぎ、一方のフィルターのみが簡単に交換できるようにした方法などが提案された。

一方、フィルターの記録については、 $S(\omega_x, \omega_y)$ は、はげしい強度分布の変化をもっているため、これを完全に線形に記録することは難しいが、文字識別など単純なパターンに対して低空間周波領域を故意につぶし、高周

波領域のみで作用させたフィルターの方が弁別能力が大きいことが指摘されている¹⁶⁾。このことは特に文字識別に应用するとき重要であって、アルファベットのように類似した信号が多い場合には、相互相関 $\phi_{12}(0, 0)$ が比較的大きい値を示し、誤読がおこりやすいが、自己相関の場合には $(\partial^2 \phi_{11} / \partial X \partial Y)$ を求めると鋭いピークを示すことから、空間的な微分フィルターを併用することも提案¹⁷⁾されている。

理想的なマッチトフィルターでは、雑音が白色雑音でない限り(15)式に示すように、雑音の抑制に働く振幅フィルター $1/|N|^2$ が必要となるが、実際の場合には雑音の予想がつかないため、これを用意することは不可能である。このようなとき、信号 $s(x, y)$ のかわりに被処理画像 $g(x, y) = s(x, y) + n(x, y)$ のフーリエ変換ホログラムを撮ってマッチトフィルターとし、これを信号 $s(x, y)$ で再生する方法をとれば、感光材料が露光の多い領域で示す非線形のため、 $g(x, y)$ のフーリエ・スペクトル $G(\omega_x, \omega_y)$ が大きな値を示す低空間周波数領域でフィルターの利得が抑えられ、これが近似的に $1/|N|^2$ と同一の効果をもたらす¹⁸⁾わけである。この方法は、一々被処理画像についてホログラムを撮る必要があるが、雑音の性質に無関係に弁別能力の高いマッチトフィルターを得るためには好ましい方法である。

このような方法によっても、文字識別のように単純で類似の信号の多い場合、弁別能力は必ずしも十分とは思えない。Caulfield¹⁹⁾ は、 N 個の文字 u_1, \dots, u_N があって入力文字 u_i 、フィルター文字を u_k に対して、 $\phi_{ik}(0, 0) = r_{ik}$ が測定されたとき、 u_i と u_k が同じかどうかを判定するため、 r_{ii} の線形結合

$$F_{ik} = r_{ik} + \sum_{l \neq k} C_{li} r_{li} \quad (19)$$

を作り、 F_{ik} は $i \neq k$ 以外で 0 となるような条件、すなわち

$$F_{ik} = F_{ik} \delta_{ik} \quad (20)$$

が成立つように係数 C_{li} の値をえらぶと、 u_i, u_k の弁別は F_{ik} で決るようになり、弁別能力は著るしく高ま

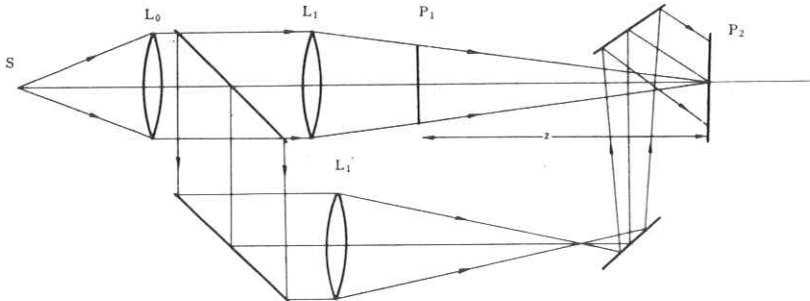


Fig. 7 Practical Optical Matched Filtering Processor (Vander Lugt)

ると報告している。このような方法を実現するために、たとえば B, E, F の三字を一つのホログラムを重ねて記録し、再生される3個の相関像が重ならないようにしておけば、同時に3個の r_{ij} が測定でき、 F_{ijk} を計算できるわけである。この方法では、弁別能力はきわめて高く、また字をわずかに回転して故意に相関を悪くしても、誤読はほとんどおこらないことが確かめられている。

次に光学的マッパフィルタの実用的な応用についての報告から二、三紹介しておこう。

文字識別にマッパフィルタリングが有用であることは既にのべたが、文章中から特定の文字の数を知ることによりその文献の取扱い分野を判断することができる。アメリカの Radiation Inc.²⁰⁷では、この方法によって学術文献のマイクロフィルムに対して、キーワードを記録したマッパフィルタによって文献の自動選別を行なう試みを発表している。

文字以外の画像についての実用例として、レーダー像からの特定目標の検出²¹¹、指紋の検出^{22, 231}などがある。特に指紋は空間周波数範囲が限定され、相関のとおりやすい信号であって、弁別能力は高い。辻内ら²³¹は、出力像の光電検出のため周心円形の微分形受光素子を用い、誤差を少なくする試みを採用した。

マッパフィルタリングを用いた測定にも注目すべきものが多い。Marom²⁴¹は、金属の疲労試験にこの方法を採用して好結果を得ている。すなわち、金属試料面で反射した平行光線束をレンズで集光したものを信号光としてフーリエ変換ホログラムを作成し、これと同じ信号光で再生しながら試料へ振動試験を行なうと、金属表面のわずかな微細変化により出力が低下するため、この変化を測定することによって、疲労試験を行なうものである。肉眼観察でわかる微細クラックの発生のはるか前に変化を測定できることが報告されている。

Rotz ら²⁵¹は、気象衛星 (ATS I および ATS III) から撮影した雲の写真を用いて雲の運動解析を行なっている。すなわち、ある時間 t_1 の写真 q_1 のフーリエ変換ホログラムを作り、次の時間 t_2 における同じ位置の写真 q_2 で再生を行なう。このとき、 q_2 の一部分のみを用いて再生を行なえば、その部分が q_1 に存在する位置に点像が現われるため、その位置の差と時間の差からその部分の雲の運動を求めることができる。この操作を小型のコンピューターとハイブリッド結合したマッパフィルタリング装置を用いて、写真上のいろいろな位置について測定し、結果をプロッターで表示している。

Krulikowski ら²⁶¹は、2枚の立体写真から、被写体の断面を求める方法を報告している。Fig. 8 はその光学系の略図であって、 x 方向にカメラを動かして撮影した2枚の写真を用い、まず1枚の写真を P において x 方向の一次元フーリエ変換ホログラム H を作り、次に他の一枚を P におき y 軸に平行なスリット S で掩って再生を行なえば、各点の視差によって生ずる相関出力 C が P' 面の y 軸に沿って現われ、これが y 方向の切断図に比例することになる。

(2) コード変換

ホログラフィック・フィルタリングによる相関のもう一つの応用はコード変換である。Fig. 5 に示した装置において $q_1(x, y)$ と $q_2(x, y)$ で作成したホログラムを $q_3(x, y)$ で再生すれば、(13), (14) 式で示したように

$$\left. \begin{aligned} q_2'(x', y') &= q_2(x', y') * (q_1^*(x', y') \star q_3(x', y')) \\ &\quad * \delta(x' - x_0, y') \\ q_1'(x', y') &= q_1(x', y') * (q_2^*(x', y') \star q_3(x', y')) \\ &\quad * \delta(x' + x_0, y') \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

が得られる。したがって、もし $q_1^* \star q_3 = \delta$ なら $q_2'(x', y') = q_2(x' + x_0, y')$ が、また $q_2^* \star q_3 = \delta$ の場合には q_1'

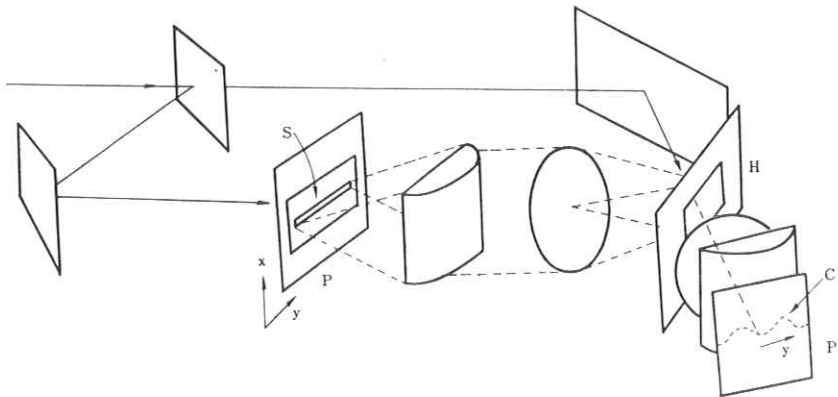


Fig. 8 Holographic Stereo X-Parallax Profile Processor (Krulikowski, Kowalski and Whitehead)

$\langle x', y \rangle = g_1(x' + x_0, y')$ が得られる。 $g_1 \star g_3 = \delta$ は $g_3 = g_1$ であって g_1 がランダムな構造をもつ場合に相当するため、 g_1 がランダムに近い構造をもつ場合、 g_1, g_2 で作ったホログラムを g_1 で照明すると g_2 が再生され、同様にして g_2 もランダムに近い場合、 g_2 で照明すると g_1 が再生されることになり、このホログラムは g_1 と g_2 の変換器²⁷⁾として働くわけである。このような演算をコード変換という。

g_1 または g_2 がランダム構造をもたない場合には、このような相互変換はできない。しかし、ホログラムの再生に有効な成分を

$$T = G_2/G_1 \quad (22)$$

とおけば、 $g_1 \rightarrow g_2$ の変換は支障なく行なわれる。これには $G_1 \star G_2$ を記録したホログラムに $1/|G_1|^2$ の振幅フィルターを併用すればよい²⁸⁾。

これまでのべたホログラムは、干渉縞の撮影によって作られたものであるが、コンピューターで合成したのもホログラフィック・フィルタリングには重要な役割を果たしている。Lohmann ら²⁹⁾ は、コンピューター・ホログラムをコード変換に用いた実験結果を報告している。

コード変換は文字読取りの方法として利用できる。Gabor³⁰⁾ は、アルファベットや数字を8孔のバイナリーコードに変換するためのコード変換器の提案を行なった。この方法では、ホログラムを engram と呼ばれる小さいエレメントに分割し、一つの文字に対し30種類の字体を記録させ、どの一つからでも必要なバイナリーコードが読出されるように考えられている。この提案に対し Dickinson³¹⁾ は実用的見地から再検討しその適用限界について報告し、また Watrasiewicz³²⁾ はアルファベット等の文字はランダムパターンから遠く、このような目的にはふさわしくないことをのべている。

中島ら³³⁾ は、 3×3 のマトリックス状の光源の2~4個の組合わせを用いて、アルファベットと数字の読取り機を試作した。この方法ではフーリエ変換光学系に回転できるうすい楔を入れ、一枚のホログラムの円周に沿っておのおの文字のホログラムを記録しておき、読出しには文字を入れ楔を一回転させれば、ちょうど一致した位置でコード化された信号が再生され、これを 3×3 の光電素子アレイで受けて読出す方法がとられている。Treheux³⁴⁾ もコード変換による文字読取り機を試作しているが、入力画像として文献を透明シートにゼロックスコピーしたものをを用いている点が注目されている。

2.4 インコヒーレント・マッチトフィルタリング

さきのべたように、光学的マッチトフィルタリングは、フーリエ変換ホログラムを用いるコヒーレント光学系によって実現されたが、実験に際しては印刷物などの

拡散物体が用いられないこと、フィルターの位置決めが難しいことなどの難点が存在した。このような欠点を除くものとして、準単色拡散光を用いるインコヒーレント・マッチトフィルタリングが試みられている。

今、ある光学系が、点像の強度分布、いわゆる point spread function (PSF) が $b(x, y)$ の形をもっているとき、 $a(x, y)$ の強度分布をもつ物体の像を作ると

$$c(x', y') = \iint_{-\infty}^{+\infty} a(x, y) b(x' - x, y' - y) dx dy \quad (23)$$

で表わされる強度分布が得られる。今、この光学系が $b(-x', -y')$ の形の像を作るように配置すれば

$$c(x', y') = \iint_{-\infty}^{+\infty} a(x, y) b(x - x', y - y') dx dy = \phi_{ab}(-x', -y') \quad (24)$$

となり、 $a(x, y)$ と $b(x, y)$ の相互相関像が求められるわけである。実際に相関を求める場合には、任意の形をもつ $b(x', y')$ を作る必要があるであって、レンズなどの普通の光学系で実現することはきわめて難しい。このような場合、ホログラムまたは Kinoform を結像素子として利用する方法が簡単である。Lowenthal ら³⁵⁾、Groh³⁶⁾ らは強度透過率 $g_1(x, y)$ の画像を点光源を参照光源としてレンズレスフーリエ変換ホログラムを撮り、ホログラムの撮影に用いたレーザー光と等しい波長をもつ準単色拡散光で照明した $g_2(x, y)$ の強度透過率をもつ画像を物体としてこのホログラムで結像を行ない、 $g_1(x, y) \star g_2(x, y)$ に比例する強度分布の像を得ている。

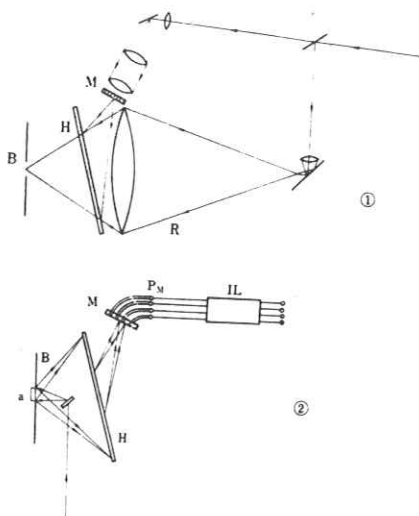


Fig. 9 Incoherent Optical Matched Filtering Processor (Maloney)
① Making Hologram ② Processor

