- 方研資 CS 75-101 (1975.9)
- 4) 井上: PCM ハイアラーク, 信学誌, **57**, 12 (1974)
 - 5) CCITT Recommendation G. 731~733, 741~743 Green Book Vol. III-2
 - 6) 松本, 金子, 片桐ほか: 放送プログラム信号符号化装置, 信学会通方研資 CS 76-29 (1975.6)
 - 7) R.H. Bosworth and J.C. Candy: A Companded one-bit coder for television transmission, BSTJ, **48**, Mar. (1967) 298-308
 - 8) 副島, 田崎ほか: 本仕化された新 PCM-24B 中継装置, 施設, **24**, 12 (1972)
 - 9) 大蔵, 千本, 白川: PCM 1次群用 PCM-FDM 方式, 施設, **26**, 10 (1974)
 - 10) 細田, 松本ほか: 下部帯域データ伝送方式, 施設, **27**, 12 (1975)
 - 11) 橋本, 安田, 黒田: TDM カラー信号方式による TRIDEC カラー符号化実験, 信学会通方研資 CS 75-191 (1976.2)
 - 12) 小川, 若原ほか: PCM 2次群 PCM-FDM 方式, 信学会通方研資 CS 75-29 (1975.6)
 - 13) 室谷, 吉田: 2 GHz 無線 PCM 方式 (その1, その2), 施設, **20**, 6/7 (1968)
 - 14) 沢田, 小寺, 金谷: 分離符号化方式によるカラーテレビ信号の 32 Mb/s 伝送, テレビ学会画像伝送研資 14-4 (1975.6)
 - 15) 大蔵, 千本ほか: ファイバケーブルによる 4 MHz テレビ伝送システム, 昭 51 年信学全大, No. 1870
 - 16) 山縣, 山下ほか: DSW 方式の方式設計, 昭 51 年信学全大, No. 1522
 - 17) 結城, 山口: 100 Mb/s カラーテレビジョン符号化端局装置の試作検討, 研実報, **21**, 8 (1972)
 - 18) 副島, 田崎: PCM-100M 方式, 施設, **25**, 3/4/5 (1973)
 - 19) 所内資料
 - 20) 大蔵, 山縣, 山下: PCM-400M 方式 (その1, その2), 施設, **28**, 7/8 (1976)
 - 21) 西野, 細田: 20 G 帯無線 PCM 方式, 施設, **28**, 3/4 (1976)
 - 22) 宮内, 関: W-40G ミリメートル波導波管, 研実報, **23**, 11 (1974)
 - 23) F.T. Witt: An Experimental 224 Mb/s PCM Multiplexer—Demultiplexer Using Pulse Staffing Synchronization, BSTJ, Nov. (1965)
 - 24) J.E. Savage: Some Simple Self-Synchronizing Digital Data Scramblers, BSTJ, **46**, 2 (1967)
 - 25) D.L. Duttweiler: Waiting Time Jitter, BSTJ, **51**, 1 (1972)
 - 26) 田崎: PCM-FDM 方式と自動化技術, 電気四学会全大 (1976.10)
 - 27) 堀口, 江尻: 平衡対ケーブルを用いたカラーテレビ信号伝送方式, 施設, **25**, 6 (1973)
 - 28) CCITT Recommendation J. 21 Green Book Vol. III-2
 - 29) Steward E. Miller, et al.: Research Toward Optical-Fiber Transmission Systems, Proc. IEEE, **61**, 12 (1973)
 - 30) たとえば CCITT Contribution to Q 1/VII, 4/XI, 1/D and 3/D, "General Considerations on Integrated Services Digital Network", 1974.4, Geneva

4-2 画像のデジタル処理

株式会社日立製作所中央研究所 吹 抜 敬 彦
NHK 総合技術研究所 石 田 順 一

1. ま え が き

画像処理という研究分野は, 最近ではかなり一般的な名称になった感もあり, 関連する論文や, 優れた特集, 解説^{1)~3)6)7)}も少なくない。そして, (i)高エネルギー画像符号化, (ii)画像の変換, 修正, 復原, 強調, (iii)画像パターン認識 (医用画像, リモートセンシング, 物体認識など), (iv)画像の表現, 記述などを包含した境界領域の技術として発展しつつあるように思われる。

