撮像蓄積管による画像処理

浜松テレビ株式会社 土 屋 裕
鈴 木 義 二

撮像管自体で光学像を2次元並列に処理する画像処理機能を有したテレビカメラを試作した。これは撮像蓄積管内部で、スプレッド関数を制御するコンボリューション演算を行うもので、結果はテレビモニター画像として得られる。コントラストの増強、網目画像の修正、2次元2次微分演算、輪郭の抽出、画像の尖鋭化などについて実験し、良好な結果を得た。この装置は、現場用画像処理装置として有望である。

1. ま え が き

画像処理の方法には、光学的情報処理、コンピュータ処理、エレクトロニクス処理などがあり、これらの特徴については、他の解説¹⁾にくわしく述べられている。これらを現場用画像処理装置として考えると、処理機能、処理速度、精度、操作性、経済性などの面で、それぞれ一長一短がある。またこれらは入出力にフィルムを使用するものが多く、このフィルム処理が問題となる。特殊なものとして、イメージ蓄積管による処理²⁾³⁾があるが、光学的情報処理と同様に暗室作業が必要である。

撮像蓄積管は記録像の極性を制御することができ、極性の異なる像を重畳するイメージ減算を利用して、移動物体の抽出、パターンマッチングなどが行えることをすでに報告⁴⁾した。さらにこの管は、記録像の位置を制御することもでき、これらは画像を2次元的に並列処理するものである。したがって、これらの機能を有効に組合せれば、テレビのリアルタイム性を生かした画像処理装置を作ることが可能となる。

筆者らは、これらの点に着目し、撮像蓄積管内部で画像を処理する方式について検討し、比較的处理時間が短く、多処理機能、操作性良好、途中経過観測可能などの特徴を有する画像処理用テレビカメラを試作実験し、所期の性能を確認することができた⁵⁾⁶⁾。

2. 撮像蓄積管による画像処理の原理

撮像蓄積管による画像処理は、インコヒーレントなコ

図1 撮像蓄積管による画像処理の原理

Schematic diagram showing the principle of the image processing using the pickup storage tube.

ンボリューション処理となる。このコンボリューション演算は、いくつかの撮像プロセスに分解して、これらを重畳することによって実行するが、正負両極性の光強度分布を考えることができ、適用範囲が広いものとなる。

撮像蓄積管は、光学像で書込み、走査電子ビームで読取りを行う、撮像管と蓄積管の機能を兼ね備えたもので、図1に撮像蓄積管による画像処理の原理を示す。

レンズによって光電面に結像された光学像は、光電子像に変換され、偏向場を通過して蓄積面に到達し、そこに電荷像として記録される。この場合、光電面から蓄積面までの系（レンズを含めてもよい）は、入力光強度分布で出力が電荷分布である一種のインコヒーレント系と考えることができる。

この系にインコヒーレント結像系の理論を適用すれば、出力電荷像 $i(x', y')$ は、入力像 $o(x, y)$ と系のスプレッド関数^{*} $t(x, y)$ のコンボリューションとなり、

$$i(x', y') = \iint_{-\infty}^{+\infty} o(x, y) t(x' - x, y' - y) dx dy \quad (1)$$

* 光学系を通して作られる点光源の像の形を表わす関数。

"Image Processing Using Pickup Storage Tube" by Yutaka Tsuchiya and Yoshiji Suzuki (Hamamatsu TV Co., Ltd., Hamamatsu)

$$= \iint_{-\infty}^{+\infty} o(x'-x, y'-y) t(x, y) dx dy \quad (1)'$$

で表記される⁷⁾。

したがって、出力像が望ましいものとなるようにスプレッド関数を制御すれば画像処理が行えることになる。またこの演算は出力像の位置 (x', y') に対して不変なもので、全画面同一の操作となる⁸⁾。

(1)' 式を和算記号 Σ を使って近似すれば、

$$i(x', y') = \sum_x \sum_y o(x'-x, y'-y) t(x, y) \Delta x \Delta y \quad (2)$$

(ただし x, y は間隔 $\Delta x, \Delta y$ で $-\infty$ から $+\infty$ まで) となる。(2) 式は“ x, y をそれぞれ $-\infty$ から $+\infty$ まで変化させ、そのおのおのときのスプレッド関数の値と出力像を x, y だけ移動した像 $o(x'-x, y'-y)$ の積を加え合わせたもの”を意味する。