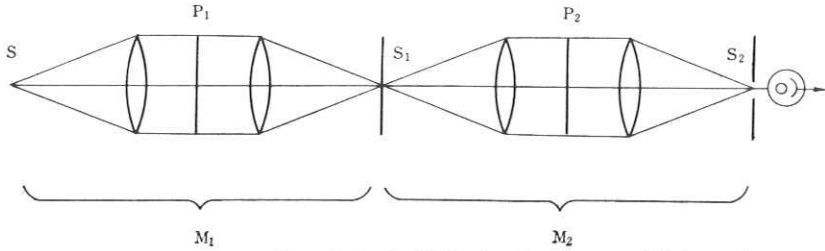


Fig. 10 Incoherent Optical Matched Filtering (Armitage and Lohmann)

このとき再生段階で用いる光源の単色性は画像の分解能によって異なるが、水銀灯程度でよく、またコヒーレント光学系で用いたような弁別能力を増す試みも可能であることを Lohmann³⁷⁾ らが報告している。Kinoform については Patai ら³⁸⁾ の実験が報告されている。Fig. 9 は Maloney³⁹⁾ が提案した文字読取装置であって、①に示すように乾板Hに小開口Bに収斂する参照光Rと、N個の文字と拡散板を配列した複合開口Mから出る信号光でホログラムHを撮影する。次に②に示すように、①と同じ配置にした開口Bに拡散反射性の文字aをおけば、MにはaとN個の文字との相互相関像が現われ、自己相関像に相当する開口のエレメントが明るくなるため、その位置を光電アレイ P_M で検出し読出しロジック IL を通せばよい。

一般の光学系を用いる方法は、Armitage ら⁴⁰⁾ によって報告されている。Fig. 10 に示すように、点光源Sをもつフーリエ変換光学系 M₁ によって生ずる像 S₁ を光源として第2のフーリエ変換光学系 M₂ による像 S₂ を求める。M₁ の入力面 P₁ に振幅透過率 $g_1(x, y)$ の原板をおくと、S₁ は $g_1(x, y)$ のパワースペクトル $|G_1(\omega_x, \omega_y)|^2$ に比例する強度分布をもち、また M₂ 入力面 P₂ に $g_2(x, y)$ をおくと、M₂ の PSF は $|G_2(\omega_x, \omega_y)|^2$ で表わされるようになる。 $g_1(x, y)$, $g_2(x, y)$ がともに正の実関数とすると $G_1(\omega_x, \omega_y) = G_1(-\omega_x, -\omega_y)$, $G_2(\omega_x, \omega_y) = G_2(-\omega_x, -\omega_y)$ であり、S₁ 内の位相の確定関係を除くために S₁ 面内で拡散板を回転してインコヒーレント光源とすれば、S₂ は $|G_1(\omega_x, \omega_y)|^2 \star |G_2(\omega_x, \omega_y)|^2$ となる。そこで、S₂ の中心にピンホールをおき、後にフォトマルチプライヤー P_M をおけば、P_M の出力が最大になる場合が $|G_1|^2 = |G_2|^2$, すなわち $g_1 = g_2$ に相当するわけである。この方法は、画像のフーリエ変換の自乗の相関をとることに相当するため、P₁, P₂ におく g_1, g_2 の位置の制限は非常にゆるく、多数の g_2 を入れかえて測定を行なう場合には使いやすい方法である。類似の方法で、画像のフレネル変換の二乗の相関を求める方法も De ら⁴¹⁾ によって報告されている。

3. 像修正

写真撮影の際、撮影光学系の回折限界、レンズの収差焦点外れ、空気のゆらぎなどのため、画像が不鮮明になる場合が多い。このように、不鮮明に撮影された画像を鮮明化して、もとの正しい像に復元する方法を像修正という。

今、物体の強度分布を $s(x, y)$ 、撮影光学系の PSF を $h(x', y')$ とする。 $h(x', y')$ が物体の全範囲にわたって不変、いわゆる space invariant な場合には、像 $q(x', y')$ は

$$q(x', y') = \iint_{-\infty}^{+\infty} s(x, y) h(x' - x, y' - y) dx dy \\ \equiv s(x', y') * h(x', y') \quad (25)$$

すなわち $s(x, y)$ と $h(x', y')$ との convolution によって求められるわけである。実際には $q(x', y')$ で表わされる強度分布をもつ画像が与えられるので、これを処理して正しい $s(x, y)$ を求めよというものがここでの命題である。これは、与えられた $q(x, y)$ と $h(x', y')$ から (25) 式を解いて $s(x, y)$ を求めることに相当するので、“deconvolution” と呼ばれることもある。この deconvolution には次の三つの方式がある。

(1) 積分方程式の解を求める方法

$s(x, y)$ を求めるため、(25) 式を積分方程式と考え、既知の $h(x', y')$ 、与えられた $q(x', y')$ を用いて (25) 式を解き、 $s(x, y)$ を求める方法⁴²⁾である。

簡単な場合として、一次元物体 $s(x)$ が $[-L, L]$ の有限範囲に存在し、画像 $q(x)$ には雑音が含まれていないと考える。このときには

$$\lambda_i \varphi_i(x) = \int_{-L}^L \varphi_i(x') h(x - x') dx' \quad (26)$$

が成立つ個有値 λ_i と個有関数 $\varphi_i(x)$ を用いて、物体 $s(x)$ は

$$s(x) = \lim_{M \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^M s_i \varphi_i(x) \quad (27)$$

で求められる。ただし

$$s_i = \frac{1}{\lambda_i} \int_{-L}^L g(x') \varphi_i(x') dx' \quad (28)$$

である。また、 M を ∞ までとれば完全な修正が可能であるが、実際にそのような計算は不可能であるため、適当な M の値で止めてもよい。このとき M が大きいほど完全に近い修正が行なわれる。

もし像に雑音 $n(x')$ が混入して

$$g(x') = \int_{-L}^L s(x) h(x' - x) dx + n(x') \quad (29)$$

となった場合には、 $g(x')$ から上と同様の方法で求めた物体は

$$s'(x) = \sum_{i=0}^M \left[s_i + \frac{n_i}{\lambda_i} \right] \varphi_i(x) \quad (30)$$

$$n_i = \int_{-L}^L n(x') \varphi_i(x') dx' \quad (31)$$

となり、正しい物体 $s(x)$ とは異なった形となる。こうして求めた $s'(x)$ と真の $s(x)$ との平均二乗誤差は

$$\langle e^2 \rangle = \sum_{i=0}^M \left(\frac{1}{\lambda_i} \right)^2 \langle n_i^2 \rangle \quad (32)$$

となり、 n_i^2 のアンサンブル平均 $\langle n_i^2 \rangle$ によって決る。したがって、これがどの程度になるかは、 $h(x)$ と $n(x)$ の形によって異なるが、普通の結像系では λ_i^2 は M の増大とともに急速に小さくなり、 M を大きくえらんで精密な修正を行なうと、雑音の影響が大きくなりすぎて不都合となるため、物体の精密な修正は不可能となる。

個有関数としては、Prolate Spheroidal Wave Function⁴³⁾ がよく用いられ、Barnes⁴⁴⁾ は回折限界で不鮮明となった雑音のない点像に対して $M=2\sim 8$ の範囲で計算を行ない、 M の増大とともに像が鮮明化することを確かめ、また Frieden⁴⁵⁾ は、さらに一般の不鮮明像への拡張を試み、雑音の影響による修正精度について検討している。雑音を含んだ像については、Rino⁴⁶⁾ が修正像と点の像との平均二乗誤差を最小にする条件のもとに、修正像を計算する展開式を導いている。

(2) 周波数面における演算 (空間周波数フィルタリング)

(25) 式の両辺のフーリエ変換をとれば

$$G(\omega_x, \omega_y) = S(\omega_x, \omega_y) H(\omega_x, \omega_y) \quad (33)$$

が得られる。 $G(\omega_x, \omega_y)$ 、 $S(\omega_x, \omega_y)$ はそれぞれ $g(x, y)$ 、 $s(x, y)$ のフーリエ・スペクトル、 $H(\omega_x, \omega_y)$ は結像系の PSF $h(x', y')$ のフーリエ・スペクトルであって、OTF (Optical Transfer Function) と呼ばれている。したがって、与えられた画像 $g(x, y)$ のフーリエ・スペクトルに

$$T(\omega_x, \omega_y) = 1/H(\omega_x, \omega_y) \quad (34)$$

の形の関数を掛ければ、 $G(\omega_x, \omega_y)$ から $H(\omega_x, \omega_y)$ の影響が消え、 $S(\omega_x, \omega_y)$ のみとなるので、このフーリエ逆変換を求めればよい。(34) 式で定義される空間周波数フィルタは、インバース・フィルタと呼ばれる。この方法は Maréchal⁴⁷⁾ によって最初に提案され、O'Neill⁴⁸⁾ がさらに広い応用について総合的に報告している。

空間周波数フィルタリングでは、周波数スペクトルが出発点となるため $S(\omega_x, \omega_y)$ が広い範囲に存在しても、 $H(\omega_x, \omega_y)$ が $(\omega_x \leq \mu_0, \omega_y \leq \nu_0)$ でのみ値をもつローパス・フィルタの場合、 $G(\omega_x, \omega_y)$ も (μ_0, ν_0) 以内だけしか存在しないため、正しい修正ができなくなる。このようなとき、 (μ_0, ν_0) の内部の任意の一点 (μ, ν) をえらんで Taylor 展開を行ない

$$S(\omega_x, \omega_y) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\omega_x - \mu)^m (\omega_y - \nu)^n}{m! n!} \cdot \left[\left(\frac{\partial}{\partial \omega_x} \right)^m \left(\frac{\partial}{\partial \omega_y} \right)^n G(\omega_x, \omega_y) \right]_{\omega_x = \mu, \omega_y = \nu} \quad (35)$$

を求めれば、 $\omega_x > \mu_0$ 、 $\omega_y > \nu_0$ に対する $S(\omega_x, \omega_y)$ を求めることができ、完全な像修正の可能性があることがわかる。

一般に $H(\omega_x, \omega_y)$ はローパスフィルタとなるため、インバース・フィルタはハイパス・フィルタであって、像に雑音加わると高い周波数領域に分布している雑音が強調されて、却って修正の実が上らないことになりかねない。このような場合の処理として、像の強度分布にハイパスフィルタ $T(\omega_x, \omega_y)$ をかけて得られた修正像と真の像との平均二乗誤差が最小になるように $T(\omega_x, \omega_y)$ の形を決めなければならない。Helstrom⁵⁰⁾ はこの観点から計算を行ない

$$T(\omega_x, \omega_y) = \frac{H^*(\omega_x, \omega_y) |S(\omega_x, \omega_y)|^2}{|H(\omega_x, \omega_y)|^2 |S(\omega_x, \omega_y)|^2 + |N(\omega_x, \omega_y)|^2} \quad (36)$$

の形の一種のバンドパス・フィルタが顕著な効果を持つことを報告している。Slepian⁵¹⁾ は空気のゆらぎなどによって時間とともに PSF が変動する結像系で得られた有限な大きさの像について同様の計算を行ない、OTF $H(\omega_x, \omega_y)$ のかわりにその時間平均値を用いればよいことを導いている。また Levi⁵²⁾ も像の評価の観点から同様の結論を導き、特に肉眼での観察を目的とするときは、単純な倍率変化 (縮小) も重要な修正技術であることを指摘している。

(3) 像面上における演算 (コンボリューション処理)

与えられた画像 $g(x', y')$ に対して、ある関数 $t(x, y)$ をコンボリュートして得られる画像 $g'(x, y)$ は

$$g'(x, y) = g(x, y) * t(x, y)$$

$$=s(x, y)*h(x, y)*t(x, y) \quad (37)$$

となるため、もし

$$h(x, y)*h(x, y)=\delta(x, y) \quad (38)$$

の関係が成立せば、 $g'(x', y')$ は $s(x, y)$ となり修正が行なわれる。このような処理をコンボリューション処理と呼び、(38) 式から

$$t(x, y)=F^{-1}[1/H(\omega_x, \omega_y)] \quad (39)$$

となり、 $t(x, y)$ はインバース・フィルターを併用した光学系の PSF に相当する。雑音のある場合には $H(\omega_x, \omega_y)$ のかわりに (36) で与えられる $T(\omega_x, \omega_y)$ を用いればよく、実際の処理に当ってはさらに別の形が用いられることもある。考え方は上述の空間周波数フィルタリングと同じであるが、実行方法が異なるわけである。

3.1 再回折法

コヒーレント光学系を用い、フラウンホーフェ回折によって得られた画像のフーリエ・スペクトルに修正フィルターをかけ、再びフラウンホーフェ回折をくりかえして画像に戻すことによって像修正を行なう方法は再回折法と呼ばれている。Fig. 11 ①はその光学系の配置であって、単色の点光源 S とコリメーター L_0 で平行光線

束を作り、 P_1 面においた振幅透過率が $g(x, y)$ で表わされる画像を照明すると、レンズ L_1 の像焦点面 P_2 にフーリエ・スペクトル $G(\omega_x, \omega_y)$ が得られるので、これに修正フィルター $T(\omega_x, \omega_y)$ を重ね、レンズ L_2 でフーリエ逆変換を行ない、 P_3 面に修正された像 $g'(x', y')$ が得られるようになっている。与えられた被処理画像 $g(x, y)$ が強度分布の場合にはこれを $\gamma=2$ で記録して振幅分布にかえた原板が入力画像として用いられ、不必要な位相変化を除くため液浸⁵³⁾を行なうのが普通である。またこのときには P_3 で出力画像を記録するには $\gamma=1/2$ の感光材料を用いるのが普通である。実際に用いられる光学系は、①から多少変形される場合も多く、②はフーリエスペクトル面の座標 (ω_x, ω_y) の尺度を連続的に変えるようにした構成の一例⁵⁴⁾である。

フィルターの製作には、目的によって種々の方法が採用されている。画像のコントラストを改善し細部の鮮明度を高める処理は edge sharpening⁵⁵⁾ と呼ばれ、ゆるやかなハイパス・フィルターが用いられるが、このフィルターは写真処理によって作られる。一般に $H(\omega_x, \omega_y)$ が必要とする空間周波数範囲内で負値を含まない場合に