使用される手法からみると, 電気的, 光学的などがあり, 前者はアナログ技術, デジタル技術に分けられる。最近の傾向としてはこのデジタル技術が主流となりつつあり, デジタル画像処理が画像処理と同義語に扱われる場合も多い。これらの技術の中には, これまでもすでにテレビ技術者が画像処理ということ意識せずに使っているものも多いと思われる。

本稿では本特集号の主旨を考慮して, 前記の広範な内

容のうち画像パターン認識等は省略する。そしてテレビ技術に直接関連したデジタル信号処理に絞り, 特に, 線形 shift-invariant な系に重点を置いて述べる。高エネルギー符号化については本特集号に別稿があるので, 若干異なった見方を述べるにとどめる。

2. デジタル画像処理の基本技術

2.1 デジタル技術の導入

デジタル技術がテレビ系に適用される理由として, 次の3つが考えられる。

第1は, 現実に装置を構成するうえでデジタルでなければ困難を伴う場合で, これには時間軸の操作を伴う場合や, 厳密な回路定数の一致が要求される場合などがある。

第2は, 経済性, 実現性などから伝送, 記録などがデジタルで構成されるとき, これに合せて画像をデジタル的に処理する必要のある場合である。

第3は, 複雑な処理を行う場合である。その最たる例は汎用処理装置 (計算機) の利用であるが, シミュレーション¹⁰⁾は別として, リアルタイムの信号系にこれが入

"4-2 Digital Processing of Pictures" by Takahiko Fukinuki (Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd., Tokyo) and Junichi Ishida (NHK Technical Research Laboratories, Tokyo)

表 1 デジタル画像処理における基本処理例

基 本 処 理	処 理 例
線形 shift-invariant 処理	2次元デジタルフィルタ(強調, 復元, 線形雑音除去, 予測符号化)など
非線形 shift-invariant	非線形フィルタ, 瞬時圧伸(階調補正, γ 補正), デジタル変復調
shift-variant 処理	(shading 補正, など)
座標系の補正	時間軸, 空間軸の補正(タイムベースコレクタ, フレームシンクロナイザ, 幾何学ひずみの補正など)
特徴抽出	広義のパターン認識
フレーム間, 複数画像間	(変化点検出など)
画像合成, 記述	画像の合成・製作, 画像の記述
カラー画像	カラー補正, pseudo-color

るには現在の処理速度では不足であり, 利用例¹¹⁾は少ない。

次に, 画像をデジタル処理する基本的な手法を表1にまとめる。具体例としてはテレビ技術を中心に選んだので, あえて画像処理としてあげることが適当でないものも含まれている。

2.2 2次元デジタルフィルタ

前項であげた手法のうち最も広範な応用範囲を有するものは線形 shift-invariant な処理, なかんずく2次元デジタルフィルタ⁴⁾である。すでに時系列信号を対象とした1次元デジタルフィルタについては研究開発も進んでいる¹²⁾。画像を対象とする2次元の場合, 1次元の拡張でかなりの面がカバーできるが, 未解決の問題も少なくない。

2次元フィルタを述べる前に, 1次元の場合を簡単に述べる。解析, 設計には周知のように z 変換が適用される。標本値系列 $f(0), f(1), f(2), \dots, f(n), \dots$ は,

$$F(z) = \sum_{n=0}^{\infty} f(n)z^{-n} \quad (1)$$

と変換される。ここに z^{-1} は(単位)遅延演算子とも呼ばれる。フィルタの入力系列 $x(m)$ と, 出力系列 $y(m)$ が,

$$y(m) = \sum_{k=0}^M a_k x(m-k) - \sum_{k=1}^N b_k y(m-k) \quad (2)$$

という差分方程式で表わされるとき(ただし, a_k, b_k は定数), $x(n), y(n)$ の z 変換を $X(z), Y(z)$ とすれば,

$$Y(z) = \frac{\sum_{k=0}^M a_k z^{-k}}{1 + \sum_{k=1}^N b_k z^{-k}} X(z) = H(z)X(z) \quad (3)$$