したがって、撮像蓄積管で画像処理を行うためのコンボリューション演算は、スプレッド関数によって定まる強度と位置の移動を有した電子像を時系列直列に求めて、蓄積管で加え合わせればよい。また、撮像蓄積管では後述のように正負両極性の記録を行うことができ、負値のスプレッド関数を与えることができる。

3. 撮像蓄積管を用いた画像処理装置

前述のように、撮像蓄積管で画像処理を行うための基本要素は、記録位置の移動、記録像の強度、蓄積管での重畳である。これらはすべて撮像蓄積管の記録動作中に行われるが、撮像蓄積装置としては、撮像蓄積管の消去、準備、記録、読取りの各動作を制御する回路、映像回路、テレビモニターなどが必要である。図2は撮像蓄積管を用いた画像処理装置の系統図で、太線で示した部分が画像処理を行うための基本部である。

記録位置の移動は、撮像蓄積管イメージ部に設けた偏

図2 画像処理装置の系統図

Block diagram of the image processing system.

向コイルで光電子像を偏向することによって行う。偏向コイルは図示のように2組あり、XY直交成分を独立に制御することができ、プログラムによって任意の形を与えることができる。

記録像の強度は、電子シャッター動作による露光時間*を変えて制御する。電子シャッターは、図中のシャッターパルス回路より負極性のパルス電圧を光電面に印加し、このときのみ光電子像が蓄積面に到達できるようにするもので、入力光学像を断続する機械的シャッターと同一の効果がある。またこのシャッター動作時の蓄積電極電圧を変えることにより記録像の極性を制御できる。

記録の重量は、一度記録されたものを消去しないで次々に新しい記録を重ねて行くものである。本装置ではこれらの基本要素を組合せて種々の画像処理を行うが、この組合せ方は図中の画像処理機能制御回路にプログラム化して記憶しておくことができる。また処理の途中経過をモニターで観測しながら手動で制御することもできる。

4. 撮像蓄積管の重畳特性

つぎに、前章で説明した装置に用いられる撮像蓄積管の動作点について検討し、重畳特性について考察する。

4.1 撮像蓄積管の動作点

図3は撮像蓄積管の露光量**を一定(3.6 lx·sec)として、蓄積電極電圧 V_M (記録動作時) と相対信号出力(読取り時) の関係を実測した例である。図からわかるように、 $V_M \approx 28$ V を境にして記録の極性が反転し、 15 V < V_M < 45 V の領域で両者はほぼ直線関係にある。

本実験に用いた撮像蓄積管は電磁集束型である。この

図3 蓄積電極電圧 V_M と出力信号(相対値)の関係

Relation between the voltage of the storage electrode V_M and the calibrated output.

* 電子シャッター動作による記録時間であるが便宜上露光時間ということにする。

** 露光時間と光電面照度の積で、便宜上これを露光量ということにする。

場合、正負両極性の記録を行うために蓄積電極電圧 V_M を変えると、記録動作時の集束条件が変わり、両者の記録像にわずかな回転ずれを生じる⁵⁾。

画像処理素子である撮像蓄積管の動作点として、操作性、感度、精度などを考慮して、図3のA, B点を選ぶことにした。この動作点では、正負両極性の記録感度が等しく、かつ最大である。このとき、実験管による画像処理の解像度は、前述の像の回転によって中心より周辺の方が悪くなり、中心 400 TV 本、周辺 150 TV 本、像の回転ずれ角 0.7° 、感度は $4.5 \text{ lx} \cdot \text{sec}^*$ であった。

4.2 重畳記録特性

撮像蓄積管では、蓄積面の表面電位の変化分と信号出力はほぼ直線関係にあるから⁹⁾、重畳記録特性はこの表面電位の変化分について検討すればよい。

記録動作時の表面電位の変化分 $\Delta V(V)$ は、

$$\Delta V = KET(\delta - 1) \quad (3)$$

となり、 $\delta > 1$ で正極性、 $\delta < 1$ で負極性の記録が行える⁴⁾。ここで K は定数、 E は光電面照度 (lx)、 T は露光時間 (sec)、 δ は蓄積面の2次電子放出比である。