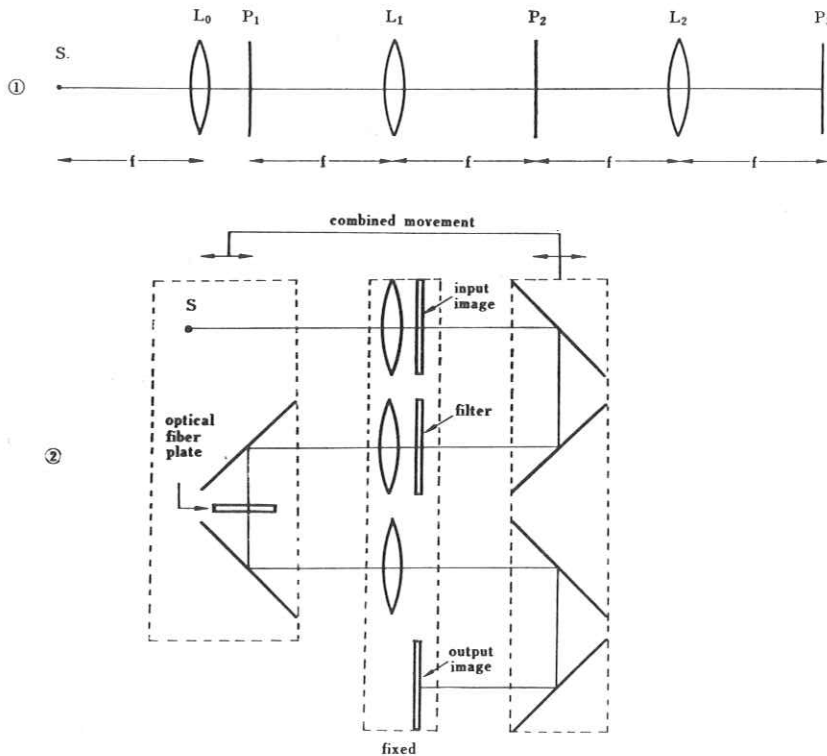


Fig. 11 Coherent Spatial Filtering by Double Diffraction Method
① Ordinary configuration ② Variable Frequency Configuration (Tsujiuchi)

は、フィルターはフーリエ・スペクトルの絶対値のみを変化させる振幅フィルターでよく、写真、吸収膜の蒸着、複屈折性の結晶板の組合せ⁵⁶⁾などが用いられた。Wiederら⁵⁷⁾はKDPを電子ビームで走査して得られる局所的な偏光特性の変化を利用する振幅フィルターを報告している。

$H(\omega_x, \omega_y)$ が、必要な空間周波数範囲内で負値をもつ場合、たとえば Fig. 12 ① に示すような焦点外れによる劣化像の場合には、 $T(\omega_x, \omega_y)$ の絶対値を実現するための振幅フィルター T_A と、符号の変化をおこすための位相フィルター T_P の組合せ⁵⁸⁾として実現する。振幅フィルターは上にのべたような方法で作ればよいが、

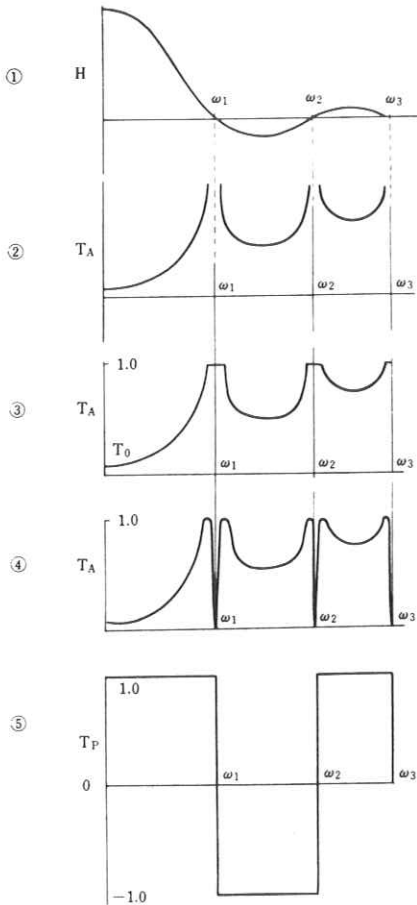


Fig. 12 Inverse Filter

- ① OTF in Defocused Image
- ② Amplitude Component of Inverse Filter
- ③ Practical Amplitude Filter without Noise
- ④ Practical Amplitude Filter with Noise
- ⑤ Phase Filter

$H(\omega_x, \omega_y)=0$ となる周波数 $(\omega_{x1}, \omega_{y1})$ では $T_A \rightarrow \infty$ となり、(Fig. 12 ②) $|T| \leq 1$ のフィルターでは実現不可能となる。この場合、 $(\omega_{x1}, \omega_{y1})$ では $T_A=1$ とし、 T_A の最小値である $\omega_x=\omega_y=0$ における値 T_0 をできるだけ小さく選ぶことによって近似的に実現することができる (Fig. 12 ③)。 T_0 の値に対する修正効果は、修正された点像と理想点像との中心強度の比

$$D(T_0) = \frac{\iint_{-\infty}^{+\infty} H(\omega_x, \omega_y) T(\omega_x, \omega_y) d\omega_x d\omega_y}{\iint_{-\infty}^{+\infty} T_0 d\omega_x d\omega_y}$$

で評価できる⁵⁹⁾。画像に雑音が含まれている場合は、(36) 式で $H(\omega_{x1}, \omega_{y1})=0$ とおけば $T(\omega_{x1}, \omega_{y1})=0$ となるため、Fig. 12 ④ のように無理なく実現できる⁶⁰⁾。

位相フィルター T_P は、Fig. 12 ⑤ に示すように、 $T(\omega_x, \omega_y)$ が負値をとる周波数範囲に対し、位相を π だけ変化させればよく、MgF₂ などの透明薄膜を用いてその光路差を他の部分に対し $\lambda/2$ だけ変化させる位相フィルター⁵⁸⁾が利用される。また、互に直交する偏光方向をもち、それぞれの直線偏光に感光する二層の感光層から成る Vectograph フィルム⁶¹⁾を偏光板と併用して、 π の位相差をもたせる試みもある。またうすい凹レンズを用い、レンズの厚さの変化による位相変化が π になる位置が、 $H(\omega)$ の負領域のピークと一致するようにえらび、近似的に実現する方法⁶²⁾も提案されている。さらに漂白したキノフォーム、位相ホログラム用感光材料も位相フィルターとして利用できる。

3.2 ホログラフィック・フィルタリング

フーリエ変換ホログラムによる演算作用は、像修正の場合にも重要な技術である。装置は光学的マッシュフィルターリングに用いた Fig. 5 とまったく同じであるが、 g_1, g_2, g_3 のえらび方を変えることによってこの目的に利用できる。 g_1 として撮影系の PSF $h(x, y)$ 、 g_2 には $\delta(x-x_0, y)$ を用いてホログラムを作り、さらに g_1 においた $h(x, y)$ のフーリエ・スペクトルを $\gamma=2$ のネガ像として撮影した振幅フィルター $T_A=1/|H|^2$ を併用すると、 P_{32} に生ずる再生像の PSF の振幅分布は

$$\begin{aligned} g_2'(x, y) &= F^{-1}[g_2(x'-x, y)] \\ &\quad * [g_1^*(x', y') \star g_3(x', y')]/|H|^2 \\ &= F^{-1}\left[\frac{H^*}{|H|^2}\right] = F^{-1}\left[\frac{1}{H}\right] \end{aligned} \quad (41)$$

となり、インバースフィルター $1/H$ が実現できる⁶³⁾。したがって g_3 として被処理像 $g=s(x, y) \star h(x, y)$ をおいて再生を行えば、 P_{32} に生じる像は $s(x'-x_0, y')$ となり、修正が行われたことになる。

この方法によれば、再回折法では面倒な方法で作成し

たフィルターも、簡単な写真処理で実現できる利点はきわめて大きい。しかし、実際には P_2 面で得られる $|H|^2$ の変動はきわめて大きく、これを完全にホログラムに記録することは容易ではない。このため、ホログラム用の感光材料の直線域を拡大することが必要であって、Stroke ら⁶⁴⁾はポジティブおよびネガティブの乾板を重ね、マスクングを行なうことによって広い直線域を得る方法を用い、これで $1/|H|^2$ のフィルターを製作した。

また H^* のホログラムの記録については、この方法の適用は分解能の点で難しく、辻内ら⁵⁹⁾は $1/H$ のホログラムの振幅部分と位相部分を分離し、振幅分布は写真処理により、また位相部分はコンピューターホログラムによって作成して好結果を得た。Stroke ら⁶⁵⁾はさらに、 $|H|^2$ の像を $\gamma=1$ のネガ像に撮影して $T_A=1/|H|$ のフィルターを作り、これをホログラム撮影のとき、および再生のとき常に乾板の前におく方法を用い、ほぼ理想的な形の $1/H$ のフィルターを得たと報告している。

また Som ら⁶⁶⁾は一つのホログラムに $G(\omega_x, \omega_y)$ と $H(\omega_x, \omega_y)$ をそれぞれ異なる参照光を用いて二重露光法で記録し、同時に再生して同じ目的を達成する方法を提案している。

もし、 $h(x, y)$ がランダムな分布をもつ関数である場合には、 g_1 として $h(x, y)$ 、 g_2 として $s(x, y)*h(x, y)$ の画像をえらび、これを点光源 $\delta(x, y)$ で再生すれば (13) 式は

$$\begin{aligned} g_2'(x, y) &= s(x, y)*[h(x, y)\star h^*(x, y)]* \\ &\quad \delta(x-x_0, y) \\ &= s(x, y)*\delta(x, y)*\delta(x-x_0, y) \\ &= s(x-x_0, y) \end{aligned} \quad (42)$$

となり、正しい像が再生される。このような性質をもつ $h(x, y)$ としては、ランダムに分布したピンホールによるピンホールカメラがあり、太陽のX線像などの撮影に一つのピンホールカメラのかわりに用いれば、この方法によって n 個のピンホールによって得られる n 個の像を合成することができ、像の S/N を \sqrt{n} 倍にあげる効果がある⁶⁷⁾。

この方法はランダムな $h(x, y)$ の場合だけでなく、一般の PSF の場合にも拡張して考えることができ、 $h(x', y')$ の自己相関関数が $X=Y=0$ のときにピーク値をもつことから、それ相応の分解能の改善が期待できる。この方法には、種々の変形^{68,69)}が考えられ、 g_1 として画像 $s(x, y)*h(x, y)$ 、 g_2 として $\delta(x, y)$ 、再生の g_3 に $h(x, y)$ を用いてもよく、また g_1 として $h(x, y)$ 、 g_2 として $\delta(x, y)$ 、 g_3 として $s(x, y)*h(x, y)$ を用いても同じ結果が得られる。特に後者は、同じ $h(x, y)$

による多数の像処理を行なう場合にはホログラムを一つだけ作ればよいと、実用的である⁷⁰⁾。これは、 $h(x, y)$ がランダムの場合、 $|H|^2=\text{const.}$ となるため、(41)式で得たフィルターの特別な場合と考えればよい。

このような処理による deconvolution の用途はあらゆる分野に考えられるが、上述したマルチプルピンホールによるX線写真⁷¹⁾をはじめ、大口径のピンホールカメラ像の鮮明化⁶⁵⁾、走査形電子顕微鏡像の改良⁷²⁾、などへの応用についての報告がある。

3.3 インコヒーレント光学系による方法

インコヒーレント光学系の OTF $T(\omega_x, \omega_y)$ はレンズの瞳関数の自己相関関数で表わされるため、 $\omega_x=\omega_y=0$ で最大値をとり、deconvolution で要求されるハイパスフィルタリングは実現できない⁷³⁾。

事実、ハイパス・フィルタを $T(\omega_x, \omega_y)$ をフーリエ変換すれば、Fig. 13 に示すように $t(x, y)$ に負の部分が現われ、像に反転部分 (②)の斜線部分が生じるため、インコヒーレント系で実現できないのは当然である。

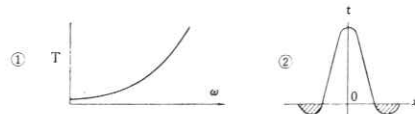


Fig. 13 High-Pass Filter and Its Point Spread Function

Kinoform は、写真感光乳剤に露光を与えて現像後漂白して得られる位相変化を利用した位相フィルターであって、任意の PSF をもつ瞳関数を容易に実現できる特長をもつ、そこで $t(x, y)$ が所要の PSF とすると、定数項 t_0 を導入して

$$t'(x, y) = t(x, y) + t_0 \geq 0 \quad (43)$$

とすると、 $t'(x, y)$ を PSF とするキノフォームを作ることができる。この $t'(x, y)$ を PSF とする光学系で、画像 $q(x, y)$ の像を作れば、

$$\begin{aligned} q'(x, y) &= q(x, y)*t'(x, y) \\ &= q(x, y)*t(x, y) + q(x, y)*t_0 \\ &= q(x, y)*t(x, y) + \text{const} \end{aligned} \quad (44)$$

となり、常数項 $q*t_0$ により若干コントラストは低下するが $q(x, y)*t(x, y)$ は実行できたことになる³⁸⁾。

3.4 写真による方法

Fig. 13 に示すような負強度を実現するために、写真像のポジティブおよびネガティブの関係を利用する方法があり、マスクング⁷⁴⁾と呼ばれている。

今、与えられたコントラストの小さい画像 $q(x, y)$ を写真のポジティブ像に焼付けると、写真像の強度透過率は

$$g_P(x, y) = [1 + \bar{g}(x, y) * t_P(x, y)]^{\gamma_P} \\ = 1 + \gamma_P \bar{g}(x, y) * t_P(x, y) \quad (45)$$