と表わされる。 $H(z)$ はデジタルフィルタの伝達関数である。

(3)式において, すべての $b_k=0$ の場合は, 帰還の

ない場合であり, 単に入力系列の荷重和になる。これを非巡回形(non-recursive)フィルタという。これに対し, $b_k \neq 0$ なる項を含む場合, すなわち過去の出力が帰還される場合を, 巡回形(recursive)フィルタという⁵⁾。後者の場合これを展開すれば通常は z^{-1} の無限級数となり, インパルス入力に対して出力が無限に続くことになるので, IIR (Infinite-Impulse-Response) フィルタと称し, これに対し前者を FIR (Finite-I-R) フィルタという。ただしいずれも厳密には対応しない。

2次元デジタルフィルタの場合, 以上がほぼそのまま拡張できる。すなわち, 2次元入力信号 $x(m, n)$, 出力信号 $y(m, n)$ が, $a_{k,l}, b_{k,l}$ を定数として,

$$y(m, n) = \sum \sum a_{k,l} x(m-k, n-l) - \sum \sum_{\substack{k=l=0 \\ \text{を除く}}} b_{k,l} y(m-k, n-l) \quad (4)$$

という差分方程式で表わされるとき, $X(z, w), Y(z, w)$ をそれぞれ x, y の2次元 z 変換として,

$$Y(z, w) = \frac{\sum \sum a_{k,l} z^{-k} w^{-l}}{1 + \sum \sum b_{k,l} z^{-k} w^{-l}} X(z, w) \quad (5)$$

と表わすことができる。ここに, z, w は, μ, ν を水平垂直の空間周波数, ξ_0, η_0 を水平, 垂直の標本点間隔として,

$$z^{-1} = \exp(-j2\pi\mu\xi_0)$$

$$w^{-1} = \exp(-j2\pi\nu\eta_0)$$

に対応する。なお, 1次元の時系列信号の場合は, その物理的条件から, 総和 $\sum$ のとりうる範囲は過去の値に対応する項となるが, 2次元の場合には標本点のとり方によって異なる。テレビのフィールド内処理を考えれば, そのとりうる範囲は当然のことながら図1のようになり, k の負の値もとりうる。

なお, 1水平走査線の標本数を L とすれば, 標本点 (m, n) は $(nL+m)$ の関数で表わされ, w^{-1} は z^{-L} と置換することが可能である。しかし, このようにすれ

図 1 テレビ走査における入出力

ば、2次元画像の特徴ある性質は見失なわれ、この性質を充分活用した解析は困難になる。

以上、2次元の場合について述べたが、時間方向（フレーム間）を考慮すれば、3次元デジタルフィルターやさらに高次のデジタルフィルターも検討対象となる。

デジタルフィルターの代表的構成方法は、すでに多くの文献にみられる。ここでは紙面の制限もあり、3節に具体例を示すにとどめる。テレビを対象とする場合、遅延素子の価格が水平方向、垂直方向（ライン間）、時間方向（フレーム間）となるに従って2桁程度ずつ高価になるので、その使用方法には工夫が必要である。

デジタルフィルターを実現するには、下記のように多くの検討すべき事項がある。

- (1) 演算ビット長、テレビ信号の量子化ビット数
本特集号の別稿⁹⁾に詳しい。
- (2) 演算による丸め誤差や量子化誤差

量子化誤差の積算を避ける目的で、非巡回形の伝達関数を巡回形のような構成で実現する場合もある（本稿の予測符号化の節を参照されたい）。このように伝達関数による周波数領域における設計が万能でない場合もある。

- (3) 巡回形、非巡回形の選択

非巡回形は常に安定であり、また位相の遅れなしに設計できる利点がある。最もなじみ深い2次元フィルターである楕円フィルターもこの形式で構成される場合が多い。

一方、巡回形はより少数の素子で実現できるという利点があり、また他の理由で使用される場合もある。なお、2次元巡回形ではその安定性の判定が一般にむずかしい⁴⁾¹³⁾。それは、2次元巡回形フィルターでは(5)式の分母の多項式を零とする根を一般的に解くことができないからである。