となる。ここで $\bar{g}(x, y)$ は $g(x, y)$ から常数成分を除いた像の光量分布であって、 $0 \leq \bar{g} \leq 1$ とし、 γ_P はポジティブ乾板のガンマの絶対値である。また $t_P(x, y)$ はポジティブ像を焼付けるときの PSF である。同じようにネガティブ像を作ると

$$g_N(x, y) = 1 - \gamma_N \bar{g}(x, y) * t_N(x, y) \quad (46)$$

が得られる。これら二つの像を重ね合わせて積をとると

$$g'(x, y) = g_P(x, y) g_N(x, y) \\ = 1 + \gamma_P \bar{g}(x, y) * t_P(x, y) \\ - \gamma_N \bar{g}(x, y) * t_N(x, y) \quad (47)$$

となる。したがって出力像は

$$T(\omega_x, \omega_y) \\ = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \omega_x = \omega_y = 0 \\ \gamma_P T_P(\omega_x, \omega_y) - \gamma_N T_N(\omega_x, \omega_y) & \omega_x \neq 0, \omega_y \neq 0 \end{array} \right\} \quad (48)$$

で表わされる OTF をもつ光学系で $g(x, y)$ を結像したのと同じことになる。 T_P を平坦な特性に、 T_N をローパス・フィルタにえらび $\gamma_P > \gamma_N$ とすれば、 ω_x, ω_y が大きくなるにしたがい $T(\omega_x, \omega_y)$ が増大し、ハイパス・フィルタリングが行なわれる。これがマスクングであって、 g_N はマスクと呼ばれる。写真のネガ像のかわりに、フォトリソミック感材⁷⁵⁾を用いることもある。

このマスクングは、蛍光板のクエンチング⁷⁴⁾によっても実現できる。Fig. 14 に示すように、一様な紫外線光源 S_{UV} で一様に発光させた蛍光板 F_L から出る光を紫外カットフィルタ F_{UV} を通してネガ N に記録された像 $g(x, y)$ を印画紙 P に焼付けるようになっている。一方、一様な赤外光源 S_{IR} から出て赤外光のみをフィルタ F_{IR} で取出した光で P 越しに N を照明すると、 F_L にややボケた赤外像が投ぜられ、クエンチングによって F_L にはボケたポジ像が現われ、これがはじめにのべた $N \rightarrow P$ の焼付のときにマスクとして働くことになる。この方法は、マスク・プリンターとして製品化されている。

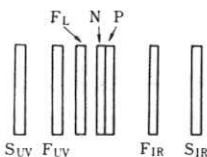


Fig. 14 Masking Printer Using Fluorescence Quenching

写真感光材料にできた潜像に赤外光をあてると、その潜像の濃度が低下する Herschel 効果と呼ばれる現象がある。この現象もマスクングの手段⁷⁶⁾として利用でき、

与えられた画像 $g(x, y)$ を白色光で焼付け、その上に重ねて赤色光によって $g(x, y)$ の若干ボケた像を重ね写しすることにより、後者の像がマスクとして働き、目的が達成できる。この場合の感光材料としては Herschel 効果の大きい Kodak Auto Positive を用いるとよい。

写真乳剤には、現像液がゼラチン内での拡散が十分行なわれないために生じる現象として Eberhard 効果⁷⁷⁾がある。これは画像のうち、同じ露光をうけた微小面積の像の濃度が面積の大きい部分より大きくなる現象であって、そのままマスクングにつながる。しかし、この場合任意の形の OTF とすることはできないので、処理技術としての用途は小さい。

3.5 光電測定を利用する方法

画像を光電変換素子を用いて走査することによって時間的信号に変え、エレクトロニクスによって処理する方法である。このとき、ハイパスフィルタリングを行なうため、Fig. 13 に示した負強度を含む PSF $t(x, y)$ を光電的に実現し、 $t(x, y)$ によるコンボリューション演算を行なうように考えられている。

このような方法は Dumontet⁷⁸⁾ が 1 次元画像について原理的な実験を行なったのが最初であるが、その後多くの方法が提案されている。Fig. 15 は LogEtronics 社で製作された電子引伸器⁷⁹⁾といわれるもので、フライングスポット管 F_s で照明された原板 P が引伸レンズ L によって印画紙 P' 上に投影されているが、その光線束の一部を半透鏡 M で取出し、フォトマルチプライヤ P_M で検出し、増幅器 A を経て F_s の輝度に負帰環を行なう。この方法では、フライングスポット管のスポットの P 面上でのひろがりのフーリエ変換を $H_F(\omega_x, \omega_y)$ とすれば、全体の OTF は

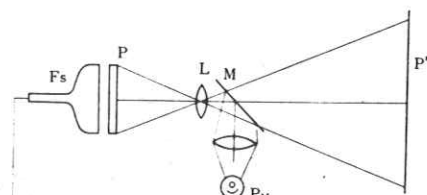


Fig. 15 Electronic Enlarger

$$T(\omega_x, \omega_y) \\ = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \omega_x = \omega_y = 0 \\ 1 - \frac{C}{1-C} H_F^2(\omega_x, \omega_y) & \omega_x \neq 0, \omega_y \neq 0 \end{array} \right\} \quad (49)$$

という形で表わされる。 C は帰還増幅器の利得である。したがって H_F の形と C のえらび方でハイパス・フィルタリングが可能となるわけである。

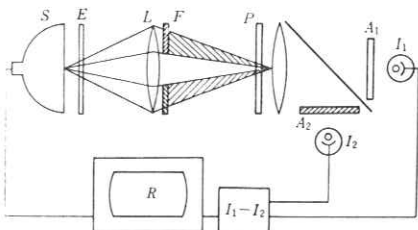


Fig. 16 Flying-Spot Image Processor (Tsujiuchi)

テレビジョンのシステムはこのような処理に利用しやすいのでよく使われる。Cheatham ら⁷⁹⁾ は OTF の異なる二台のテレビカメラで与えられた画像を撮影し、その信号の引算を行なうことによってマスキングと同様の処理を行なうことを提案した。辻内⁸⁰⁾もフライングスポット管を用い、Fig. 16 に示すような装置により同様の実験を行なった。すなわち、フライングスポット管 S の光電面を偏光板 E とレンズ L を用いてやや焦点を外して画像を記録した原板 P に結像し、L の瞳にはドーナツ形の $1/2$ 波長板をおいて L の中心部を通る光線束と周辺部を通る光線束（斜線で示した）が直交する偏光となるようにする。P の後には直交した偏光板を持った 2 組の積分光度計 I_1, I_2 をおき、中心部の光線束は I_1 、周辺部の光線束は I_2 で受光し、その差 $I_1 - I_2$ を求めてモニタ

ー R に出すようになっている。

Stroke ら⁸¹⁾ は Fig. 17 に示すような装置により、ホログラムで実現した $1/H$ の瞳関数をもつ光学系の PSF を作り、これで画像を走査し、その透過光を積分光度計で受光し、出力信号で輝度変調したランプ L の像を同期して動く印画紙の上に記録した。この方法は $1/H$ の PSF をコヒーレント光学系で実現しながら、コンボリューションをその光学系で行なわず、光電的方法を用いたところに興味がある。

画像に対するコンボリューション処理を行なう最も典型的な方法は、複合開口による像面の走査である。これには、Fig. 13 に表した負強度を含む PSF $t(x, y)$ を近似的に実現するため、たとえば Fig. 18 に示すように走査開口を 3×3 のマトリックス状に分割し、おのこの開口に荷重関数 $t_0 \sim t_8$ と符号を与えて、これらの各開口からの信号の総和をとって一つの信号を得ようになっている。このような複合開口による走査は、1 次元画像に対し、Dumontet⁷⁸⁾ によって素朴な形で行なわれたが、Abraham⁸²⁾ らは Channeltron と名づける、 3×3 個のマトリックス状の陽極をもつ撮像管を製作し、画像の鮮明化に成功している。この場合には、TV システムとともにオンライン処理にも利用できる。

辻内⁸³⁾ らは複合開口をオプティカルファイバー束で実

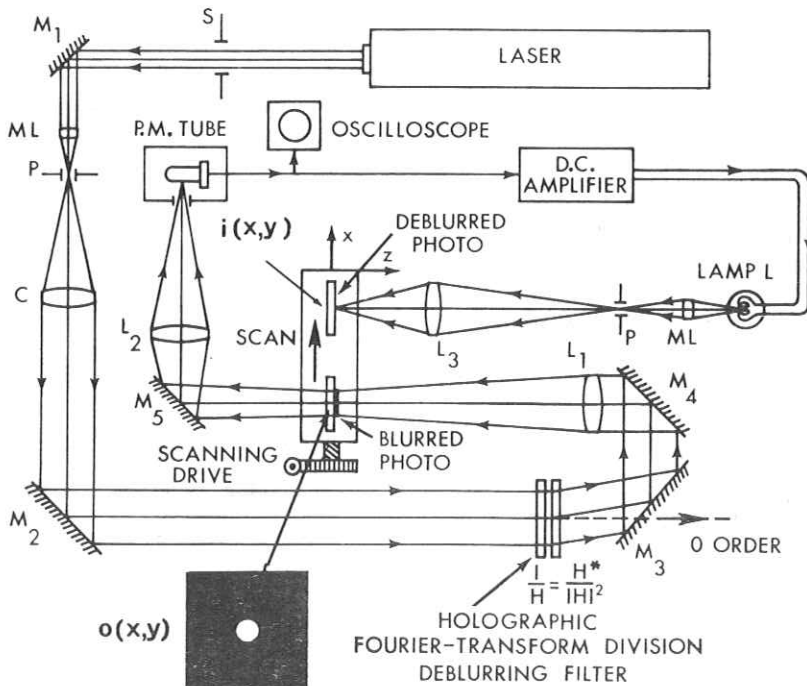


Fig. 17 Laser-Scanning Image Processor (Stroke, Halioua, Indebetouw and Poisson)

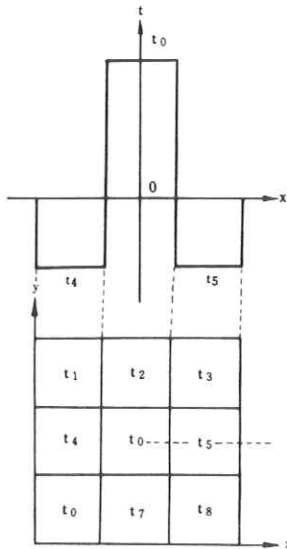


Fig. 18 Matrix Representation of Point Spread Function

現し、各開口に1個ずつのフォトトランジスターを用い、それらの利得を調節して荷重を与え、信号の検出を行ない、その和を求めてコンボリューションを得た。この装置は電送写真の装置を改造したもので、入力は印画である。

Swindell⁸⁴⁾ も複数個のフォトトランジスターにより、透明なドラムにまきつけた画像に対し同様な走査を行っている。Simon⁸⁵⁾ らの同心円開口も同様の目的をまっている。

このような複合開口を用いる方法に対し、画面全体をわずかずつずらして重ね、同様の効果を得た報告⁸⁶⁾がある。これは、像蓄積管を用い、まず Fig. 18 に示した複合開口の t_0 に相当する利得で画像を記録し、次に $t_0 t_1$ だけ偏向コイルで画像をずらし、 t_1 の利得で記録するというように $t_1 \sim t_8$ のすべてについて順次記録した後、全部を一度に読出すことによって、その総和を求め、コンボリューションを得る方法である。

このように像面走査は種々の方法が用いられるが、問題はこれらの複合開口にどのような荷重関数を与えるかということである。これには $t(x, y) = F^{-1}\{1/H\}$ に比例する荷重関数を与えることが望ましいが、実際的には開口の数と大きさ、配列方法などの制限のため、実際の装置について最適の荷重関数を求めなければならない。

Swindell⁸⁴⁾ は、一次元演算用として Fig. 19 に示すように N 個の素子を等間隔に配列した開口を考え、それ

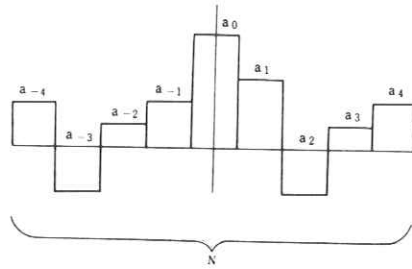


Fig. 19 Determination of Weighting Function of Scanning Multiple Aperture

ぞれの荷重を a_n とおくと、与えられた PSF $h(x)$ に対し、この複合開口をコンボリュートしたとき、得られる関数ができるだけ $\delta(x)$ に近いことを条件に a_n の係数をきめる方法を用い、 $h(x)$ がガウス曲線状の場合に対し、21素子の開口について計算を行なっている。辻内⁸⁷⁾ からも同様の考えにより、一次元の流れ写真で PSF が $2a$ の幅をもつ場合について、空間周波数 ω が $0 \sim 1/a$ の範囲で $H(\omega)T(\omega)$ ができるだけ平坦になることを条件に等間隔の7素子開口の荷重関数を求めたのが Fig. 20 ①である。この結果から開口の荷重関数は、2組の微分素子を $2a$ の間隔をおいて対称に配置したものきわめて近いことがわかる。一方この場合のインバース・フィルタ

$$T(\omega) = \frac{2\pi a \omega}{\sin 2\pi a \omega} \quad (50)$$

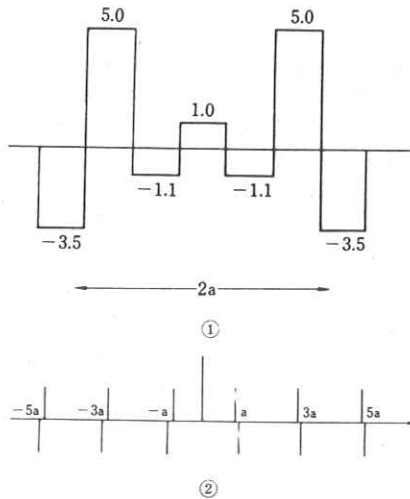


Fig. 20 Weighting Function of Scanning Multiple Aperture for Laterally Moved Image (Tsujiuchi, Ishiguro and Honda)