3. テレビ信号のデジタル処理の実例

本節では主に4MHz標準方式テレビ信号の実時間処理について述べる。テレビ信号の符号化においては、標準化周波数10.7MHz、量子化ビット数8に選ばれることが多い⁹⁾。これはテレビ信号を忠実に伝送するのに必要な条件であって、複雑な歪波処理などに対しては不足であり、実現可能な処理は限られたものになる。ここでは、説明の便宜上、これらの処理を次の4つに分類する。

- (1) 輪郭補償（強調）、簡単な歪波予測などの線形処理
- (2) 変復調、利得調整などの低次の非線形処理

- (3) ガンマ補正、白クリップなどの高次の非線形処理²⁰⁾

- (4) ノイズ低域などのこれらの組合せ

以下、(1)、(2)、(4)について代表例をあげて、デジタル処理についての直観的理解を得られる一助としたい。

3.1 輪郭補償回路¹⁴⁾¹⁵⁾

デジタルフィルターは、前述のように時間領域における設計が容易にできるので、テレビ信号のように波形伝送の立場から信号処理するのに都合が良い。輪郭補償では、図2(a)のようにステップ入力に対して視覚のマッハ現象に類似したオーバーシュートを付ける。この

(b) 輪郭補償回路のインパルスレスポンス

図2 輪郭補償回路の動作

図3 デジタル輪郭補償回路の構成

図4 デジタル NTSC エンコーダーの構成

ため、非巡回形フィルタを使用する。そのタップの利得は、フィルタのインパルスレスポンスで決まり、図2(a)の波形を微分した図2(b)の波形から、フィルタの構成が、図3のように求まる。図のDLはシフトレジスタで、左側からステップ入力を加えて、1クロックごとにデータシフトをして行くと、図2(a)の波形が得られることが容易にわかるであろう。各タップの利得は、付加するオーバーシュートの振幅 a と勾配で決まるが、2のべき数に選べば、乗算器の代りにデータの桁下げと加算器だけで済ますことができるため、ハードウェアが簡単になる。たとえば $3/4$ は、 $1/2$ と $1/4$ の和、すなわち 1 bit 桁下げたデータと 2 bit 桁下げたデータの和になる。

垂直方向の輪郭補償は、図3のDLを $1H$ 遅延のシフトレジスタに置きかえればよい。ただし、標本化周波数が色副搬送波の3倍に選ばれているときは、 $1H$ 前の走査線上の標本点は $1/2$ 周期ずれているため、その前後の標本点から内挿によって求める必要がある。これによって、輪郭補償信号の水平方向の帯域が狭くなるが、

図5 色副搬送波と標本点の位相関係

実用上は問題にならない。

3.2 NTSC カラーエンコーダー¹⁶⁾

次に変調回路の例として、デジタルエンコーダーについて述べる。図4はその原理的構成図で、RGB デジタル信号は、マトリックス乗算および加算が行われて、Y, I, Q 信号に変換される。次に、デジタル低域通過フィルタで I, Q の信号帯域はおおの $1/3$, $1/9$ に帯域制限されるが、簡単には I, Q 信号の標本点をおおの $1/3$, $1/9$ に間引けばよい。

I, Q 信号の直交変調は、色副搬送波の各標本点における振幅を乗ずることによって行われるが、入力デジタル信号の標本点が、色副搬送波と一定の位相関係でブロックしていれば、図5のように各標本点での副搬送波振幅が数周期ごとに一定になり、図の場合は6種類の定数表を用意しておくだけで済む。定数表はROMにメモリーしておき、クロックで順次読出して掛算器に加えられる。

3.3 ノイズ低減

画像中のノイズは、視覚的に輝度一定の部分で目立ち、輝度の急激な変化の部分では目立ちにくいという性質があり、これを利用するとノイズ低減ができる。すなわち、図6のように、隣接する画素の振幅を比較し、差が一定の閾値より小さいときは輝度変化の小さい部分と

図6 ノイズ低減回路

判定して、隣接画素との平均をとって、細かい変化をとり除いてしまう。一方、振幅変化の大きいところでは原信号のままとする。この操作を、水平・垂直両方向に行うことによって約 6 dB の S/N 改善が得られる。

隣接画素の平均操作は、矩形波アパーチャによる走査と等しく、標本化周波数の 1/2 の周波数に零点を持つ楕円形フィルタによる濾波になっている。アナログ回路でも同様な操作が可能であるが、低域濾波信号と原信号の時間合わせや、スイッチングによるきず等をなくすることが困難である。

3.4 予測符号化

予測符号化については別稿⁹⁾にくわしいので、ここでは見方を変えて 2 次元デジタルフィルタの適用例として述べる。

予測符号化¹⁷⁾では、走査によって得られた過去の値の荷重和により現在の値 $x(m, n)$ に対する予測値 $\hat{x}(m, n)$ を求め、その予測誤差 $\varepsilon(m, n)$ を非線形量子化して伝送する。すなわち、

$$\varepsilon(m, n) = x(m, n) - \hat{x}(m, n)$$

図 7 予測符号化における電力空間周波数 (μ, ν) 特性
(2:1 ラインインターレースの場合)

図 8 予測符号器と復号器

$$= x(m, n) - \sum \sum a_{k,l} x(m-k, n-l) \quad (6)$$

となる。 $\varepsilon(m, n)$, $x(m, n)$ の z 変換をそれぞれ $E(z, w)$, $X(z, w)$ とすれば、

$$E(z, w) = \{1 - \sum \sum a_{k,l} z^{-k} w^{-l}\} X(z, w) \\ = \{1 - P(z, w)\} X(z, w) \quad (7)$$

となる。 $P(z, w)$ は予測の特性を定めるものであり、 $1 - P(z, w)$ は予測符号器の伝達関数となる。

予測符号化の良さの目安として、解析の容易さから予測誤差電力 $\bar{\varepsilon}^2$ を最小にする方法がある。(7)式より、

$$|E(z, w)|^2 = |\{1 - P(z, w)\}|^2 \cdot |X(z, w)|^2 \quad (8)$$

となるので、上記のようにするためには、原信号の電力スペクトル $|X(z, w)|^2$ で電力の大きな空間周波数において、電力利得 $|\{1 - P(z, w)\}|^2$ が 0 または 0 に近いことが必要である。

白黒テレビにおいては、低周波数領域に電力が集中しているので、直流 ($\mu = \nu = 0$) すなわち $z^{-1} = w^{-1} = 1$ において上記の条件を満たす必要がある。特に $1 - P(1, 1) =$

0 となる場合を完全積分形といい、符号器の伝達関数は零点を有し、符号器の伝達関数は pole を有する。図 7 に代表的な予測方法における電力利得の空間周波数特性を示す¹⁸⁾。

カラーテレビ信号の直接符号化では、このほかに色副搬送波成分 ($\mu: 3.58$ MHz に相当する空間周波数, $\nu: 1/(2 \cdot \text{走査線間隔})$) においても前記の関係を満たすことが必要である。

予測符号化のための符号器、復号器の構成はよく知られているように図 8 に示すとおりである。ふだんこれを当然の構成として考えているが、これらにデジタルフィルタとして興味深い事項がみられる。

たとえば、符号器の伝達関数は、(7)式に示すとおり非巡回形であるが、実際には巡回形に似た構成となっている。これは量子化雑音の積算を防ぐためであるが、このことは、伝達関数による周波数領域の設計のみでは不十分で、時間領域の設計が必要であることを示している。

さらに、これを 2 次元デジタルフィルタとしてみてゆくといろいろの発展がある。

たとえば視覚特性は斜め方向に弱いといわれている。この特性はいわゆる平面予測符号器の伝達関数と空間周波数領域でちょうど相補的である。これを利用して予測効率を向上

させる試みがある¹⁸⁾。

フレーム間符号化でもこれと相似な現象がある。視覚特性が動く対象に対して低下することを利用し、複合差分予測符号化の電力利得を、空間周波数領域ならびに時間周波数（フレーム間）領域にわたって小さくして、予測効率を向上できる。このとき、視覚特性を利用するための前置フィルタを構成するのに、高価なフレーム遅延線を追加せず、局部復号器のフレーム遅延線を流用して巡回形フィルタを構成することが提案されている¹⁹⁾。

4. む す び

広範なデジタル画像処理について、特にデジタルテレビとの関係を考えて述べてみた。

これらの技術を振り返ってみると、デジタル信号処理としての体系化は音響の分野で育てられた面もあり、画像に携わる者としていささか残念な気もする。しかし、この障害となっていたビデオ周波数の高さについては、汎用処理装置（計算機）のリアルタイムな信号系での利用を除けば、現在の IC などの発展によって取り除かれつつあるように思われる。