- ① Seven Elements Aperture
- ② Analytical Solution

は、一般にはフーリエ変換はできないが、超関数としてフーリエ変換を行なえば

$$t(x) = -\frac{\pi}{4} \delta'(x) * \left[\sum_{-\infty}^{+\infty} \delta\{x - (2K-1)a\} \operatorname{sgn}(x) \right] \quad (50)$$

となり、Fig. 20 ②のような形となる。すなわち微分素子を $2a$ の間隔をおいて無限に並べたもので、①はそのうちから $(a, -a)$ の一対のみを取出したものと考えることができる。①のような開口を $\pm\infty$ の範囲で実現することは不可能なため適当な幅で打切ると、その幅の倍の位置に反転したゴーストが生じる。そこでこのゴーストの影響を小さくするため、荷重関数にガウス曲線状のマスクをかけて apodisation を行ない、さらに微分素子のうち正素子をわずかに強くして修正効果をやや落し、観察しやすい出力画像を得るように配慮されている。

3.6 コンピューターによる処理

これまでのアナログ的な手法は、そのままデジタル手法におきかえることができ、コンピューターによる処理が実行されている。

コンピューターによる処理では、画像は適当な間隔で標本化され、各標本における強度分布、振幅分布などを測定したのち AD 変換を行ない、デジタル量に変換した後コンピューターのメモリーに入れる。このとき必要があれば、たとえば写真像へ光学像を記録するときの非線形性などを補正することができる。演算は振幅、強度、濃度などのいずれの量でも、線形、非線形を問わず実行でき、また他の方法では困難であった space variant な処理も容易に実行できる。演算が終了すれば、これを画像としてディスプレイする必要があり、種々の方法が用いられている。この種の装置は、カリフォルニア工科大学のジェット推進研究所⁸⁸⁾および大阪大学工学部⁸⁹⁾から報告されている。

コンピューターによる画像処理においても、画像のフーリエ・スペクトル $G(\omega_x, \omega_y)$ に $T(\omega_x, \omega_y)$ を掛算する方法、画像 $g(x, y)$ に $t(x, y)$ をコンボリュートする方法の二つが用いられる。画像のフーリエ・スペクトルは、高速フーリエ変換 (FFT)⁸⁹⁾ によったとして、像 \rightarrow スペクトル \rightarrow 像の 2 回のフーリエ変換を必要とし、標本点数を N^2 にえらべば、全体の計算時間は

$$T_F = T_0(8N^2) \log_2 N \quad (52)$$

で表わされる。 T_0 は一つの標本点についての計算時間である。一方コンボリューションの場合にも FFT の場合と同様に高速計算を行なうアルゴリズムを用いれば、 $t(x, y)$ を M^2 の標本点数に分割したとして

$$T_C = T_0 N^2 2M \quad (53)$$

が得られる。したがって、どちらの方法をとるかは T_F

と T_C の時間の多少によって決めることが多く、 $M > 4 \log_2 N$ であればフーリエ変換法が、そうでなければコンボリューションが用いられる⁹¹⁾。

このような方法の外に、コンピューター特有の処理方法がいくつか報告されている。Harris⁹²⁾ は x 方向の一次元の流れ写真の処理に際し、流れの大きさ $2a$ より小さい大きさの物体についてまず x 方向に微分することによって、 $2a$ だけ間隔があった正および負の像を求め、次に負の像の符号を反転させ $2a$ だけずらして他方の正の像と重ねて平均し、よい結果を得ている。また Slepian⁹³⁾ は、一次元流れ写真に対し、像全体の大きさを L 、流れの大きさを $2a$ 、 $2a < L$ とすれば、 $|x'| \leq L$ の x' について

$$g(x') = \int_{x'-2a}^{x'} s(x) dx \quad (54)$$

で与えられることから

$$s(x') = g'(x') + s(x' - 2a) \quad (55)$$

が得られる。そこで $-L - 2a \leq x' \leq -L$ の区間で $s(x)$ の値 $\varphi(x)$ がわかっていれば (55) によって $-L \leq x \leq -L + 2a$ に対して $s(x)$ がわかり、さらにその値を用いて

$$s(x) = \sum_{j=0}^K g'(x - 2ja) + \varphi[x - 2(K+1)a] \\ -L + 2Ka \leq x \leq L \quad (56)$$

のように順次画像を回復してゆく方法を提案している。

画像に雑音が混入した場合には、像の強度分布が不確実になり、そのまま処理をつづけるとかえって不完全な結果となる。入力が写真画像からの場合、標本点の強度を測定する開口は、粒子の影響をうけないように、粒子の雑音の rms の 3 倍程度にえらんでいるが、もちろんこうしても雑音をまったく遮断することはできない。このようなとき、入力像 $g(x, y)$ 、物体 $s(x, y)$ 、PSF $h(x, y)$ の分布についてある制限を設け、 $s(x, y)$ の存在する範囲を n 次元空間内で solution solid として定義し、この中に一点を求めてからこれを solid の重心点へ移しながらその像をディスプレイし、これを観察しながら必要に応じて制限条件を修正し、再び同じ方法をくり返ししながら最適解を求めてゆく方法⁹⁴⁾が提案されている。この方法は、いわゆる man-machine system による deconvolution 処理ということができる。

コンピューターによる画像処理は、空気のゆらぎによる不鮮明像の処理⁹⁵⁾、人工衛星から撮影した天体写真の処理⁹⁶⁾などに用いられる外、医学用 X 線写真の処理⁹⁷⁾にも大きい役割を演じつつある。

4. む す び

画像処理は、従来の時系列信号を中心とした演算処理

技術の中に、空間情報の演算という問題を持ち込んだ新しい領域であって、これまでのべて来たように、一つの目的に対しても数多くの並列した方法が考えられ試みられている。このことは、画像に対する情報処理の必要が増大していることを表わしているのはいうまでもないが、新しい処理技術を求める模索がつづけられていることをも表わしている。情報処理の万能選手であるコンピューターもこの分野に関してはまだ必ずしも得意ではなく⁹¹⁾それに代るべき信頼できる方法も見付からないため、各方面からのアプローチが行なわれ、この分野を魅力ある研究対象に仕立てている。すでに、コンピューターほどの汎用性はないが、用途に限った処理では、少しずつ実用段階に近づくつつある技術が誕生し、今後の研究の見通しを明るくしていることも事実である。

本稿では紙数の都合で、対象を相関と像修正のみに絞って紹介したが、関連する論文で割愛したものも少なくないし、もちろん画像処理の全貌を明らかにしたわけでもない。本稿で洩れたり、またはまったく取扱わなかった画像処理の部分に関しては、Cutrona⁹²⁾、Vander Lugt⁹³⁾、Huang¹⁰⁰⁾、Lohmann¹⁰¹⁾などの論文、Shulman¹⁰²⁾、Rosenfeld¹⁰³⁾の著書などを参考にして補っていただければ幸である。

文 献

- 1) J. M. Robertson: *Nature* **152** (1943) 411.
- 2) W. Meyer-Eppler: *Optik* **1** (1946) 465.
- 3) L. Bragg: *Nature* **154** (1944) 69.
- 4) P. L. Jackson: *Appl. Optics* **6** (1967) 1272.
- 5) E. L. Green: *Appl. Optics* **7** (1968) 1237.
- 6) L. S. G. Kovásznyai and A. Arman: *Rev. sci. Instrum.* **28** (1957) 793.
- 7) B. Felstead: *Appl. Optics* **7** (1968) 105.
- 8) D. McLachlan Jr.: *J. Opt. Soc. Amer.* **52** (1962) 454.
- 9) M. King, W. R. Bennett, L. B. Lambert and M. Arm: *Appl. Optics* **6** (1967) 1367.
- 10) E. N. Leith and J. Upatnieks: *J. Opt. Soc. Amer.* **53** (1963) 1963.
- 11) たとえば、宮嶋一男: 雑音解析(朝倉書店, 1961) 112.
- 12) A. Vander Lugt: *IEEE Trans. Information Theory* **IT-10** (1964) 139.
- 13) A. Kozma and D. L. Kelly: *Appl. Optics* **4** (1965) 387.
- 14) A. Vander Lugt: *Appl. Optics* **5** (1966) 1760.
- 15) A. Vander Lugt: *Appl. Optics* **6** (1967) 1221.
- 16) A. Vander Lugt, F. B. Rotz and A. Klooster Jr.: *Optical and Electro-Optical Information Processing*, ed. J. T. Tippett *et al.* (MIT Press, 1968) 125.
- 17) S. Lowenthal et Y. Belvaux: *CR Acad. Sci. (Paris)* **263 B** (1966) 413.
- 18) A. Vander Lugt and F. B. Rotz: *Appl. Optics* **9** (1970) 215.
- 19) H. J. Caulfield and W. T. Maloney: *Appl. Optics* **8** (1969) 2354.
- 20) Technical Note of Electro-Optics Center, Radiation Inc.
- 21) J.-Ch. Viénot et J. Bulabois: *Rev. Opt.* **44** (1966) 621.
- 22) V. V. Horvath, J. M. Holeman and C. Q. Lemon: *Laser Focus* **3** (1967) No. 11, 18.
- 23) J. Tsujiuchi, K. Matsuda and N. Takeya: *Applications of Holography* ed. E. S. Barrekette *et al.* (Plenum Press, 1971) 247.
- 24) E. Marom: *Bendix Tech. J.* **2** (1969) No. 2, 39.
- 25) F. B. Rotz and M. O. Greer: *IEEE J. Quantum Electronics* **QE-7** (1971) 323.
- 26) S. J. Krulikoski Jr., D. Kowalski and F. R. Whitehead: *SPIE J.* **9** (1971) 104.
- 27) D. Gabor: *Optica Acta* **13** (1966) 293.
- 28) A. W. Lohmann and H. W. Werlich: *Phys. Letters* **25A** (1967) 570.
- 28) A. W. Lohmann, D. P. Paris and H. W. Werlich: *Appl. Optics* **6** (1967) 1139.
- 30) D. Gabor: *Nature* **208** (1965) 422.
- 31) A. Dickinson: *Marconi Rev.* **30** (1967) 40.
- 32) B. M. Watrasiewicz: *Nature* **216** (1967) 302.
- 33) M. Nakajima, T. Morikawa and K. Sakurai: *Appl. Optics* **11** (1972) 362.
- 34) M. Treheux: *Applications de l'Holographie* ed. J.-Ch. Viénot *et al.* (Université de Besançon, 1970) 13-3.
- 35) S. Lowenthal et A. Werts: *CR Acad. Sci. (Paris)* **266 B** (1968) 542.
- 36) G. Groh: *Appl. Optics* **8** (1969) 967.
- 37) A. W. Lohmann and H. W. Werlich: *Appl. Optics* **10** (1971) 670.
- 38) J. C. Patau, L. B. Lesem, P. M. Hirsch and J. A. Jordan: *IBM J. Res. Developm.* **14** (1970) 485.
- 39) W. T. Maloney: *Appl. Optics* **10** (1971) 2127.
- 40) J. D. Armitage and A. W. Lohmann: *Appl. Optics* **4** (1965) 461.
- 41) M. De and A. W. Lohmann: *Appl. Optics* **6** (1967) 2171.
- 42) C. K. Rushforth and R. W. Harris: *J. Opt. Soc. Amer.* **58** (1968) 539.
- 43) D. Slepian, H. O. Pollak and H. S. Landau: *Bell Syst. Tech. J.* **40** (1961) 43, 65, **41** (1962) 1295.
- 44) C. W. Barnes: *J. Opt. Soc. Amer.* **56** (1966) 575.
- 45) B. R. Frieden: *J. Opt. Soc. Amer.* **57** (1967) 1013.
- 46) C. L. Rino: *J. Opt. Soc. Amer.* **59** (1969) 547.
- 47) A. Maréchal et P. Croce: *CR Acad. Sci. (Paris)* **237** (1953) 607.
- 48) E. L. O'Neill: *IRE Trans. Information Theory*