さらに、2次元など高次元のデジタル信号処理については、画像関係者に課せられたテーマであり、今後の発展の重責を荷うべきものと考えられる。

(昭和51年6月22日受付)

〔参考文献〕

- 1) "Digital Picture Processing" 特集, Proc. IEEE, **60**, 7(1972) 766-898
- 2) 高木: デジタル画像処理 (I), (II), テレビ誌, **29**, 7 (1975) 575-585/735-746
- 3) B. R. Hunt: Digital Image Processing, Proc. IEEE, **63**, 4 (1975) 693-708
- 4) R. M. Mersereau, et al: Two-Dimensional Digital Filtering, ibid, 610-623
- 5) L. R. Rabiner, et al: Terminology in Digital Signal Processing, IEEE Trans., **AU-20**, 5 (1972) 322-337
- 6) F. C. Billingsley: Applications of Digital Image Processing, Applied Optics, **9**, 2 (1969) 289-299
- 7) T. S. Huang, et al: Image Processing, Proc. IEEE, **59**, 11 (1971) 1586-1609
- 8) 大平: 高能率符号化方式, テレビ誌 (本特集号)
- 9) 宮川, 藤尾: 画像符号化の基礎, 同上,
- 10) 天野, 山本: 画像とシミュレーション, テレビ誌, **29**, 11 (1975) 870-878
- 11) 森田, 黒田: マイクロプロセッサを用いた狭帯域フレーム間符号化装置の構成, 信学技報, CS 75-124 (昭 50.11)
- 12) 電子通信学会 (編), デジタル信号処理, コロナ社 (昭 50)
- 13) T. S. Huang: Stability of Two-Dimensional Recursive Filters, IEEE Trans., **AU-20**, 2 (1972) 158-163
- 14) J. P. Rossi: Digital TV Image Enhancer Design Concepts, CBS Lab. Report 9/73 (1973)
- 15) E. M. Deely, N. Johnson: Improved Digital Aperture Corrector, Proc. IEEE, **121**, 9 (1974) 929
- 16) J. P. Rossi: Color Decoding a PCM NTSC Television Signal, SMPTE, **83**, 6 (1974) 439
- 17) D. J. Conner, et al: Intraframe Coding for Picture Transmission, 文献(1), 779-791
- 18) 吹抜: 画像信号予測符号化方式の効率化——視覚解像度の方向性の利用による——, 信学論誌, **58-A**, 3 (1975) 165-172
- 19) 吹抜, 吉木ほか: 視覚の動特性を利用したTV信号のフレーム間予測符号化方式の効率化, 信学論誌, **59-A**, 9 (1976) 764-771
- 20) 村上: 基本機能回路, テレビ誌 (本特集号)

テレビジョン11月号予定目次

【ふぉーかす】	先進国に成るために……………三菱電機	喜連川 隆
【技術解説】	テレビ中継放送装置の諸問題……………NHK	末松 昭次
	わが国の衛星計画……………宇宙開発事業団	宇田 宏
【研究動向】	SHF の電波伝搬……………NHK	伊藤 士郎
【技術の話題】	モントリオールオリンピックの話題……………NHK	田中 利興
【論文】	結合量可変方向性結合器……………名工大 池田 哲夫・東北大 佐藤利三郎	
	テレビ受信位相差給電多素子アンテナ……………松下電器 川井 弓夫・大山 宏・雄山 厚	
【資料】	VHF トランジスタチューナーの混変調特性……………日立 袖山 忠一・横山 寛治・丸岡 武二	
【講座】	レーザーとその応用 4. レーザー応用の基礎技術	
	4-2. 復調と検波……………日電 峰村孝一・斉藤富士郎	
【新技術のページ】	光フィルムの研究……………NET 竹下 彊一・NHK 岩村 総一	
【現場だより】	関東電波監理局監視部(東京)……………関東電監 清水 富次	
【国際会議レポート】	CISPR……………NHK 遠藤 幸男	
	IEDM……………NHK 吉川 重夫	