- IT-2** (1956) 56.
- 49) J. Perina and J. Kvapil: *Optik* **28** (1968/69) 575.
 - 50) C. W. Helstrom: *J. Opt. Soc. Amer.* **57** (1967) 297.
 - 51) D. Slepian: *J. Opt. Soc. Amer.* **57** (1967) 918.
 - 52) L. Levi: *Optica Acta* **17** (1970) 59.
 - 53) Mme M. Angénioux-Laffitte: *Rev. Opt.* **43** (1964) 573.
 - 54) J. Tsujiuchi and G. W. Stroke: *Applications of Holography* ed. E. S. Barrekette *et al.* (Plenum Press, 1971) 259.
 - 55) A. Maréchal, P. Croce et K. Dietzel: *Optica Acta* **5** (1958) hors série, 256.
 - 56) P. Croce: *Rev. Opt.* **35** (1956) 569. 642.
 - 57) H. Wieder, R. V. Pole and F. Heidrich: *IBM J. Res. Developm.* **13** (1969) 169.
 - 58) J. Tsujiuchi: *Optica Acta* **7** (1960) 243, 385, **8** (1961) 161. *Progress in Optics Vol. II* ed E. Wolf, (North Holland Pub. Co., 1963) 131.
 - 59) J. Tsujiuchi, T. Honda and T. Fukaya: *Optics Commun.* **1** (1970) 379.
 - 60) J. L. Horner: *Appl. Optics* **9** (1970) 167.
 - 61) T. M. Holladay and J. D. Gallatin: *J. Opt. Soc. Amer.* **56** (1966) 869.
 - 62) T. M. Holladay and P. G. Roetting: *J. Opt. Soc. Amer.* **59** (1969) 460.
 - 63) G. W. Stroke and R. G. Zech: *Phys. Letters* **25A** (1967) 89.
 - 64) G. W. Stroke, F. Furrer and D. R. Lamberty: *Opt. Commun.* **1** (1969) 141.
 - 65) G. W. Stroke and M. Harioua: *Phys. Letters* **33A** (1970) 3.
 - 66) S. C. Som and A. Boivin: *Opt. Commun.* **1** (1969) 67.
 - 67) G. W. Stroke, G. S. Hayat, R. B. Hoover and J. H. Underwood: *Opt. Commun.* **1** (1969) 138.
 - 68) G. W. Stroke: *Phys. Letters* **27A** (1968) 405.
 - 69) G. W. Stroke: *Optica Acta* **16** (1969) 401.
 - 70) G. Groh and G. W. Stroke: *Opt. Commun.* **1** (1970) 339.
 - 71) G. W. Stroke: *Phys. Letters* **28A** (1968) 252.
 - 72) D. J. Evins, S. H. Mohr, A. J. Saffir, M. Halioua, G. Indebetouw, F. Poisson and G. W. Stroke: *Phys. Letters* **33A** (1970) 377.
 - 73) H. H. Hopkins: *Proc. Roy. Soc.* **A217** (1953) 408.
 - 74) A. Lohmann: *Optica Acta* **6** (1959) 319.
 - 75) 井早和彦: 第12回応用物理学連合講演会予稿集 (1965) No. 1, 268.
 - 76) D. H. Kelly: *J. Opt. Soc. Amer.* **50** (1960) 269.
 - 77) 佐柳和男: *応用物理* **29** (1960) 155.
 - 78) P. Dumontet: *Optica Acta* **3** (1956) 145.
 - 79) T. P. Cheatham and A. Kohlenberg: *National Convention of IRE* (1954)
 - 80) J. Tsujiuchi: *Preprint of Congrès sur les progrès récents en optique physique* (1966) 90.
 - 81) G. W. Stroke, M. Halioua, G. Indebetouw and F. Poisson: *Opt. Commun.* **1** (1970) 355.
 - 82) J. M. Abraham, C. E. Catchpole and G. W. Goodrich: *SPIE J.* **6** (1968) 93.
 - 83) 辻内順平, 木田捷夫, 石黒俊平: 第2回画像工学コンファレンス論文集 (1971) 65.
 - 84) W. Swindell: *Appl. Optics* **9** (1970) 2459.
 - 85) J. Simon et A. Roussel. *CR Acad. Sci. (Paris)* **273B** (1971) 450.
 - 86) J. K. Hawkins and C. J. Munsey: *J. Opt. Soc. Amer.* **57** (1967) 914.
 - 87) 辻内順平, 石黒俊平, 木田捷夫: 第19回応用物理学連合講演会予稿集 (1972) No. 1, 27.
 - 88) F. C. Billingsley: *Proceedings of Computerized Imaging Techniques Seminar, SPIE* (1967)
 - 89) Y. Ichioka, M. Izumi and T. Suzuki: *Appl. Optics* **10** (1971) 403.
 - 90) J. W. Cooley and J. W. Tukey: *Mathematics of Computation* **19** (1965) 297.
 - 91) T. S. Huang and H. L. Kasnitz: *Proceedings of Computerized Imaging Techniques Seminar, SPIE* (1967)
 - 92) J. L. Harris Sr.: *J. Opt. Soc. Amer.* **56** (1966) 569.
 - 93) D. Slepian: *Bell Syst. Tech. J.* **46** (1967) 2353.
 - 94) D. P. MacAdam: *J. Opt. Soc. Amer.* **60** (1970) 1617.
 - 95) B. L. McGlamery: *J. Opt. Soc. Amer.* **57** (1967) 293.
 - 96) R. Nathan: *Pictorial Pattern Recognition* ed. G. C. Chen *et al.* (Thompson Book Co., 1968) 239.
 - 97) R. H. Selzer: *NASA Tech. Report No. 32-1028* (1966)
 - 98) L. J. Cutrona, E. N. Leith, C. J. Palermo and L. J. Porcello: *IRE Trans. Information Theory* **IT-6** (1960) 386.
 - 99) A. Vander Lugt: *Optica Acta* **15** (1968) 1.
 - 100) T. S. Huang: *Opto-Electronics* **1** (1969) 49.
 - 101) A. W. Lohmann and D. P. Paris: *Appl. Optics* **7** (1968) 651.
 - 102) A. R. Shulman: *Optical Data Processing* (J. Wiley and Sons, 1969)
 - 103) A. Rosenfeld: *Picture Processing by Computer* (Academic Press, 1969)

リアルタイムによるX線像の空間周波数 スペクトルの解析

日大齒・放 西 岡 敏 雄

1. はじめに

X線写真の相重なる像形成要素の不規則な分布に対して、診断のために必要な画像信号の抽出には、空間周波数スペクトルの手法が有用であり、その測定にはこれまで、フランホーフェ回析による法およびフーリエ変換による法などがあって、それぞれの結果はすでに数多く述べられている。

更には今後も、X線像の自動診断のために幾多の試行が行われるであろうと考えられる。一方、临床上に要求される情報処理の即時性も重要な課題の一つであり、この方面の努力も併せて行なう必要がある。

今回は、X線画像の自己相関関係およびスペクトル密度は粒状性の場合と同様に考えることができることから、オンライン、リアルタイムによる画像スペクトル密度推定のためのシステムを設計し報告した。

2. 方 法

X線写真の粒状性等は電気通信系における雑音とみなし、等方的で定常な時系列であると考えると、画像は等方的でもなく定常でもない信号パターンとみなすことができる。

そこで従来は、雑音と信号がたがいに独立で、その間に相関のない場合が多く取り扱われてきた。例えば均一に露光されたフィルムや蛍光板を測定し、そのウイナースペクトルを問題にしてきたが、濃度分布が情報をもっている時の考察はすくなく、この点、それ自体を一般調和解析により取り扱う必要があるかと考える。

(1) システム

X線写真をマイクロデンシトメータPDS-15Sの自動走査により濃度信号をJRA-5小型デジタル電子計算機内蔵のAD変換器にオンラインで入力し、計算結果をCRT管、デジタルプロッター、テレタイプに表示するシステムを使用した。また画像スペクトル推定

に必要な定数の設定は、すべて計算機との対話形式によって行なった。

(2) パラメータの設定

X線写真は横巾40mmのデンタルフィルムを使用し、0.08mm毎のサンプリング間隔で、標本点は500点とし、最高周波数 $1/2 \Delta mm$ を6.25本まで求めた。濃度計の走査スリット巾は $50 \mu \times 100 \mu$ を使用した。

(3) 計算過程

X線像の自己相関関数を求めることは、濃度曲線の中の相離れた2点間の相関を考える方法であり、それら2点間における変動の大きさの積を曲線のすべての点について求めるもので、それだけでも平均的な濃度曲線の情報の推移を知る上で一定の有効性をもつであろうと考え、更に得られたコレログラムから、そのフーリエ変換によってパワースペクトルを求め、周波数領域での情報を得た。

スペクトル解析のためには、次の演算式を用いた(Akaike, H. 1964)。

a. 自己相関関数

濃度信号の最大標本点(M)を500点とし、相関関数の最大遅延(l)は1/10までとした。

すなわち、nを1からMまでとすると濃度信号の振巾値 $x(n)$ についての直流分のカット、および移動平均は

$$g(x) = \sum_1^n F(x) - f(x) \quad (1)$$

$$h(x) = \frac{1}{3} g(x-1) + \frac{1}{3} g(x) + \frac{1}{3} g(x+1) \quad (2)$$

で求め、自己相関関数は

$$C_{xx}(l) = \frac{1}{M-l} \sum_{n=1}^{M-l} (l+n) x(n) \quad (3)$$

$$l = 0, 1, 2, \dots, 50$$

で求まる。

b. 相関関数のフーリエ変換

(3)式のフーリエ変換によって求まるパワースペクトルは

$$\bar{P}_{xx}(F) = \Delta_{mm} \left\{ C_{xx}(0) + 2 \sum_{l=1}^{50} C_{xx}(l) \cos 2\pi Fl + (-1)^r C_{xx}(l) \right\} \quad (4)$$

$$r = 0, 1, 2, \dots, 50$$

さらに S/N を向上させるための係数 { a_m } をスペクトル窓として用いた各周波数についてのスペクトル推定値は

$$\hat{P}_{xx}(F) = \sum_{n=0}^k a_n \bar{P}_{xx}(F) \quad (5)$$

a_n	a_0	a_1	a_2	a_3
W_1	0.5 1 3 2	0.2 4 3 4	0.	0.
W_2	0.6 3 9 8	0.2 4 0 1	-0.0 6 0 0	0.
W_3	0.7 0 2 9	0.2 2 2 8	-0.0 8 9 1	0.0 1 4 9

として算出した。

(4) データ処理プログラム

以上の計算過程は、図 1 に示すフローチャートの手順で実行される。主記憶容量の制約のために、各過程ごとに分割処理を行なった。

はじめに、計算機との対話形式で、許容範囲のパラメータが、タイプライターから与えられ、次々に条件の設定が行われる。上記の計算過程で述べたように、F は周波数の序列を表わしているので、これはパラメータ指定のところ、実際の周波数に換算され、 Δf および f_{max} として前もって、自動的に計算機がタイプライターによって打ち出してくる。実際の標本長さ、最大遅延距離、遅延ステップ間隔などについても同様である。許容限界を越えたパラメータが与えられると、計算機から再度、問ただしがおこなわれる。また必要とするパラメータはすべて、計算機から問ただされるので、指定落ちのおそれがない。

パラメータの指定が終わると、濃度計からの信号を A-D 変換し、変換が終わると自動的に入力波形が D-A 変換され、CRT で表示される。この際、診断に必要な病態像でなければ、入力をしなおすことができる。

相関関数の演算では、はじめに信号の振巾総和を求めて、各標本点から引き、いわゆる直流分を取除き、移動平均の演算をする。また、自己相関関数は遅延が 0 の時点で 1 となるように基準化される。次いでコレログラムのフーリエ変換、スペクトル平滑化が行われる。

以上の処理が終了したのち、必要なデータはテレタイプに、また、CRTあるいはデジタルプロッターによって図として描出される。

3. 結 果

画像の一次元パワースペクトルは、濃度信号の変動のもっている振巾の強さと、周波数の関係を、非常にわかりやすく示しうる特長があり、空間周波数を横軸に、振巾の強さをタテ軸にとって、その分布から、ある周波数に対してその振巾の強さがいくらかであるかを具体的に示すことができた。歯のX線写真についての解析例を図3、4、5に示したが、濃度信号、コレログラム・パワースペクトルの順である。

4. おわりに

X線像の自動診断への途にある画像処理は勿論、多次元の解析が究極でもあるが、今回はそれへの拡張の前段階でもあり、装置の経済性、処理の迅速性から眺めた一次元処理の有効性を検討した。

今後、種々の病態像について、比較的容易に、しかも多面的に実施できる見通しを得ることができたが、さらに演算処理の精度や、統計的な信頼度の検討を考えたい。

5. 文 献

1. 磯部 孝編；相関関数およびスペクトル，東大出版会
2. 赤池弘次；時系列分析，統計数理研講習会教本，1971
3. 赤池弘次他；統計的解析と制御，サイエンス社，1972
4. 佐柳和男他；印写工学（画像解析），共立出版，1970
5. 竹中栄一；放射線像の空間周波数スペクトルと像処理，日医放雑誌，31，6，1971

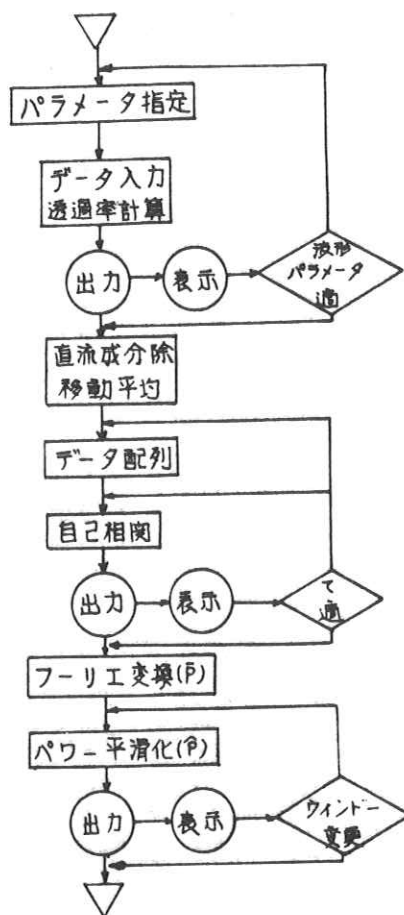
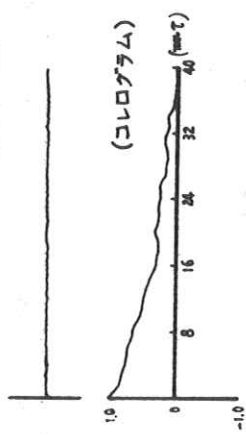
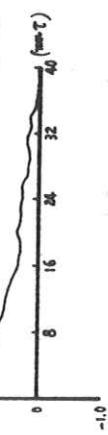


図1. 処理手順

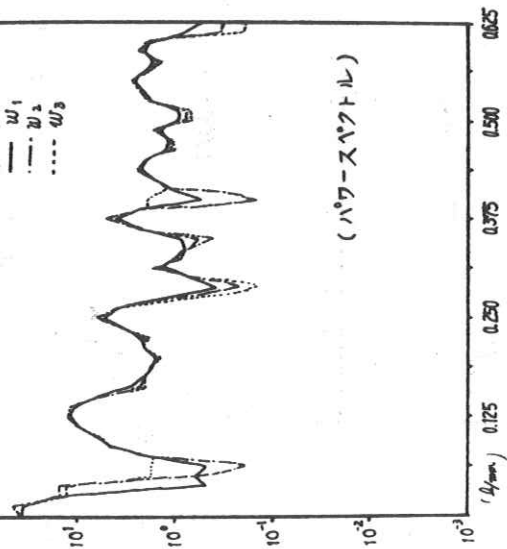
(濃度信号)



(コログラム)

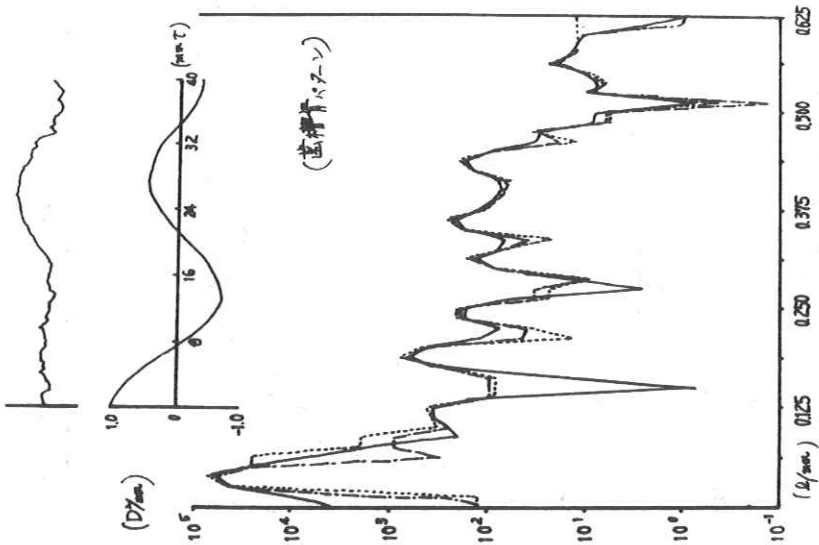


新電子パワースペクトル



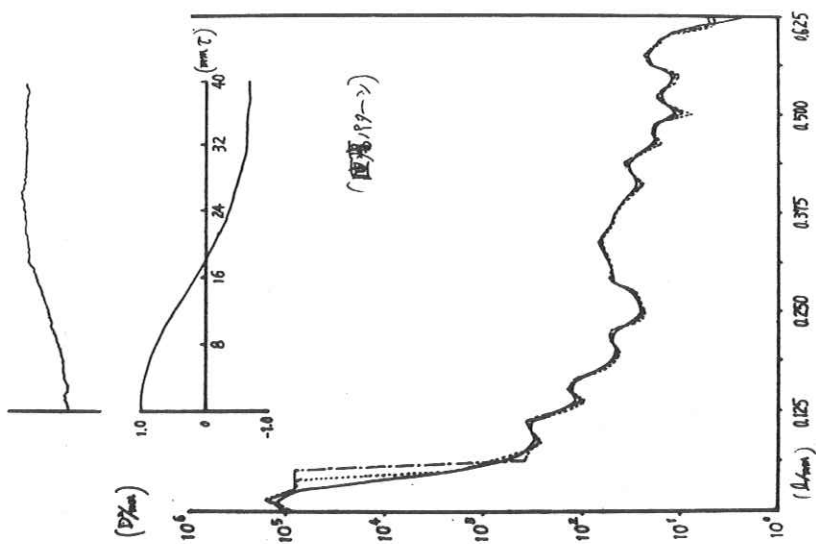
(パワースペクトル)

☒ 2

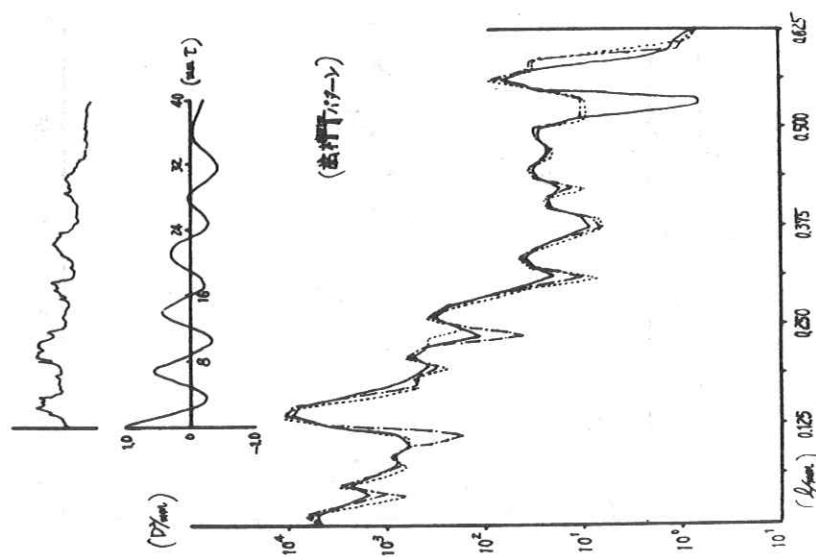


(塩漬骨パワースペクトル)

☒ 3



☒ 5



☒ 4

X線用テストチャート板の開発上の諸問題

株式会社 伊藤放射線機器研究所

酒 井 光 明

1. 概 要

X線撮影系において、あらかじめ知られている本数/mm (空間周波数) をX線撮影し、入力から出力に至る過程の変調度合を究明するためのテストチャート板の、開発ならびにその製造面から種々検討した。

又、テストチャート板による解像力の測定方法からも検討を加えた。

2. X線撮影系の分類とそれに適合せるテストチャート板の必要条件

分 類	判別可能周波数	適合チャート板 (名称)	判定方法
X線-TV系	0.25 ~ 1.0 LP/mm	R-3T	MTFも含む
直接撮影系	0.5 ~ 5.0 "	R-1系	"
間接撮影系	0.7 ~ 2.0 "	K-2	視力判定
特殊 (拡大, 微細)	15 "	R-4系	MTF等
増感紙	15 "	"	"
フィルム	20 以上	"	"

表 - 1

表-1に示す通り、X線撮影系の分類とテストチャート板との関係は非常に密接な関係があり、それぞれの撮影目的に応じたテストチャート板が必要である。

このため前記の分類と適合チャート板の表-2では単に本数/mmのみを記したが、撮影条件によって、テストチャート板の金属質や厚みが問題になる。

たとえば、X線管電圧を上げることによってフィルム上でのテストチャート像の明暗のコントラストの濃度差を0.7~1.5 (此の間が最も解像力が良い) を得るには、当然X線吸収率の大きい金属でなければならない。

又、その測定にあたって容易に使用出来るものでなければテストチャートとしての価値がない。

即ち、テストチャート板のパターンの条線等の配列である。

解像力を測定する目的に従来まで採用されているテストチャートの図柄は各種のものがあるが、最近はこちらのものが統一化されつつあり、日本放射線機器工業会技術部会のファントム・チャート委員会でもJIS化の方向として、間接用チャート、X線テレビ用チャート等は統一規格化される方向にある。(X線間接撮影機JIS Z 4091の合成解像力試験法等の規格改正)

又、NBS (National Bureau of Standard)等でも写真レンズ等の撮影解像力用のテストチャートとして図柄を発表している。

更にNBSでは、ハンドブックにX線用のテストチャート類の資料を発表している。

即ち図-1に示すように、3本の平行線を並べたもので、その内の一組は、他の組とたがいに直交する方向に置くものが多い。

又、X線撮影して、解像力の測定上の便宜(Micro-densitometerを使用する場合、線の中に対してある長さが必要)や製造的考慮が必要である。

条線の長さはそのピッチ(線巾+空間)の4倍以上が良いとされている(JIS規格)JIS B-7174の図票の部分でも規定している。



次に、解像力測定に当っては、特にMTF等の測定に便利のような線配列が必要であり、Micro Densitometerにかけて、記録計にグラフする場合等の考慮も必要である。



変化率も等差的なものより等比級数変化のものが推奨され $\sqrt[3]{2}$ の公比即ち1.25×が良いとされ、JISの標準数としても採用されている。(三番目で半分又は倍の大きさになる比率)

図 - 1

- ◆ X線TVに関しては、入力から出力にいたるまでのプロセスが非常に複雑で、X線系、光学系、電子回路系等々であり、最終出力側に至るモニターブラウン管上でのMTFの測定に便利のような配列がなされるべきであり、ブラウン管の構造上縦線、横線とでは、解像力が大きく異なる点から、縦横の比較も同時に行なえるものが必要である。(図-2参照)
- ◆ テストチャート板の同一パターンでもコントラストが異なると解像力に大きな差を生ずる。このような目的のために、同一パターンでコントラストの差による解像力変化を測定するには、同一条件でX線撮影し、そこに各々コントラストの差を生ずるような材質のテストチ

ャート板も必要である。

即ち、

高コントラスト用) 同一パターン
低コントラスト用

3. 製造面より見た適合テストチャート板の検討

前項で記述した如く、テストチャート板の基本パターンは、平行三本条線である事は決定したが、実際の製造面から考えてどのような問題点があるか考えていく。

X線の吸収は、材料側から検討すると、

- (1) 原子番号の大きい程
- (2) 比重の大きい程
- (3) 厚さの大きい程

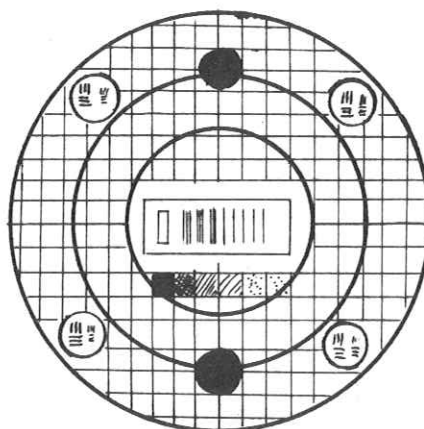


図-2 X線TV用パターン例

X線の発生側から材料を検討すると、波長の大きい程大である。

即ち、X線の吸収は原子番号のほぼ3乗に比例する。

又、管電圧が高くなると、原子番号より厚さと密度（比重）の積が非常にきいてくる。

X線の吸収等を考慮して、価額、入手先より容易度から検討して、Pb、W、Auの三材料にしぼって、X線吸収度を写真法によって、種々の管電圧に対して単純撮影を行ない、その濃度差より、表-2の順位を得た。

Kvp	80	100	120
Pb	1	1	1
W	1	1.3	1.5
Au	1.4	1.6	1.8

表 - 2

(注) 各電圧に対するPbを1とした場合の吸収倍率。

◆ 次に実際の製造方面から材料化工法等の検討から考えてみる。

現在製造方法として確立しているものは、機械加工法及び写真製版技術を応用した化学薬品化工法である。

- (1) 機械加工法
- (2) 写真製版術による化学化工法

大別すると上記二法になるが、W板の化工は、化学腐蝕方法による事が最も良い方法であるので、この方法に決定した。一方Auの方は、化学腐蝕が可能であるが、耐酸膜がもたないと言う欠点から、メッキ法による方法を開発した。

	W	Au
NaOH	酸化物溶解	変化なし
NaOH 電解	反 応	〃
弗 酸	非常にゆっくり反応	〃
硝 酸	〃	〃
弗酸 + 硝酸	急速に反応	〃
硝酸 + 塩酸	反 応	急速に反応

表-3 Au, Wの化学的反應

	機械圧延	加工度合
Au	μ 単位の圧延	容 意
W	25 μ 迄	中 程 度

表-4 Au, Wの機械圧延度合

表-3及び表-4よりみて、化学化工はAuよりWの方が容易であるが、一方機械加工では、Auの方が良い。

又、Auの方は、電鍍（メッキによるパターン形成）が容易であるため、Auの方はメッキ法とした。

- ◆ 実際の化工法としては、写真製版法の採用であるが、この特徴は自由なパターンの再現にある（機械加工では、自由なパターンは困難である）。又、同一パターンのものを多量に製造する事が容易であるため、ラミネートする事が出来、単枚では耐X線に不足であれば、複数枚重ねることが容易である。

品名	材質	厚み	適応
R-1W	W	100 μ	高コントラスト用
R-1S	ステンレス	80 μ	低コントラスト用
R-4W	Au	30 μ	微細構造, 拡大用
R-4S	Au	15 μ	〃 低コン用
K-2	W	100 μ	間接用
H-1	W	200 μ	高圧用
OKチャート	Au	45 μ	拡大, 体内写し込み用
R-3T			XTV用総合パターン

表 - 5

4. 放射線撮影系に於けるテストチャート板による解像力の測定

MTF (Modulation Transfer Function) の測定は, 通信機の情報伝達理論にもとづき, 周波数の特性の測定と同一の考え方である。

- ◆ 直接撮影系による測定には,
 - A. X線管球の比較 (焦点の大きさや, あれ具合, 方向性の違いによる解像力等の測定)
 - B. 透視用蛍光板の解像力
 - C. ファントム (又はシュミレーター) 中の解像力 (特に二次散乱線による低下)
 - D. 拡大率の実測とその時の解像力
- ◆ 間接撮影系による測定には,
 - A. ミラーカメラ等のピント調整 (フードのX線入力面に密着する)
 - B. 縮小率と解像力
- ◆ X線TV-III系による測定には,
 - A. モニター面の解像力と総合的な判定
 - B. 速写装置の完全静止状態の測定
 - C. 時間経過によるIIIの解像力変化
- ◆ 増感紙それ自体の解像力と同種類のバラツキ測定, 新品と交換時の決定 (数表的管理)
- ◆ 微細構造部分のデテールの比較
- ◆ 断層装置の断層面厚みと, 解像力 (第3次元的測定) ステレオ等の解像力

この他測定方法は、撮影方法や装置によって多種にわたるが、特に新しく開発した断層X線写真の層厚測定と解像力を測定する一方法を紹介する。

断層の厚みは、X線写真より判定する以上層厚と解像力とは、重要な関係にある。すなわちどの位の層厚の時どの位の解像があるかということで判定していかなければ無意味である。

断層面といっても鋭利な刃物で切ったような面ではなく、ある面を中心に上下にそれぞれ徐々にぼけ像となっているものである。

故に断層厚何mmというふうに決定することは疑問視されている。

そこで、解像力と同時に断層厚も測定出来るテストチャートを開発したので、図をもって説明する。

パターンは図-3に示す通りであるが、このパターンのテストチャートは特に直線運動方式（ソニー方式）の断層装置にむいており、層厚に対する解像力が実測できるのが特徴である。

このパターンのテストチャート板で測定するには、テストチャート板保持装置が必要である。

即ち、測定しようとする断面の高さにある角度をもって保持させることが目的である。

図-3のテストチャート板は、中心線（0）を断層しようとする中心位置に合わせ、指定の角度を付けることにより、それぞれ中心から±4mm即ち層厚8mmまで直読出来、合わせて中心線より上下に何mmずれているかも写真として写し出される。

X線の軌道は各条線を直角に切るようにX線を透過する。

◆ 実際のX線写真は、図-4に示すように

1.25 LP/mm の線群では l_1 の長さがあり、その上下はぼけ像となる。同様に2.0 LP/mm は l_2 、3.2 LP/mm は l_3 となり、解像している巾がせまくなっていく。

（但し、同一チャート板でも装置の振角度によ

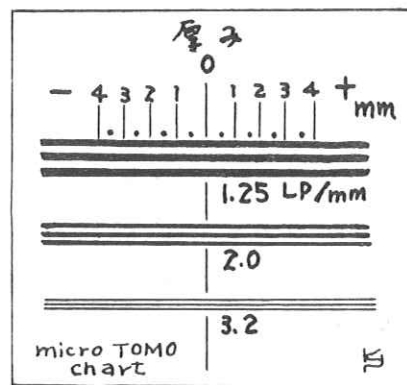


図 - 3

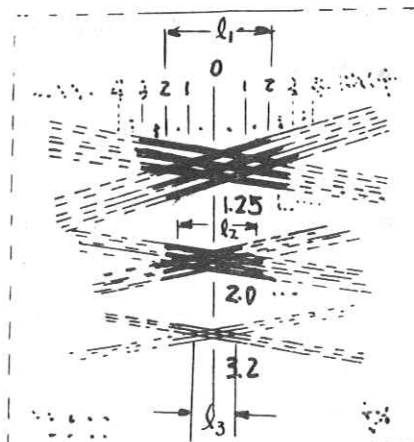


図 - 4

ってぼけ具合が変化する)

$l_1 > l_2 > l_3 \dots$ となっていく, 故に何本/mmの場合はシャープな像として確認出来るのは層厚は何mmであるという見方(表わし方)である。

◆ 多軌道運動方式の装置の内回転軌道向のパターン。図-5に示すように, リング状の線で1回転で10mmのpitchになっている。

(0)点を断層しようとする中心に合わせ, 実際にX線写真を撮ると, 図-6に示すようなある長さの円弧状の写真が出来る。

(0)点を中心にそれぞれ上下に徐々にぼけ像となる, 外かくの目盛りは, 1間隔1mmの実際の断層の寸法として測定出来るように目盛っている。

例えば, (0)点を中心に上下それぞれ2目盛り写っていれば断層厚は2mmということになる。

1回転全部写ってしまえば層厚は10mm以上あることを示し, 半分写っていれば5mmである。

すなわち,

$$T = \text{arc} \cdot \frac{\text{Pitch}}{360} \dots\dots\dots(1)$$

T = 層厚
 arc = 円弧の長さ
 (解像力は考えない)
 $\text{Pitch} = 10 \text{ mm}$

の関係が成立つ。

一方, 解像力の面から考えてみると, 当然円弧の長さが短くなる。やはり同様に層厚と解像力とは切りはなして考えることは出来ない。

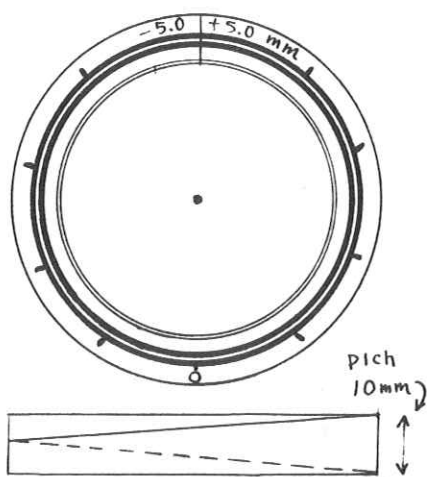


図 - 5

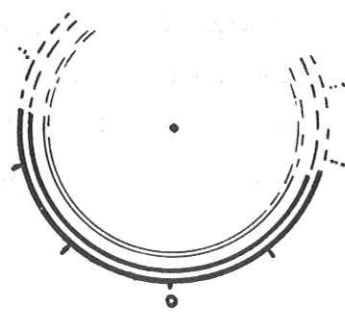


図 - 6

5. むすび

X線テストチャート類は, X線装置や種々の測定方法に合ったものでなければならず, 材質

やパターンに伴った製造方法の開発は、今後のX線撮影法やX線装置の発展と共に進んでいかなければならない。

6. 参考文献類

1. 電子材料，工業調査会出版 109PG，3-1970
2. 防蝕メッキと化学メッキ，呂成辰著，日刊工業新聞出版
3. カメラ及びレンズ，林一男・久保島信著，写真技術講座，213PG，共立出版
4. フォトエッチング，古関敬三，日刊工業新聞出版
5. X線撮影と散乱線，管原努，中村実共著，119PG
6. 日放技会誌，42年10月，258PG，骨撮影条件の検討・東邦大（放）泉重光
7. 日本放技会誌，X線テレビジョン特集，45年5
8. 日本医学放学会誌，XTVの総合解像力測定法・高橋信次・佐々木常雄他，
26. 6. 648PG
9. 東芝医療用放射線資料 №54，井出昇
10. 日本放射線技術学会総会抄録集 第26回，1970-3
項8-13PG，項10-15PG，項12-17PG，項13-18PG，
項42-60PG，項45-63PG，項66-88PG，項88-122PG，
項136-137PG，項173-235PG
11. 日本放射線技術学会総会抄録集 第27回，1971-4
項46-56PG，項91-120PG
12. 日放技会誌 25巻第3号，143PG
13. 日放技会誌 23巻 339PG

X線蛍光板のシンチレーションゆらぎ(Ⅱ)

電気通信大学 長谷川 伸, 塚越 照和*

* 現在立石電機(株)勤務

X線像の画質劣化にはX線の量子雑音が大きき要因となっている。これについて従来は、到着するX線量子数のみに着目してこれを独立試行情報源と考え、ある時間、ある面積に到着する量子数を n とするとき、そのゆらぎは \sqrt{n} であるとして単純にとり扱われてきた。しかしX線画像の雑音を扱うにはこれだけでは不十分であって、シンチレーションの高さゆらぎも雑音として考慮しなければならない。前回の報告はこのような現象の指摘に止まったが、今回は診断用X線源を用い、光パルス高さのゆらぎによる信号雑音比低下の測定を行なった結果について述べる。

1. 測定方法

X線源, Pb製Aperture, 蛍光板, Photomultiplier, パルス増幅器, スライサー, パルスカウンタを図1のように配列する。使用したX線装置はPK40(東芝, 自己整流) 蛍光板はFU(ZnCdS), 光電子増倍管はE5501(9段, 800V印加)である。

X線はPbアパーチャ板の小孔(1.8mm ϕ)から蛍光板に導びかれ、ここでシンチレーションが発生する。その数が毎秒数千回以下になるようX線量は小さくしておく。これにより、空間系列の光パルス性雑音はパルス数, 高さに関する限り、時系列に変換される。光電子増倍管の出力パルスを増巾し、シュミット回路を通してスライスし、カウンタに入れてパルス数を数える。スライス・レベルに対し、毎秒のパルス数をプロットして得た曲線を微分すると、シンチレーションのパルス高さ分布が得られる。尚、測定は各スライスレベルごと、1秒間ずつ5回計数し、その平均をとった。

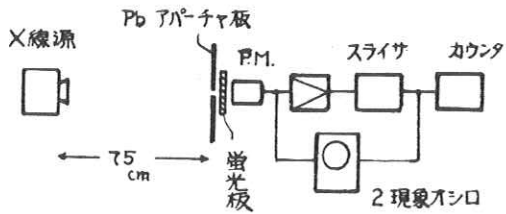


図1. シンチレーションゆらぎ測定方法

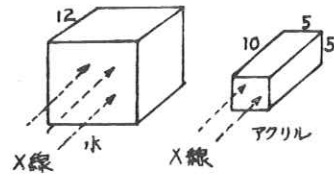


図2. 照射体(単位 cm)

2. パルス高さ分布

X線管電圧 61, 70, 77

KV で動作させた場合、及び X線管 OFF の状態で上記の方法により、シンチレーションのパルス高さ分布を測定した。また図2の寸法の水、アクリル吸収体を鉛パーチャの直前に置いて同様の実験を行なって図3—図5の結果を得た。尚、高さ10 mV以下の部分は蛍光体の残光に基づくパルスの重畳のため、正確な測定ができない。

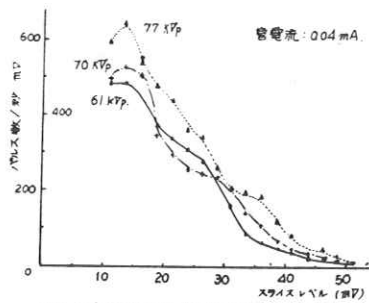


図3 X線蛍光線シンチレーションのパルス高分布

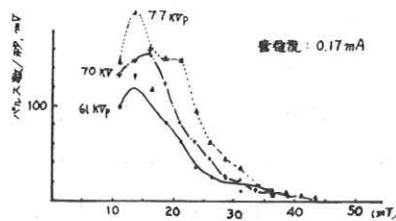


図4 12 cmの水を透過したX線による蛍光線シンチレーションのゆらぎ

3. パルス高さのゆらぎ

図3—図5から、各実験条件下で、

- i) 出力10 mV以上のシンチレーションの総数
- ii) パルス高さの平均値
- iii) ゆらぎのRMS値
- iv) S/N比(平均値/RMS)

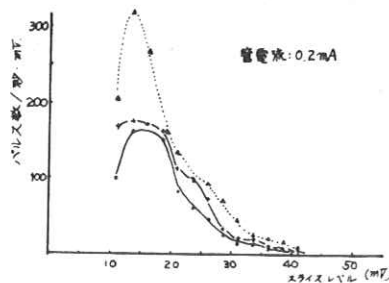


図5 厚さ10 cmのアクリルを透過したX線による蛍光線シンチレーションゆらぎ

雑音) をそれぞれ計算し, 表1~表4に示す。

表1 出力パルスの総数

X線管電圧	61KV	70KV	77KV
吸収体なし (0.04mA)	8288	8407	11,539
”水1.2cm (0.17mA)	1423	2055	2784
”アクリル1.0cm (0.2mA)	1920	2669	4320

表3 ゆらぎの標準偏差

X線管電圧	61KV	70KV	77KV
吸収体なし	9.41	9.18	10.55
”水1.2cm	7.74	8.22	8.05
”アクリル1.0cm	8.15	8.17	8.67

表2 出力パルスの平均高さ (mV)

X線管電圧	61KV	70KV	77KV
吸収体なし	17.61	18.37	19.20
”水1.2cm	15.47	15.81	16.68
”アクリル1.0cm	15.93	16.29	17.44

表4 (平均高さ)/(標準偏差)

X線管電圧	61KV	70KV	77KV
吸収体なし	1.87	2.00	1.82
”水1.2cm	2.00	1.93	2.07
”アクリル1.0cm	1.96	1.99	2.01

4. ま と め

以上の実験から次のことが推論される。

- i) 60KV_p 以上のX線では制動輻射と示性X線とが含まれるため, パルス波高分布が双峰(又はそれ以上)となることを予想して実験を行なったが, その効果は認められなかった。
- ii) 被検体を通過したのち, パルス高分布が広がり, 信号雑音比が下がることを予想したが, 実際は僅かではあるが信号雑音比が良くなる傾向が見られる。
- iii) ii) の原因としては被検体による高エネルギー成分の吸収効果と, 散乱線により, 周辺部分から中位のエネルギーのX線が入射してくることが考えられる。後者については十分な実験を行なってはいないが, カゲの部分にX線量子がまわりこんでバックグランドを作ることは別として, パルス高分布には大きな影響を与えてはいないと思われる。

R . I . I . 研 究 会

会 長 高 橋 信 次
顧 問 足 立 忠， 立 入 忠， 宮 川 正
常 任 委 員 佐々木 常 雄， 竹 中 栄 一， 津 田 元 久， 長 谷 川 伸
委 員 飯 沼 武， 一 岡 芳 樹， 内 田 勝， 梅 垣 洋 一 郎，
金 森 仁 志， 木 下 幸 次 郎， 久 保 栄 太 郎， (代 理 松 川 収 作)
佐 柳 和 男， 佐々木 常 雄， 竹 中 栄 一， 高 野 正 雄，
滝 沢 正 臣， 津 田 元 久， 恒 岡 卓 二， 長 谷 川 伸，
松 田 一， 三 浦 典 夫， 矢 仲 重 信，

編 集 後 記

暑くなりました。東京では水不足で給水制限が行なわれている一方で、九州、四国、中国、中部と大雨のニュース、皆様におさわりなければよいがと案じております。

今号も編集責任者怠惰のため予定より刊行がおくれました。誠に申し訳ありません。次回は津田委員のお骨折りで、京都市で開催のはこびとなりました。盛会を祈っております。

(S . H)

放 射 線 像 研 究

発行日 昭和四十七年七月 日

編 集 責 任 者 長 谷 川 伸

〒182

調布市調布ヶ丘一―五―一
電気通信大学電子工学科内
電話〇四二四―八三一―二一六一
内線四二〇

発行所 R I I 研究会

〒113

東京都文京区本郷七―三―一
東京大学医学部放射線
医学教室内

印刷所

東京都中央区宝町三―三
タナカ印刷株式会社
電話〇三―五六七―二五五一