1回の記録動作中の2次電子放出比は近似的に一定と考えてよく、(3)式は K' を定数として次のようになる。

$$\Delta V = K'ET \quad (4)$$

一方、図3において、 ET の値を変えても α 点の値は変わらないから、直線部分は次式のように表わせる。

$$\Delta V = a(V_M - \alpha) \quad (5)$$

ここで a は ET によって定まる係数、 α は定数である。したがって(4)、(5)式から定数を b とすれば、

$$\Delta V = bET(V_M - \alpha) \quad (6)$$

となる。良好な階調を有する画像を得るためには、ハイライト ($E = E_0$) で ΔV を 4V 程度にする必要がある。図3のA, B点では $|V_M - \alpha| \doteq 15 \text{ V}$ であるから、最適単独記録を行うときの bE_0T の値 $(bE_0T)_{OP}$ は、

$$(bE_0T)_{OP} \doteq 4/15 \quad (7)$$

となる。

記録を行うと表面電位が ΔV だけ変化し、次の記録を重ねるときは前回の記録と条件が変わり、これは(6)式中の V_M が ΔV だけ変化したこととほぼ等価となる。被写体を一定として、1回目、2回目の記録後の表面電位の変化分について考えると、

$$\left. \begin{aligned} V_1 - V_0 &= bET(V_{M1} + V_0 - \alpha) \\ V_2 - V_1 &= bET(V_{M2} + V_1 - \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

となる。添字は記録回数を示し、 V_n は n 回の記録後の表面電位の変化分であり、通常 $V_0 = 0$ である。

(8)式を解いて $V_0 = 0$ とすれば、

$$V_2 = bET\{(V_{M2} - \alpha) + (1 + bET)(V_{M1} - \alpha)\} \quad (9)$$

となり、(9)式は2回の記録を重ねた後の表面電位の変化分を表わす。

(1) イメージ加算

イメージ加算は、蓄積電極電圧を同一電位、 $V_{M2} = V_{M1}$ とすればよく、(9)式に代入して次式を得る。

$$V_2 = 2V_1 + bETV_1 \quad (10)$$

(10)式右辺第2項はイメージ加算の誤差である。蓄積面のダイナミックレンジを考慮して、最適単独記録のときの $1/2$ の露光量 ($bE_0T = 2/15$) を与えれば、誤差は最大で $2/15$ となり、ほぼ良好なイメージ加算が行える。

(2) イメージ減算

イメージ減算は、図3中の α に対して対称な蓄積電極電圧で記録して重畳すればよく $(V_{M1} - \alpha) + (V_{M2} - \alpha) = 0$ を(9)式に代入して、

$$V_2 = bETV_1 \quad (11)$$

となる。このとき、理想的には $V_2 = 0$ となるべきものであるが、(11)式で表わされる誤差を生じる。図4(a)はこれを図示したもので、誤差は光電面照度 E に対して2次曲線となり、ハイライトで約 $2/15$ となる。また被写体のハイライトで誤差をゼロとするには蓄積電極電圧を少し調整すればよく、このときの誤差は図4(b)のように中間調部に生じ、約 $1/30$ となり、さらに良好な減算が行える。

(3) 多重重畳

画像処理を行うためには、蓄積面で多重重畳を行う必要がある。極性の異なる記録を交互に n 組 ($2n$ 個) 重畳する場合の表面電位の変化分は、(8)式と同様にして、

$$\left. \begin{aligned} V_{2n-1} - (1 + bET)V_{2(n-1)} &= bET(V_{M1} - \alpha) \\ V_{2n} - (1 + bET)V_{2n-1} &= bET(V_{M2} - \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

となる。添字は記録回数を示し、 $n = (1, 2, \dots)$ であり、通常 $V_0 = 0$ である。

近似式を用いて(12)式を解くと、

$$V_{2n} = nbET\{(V_{M2} - \alpha) + (1 + bET)(V_{M1} - \alpha)\}$$

図4 イメージ減算とその誤差 V_2

Calibrated error V_2 obtained by image subtraction.

* 撮像蓄積管の感度を表わすもので、良好な映像を得るために必要な露光量で表わす。

$$+(1+bET)^n V_0 \quad (13)$$

となり、 $V_0=0$ とすれば(9)式の n 倍されたものとなる。しかし、通常の場合、記録組数と露光量の積を一定として使用すればよく、 V_{2n} で示される誤差はイメージ減算の場合と同様になる。(13)式右辺第2項は、蓄積面の不均一性、シェーディングなどによって $V_0 \neq 0$ となったとき影響するものである。実験管では、16回程度の重畳まで問題なく行えたが、20回程度でこの影響が現われ始めた。

5. 画像処理

前章までに、撮像蓄積管による画像処理の原理と基本的な機能について述べた。ここでは、これらの基本的な機能を組合せて行う画像処理の具体例について検討し、全画面に並列に作用する画像処理オペレーターを導入する。オペレーターはコンボリューション演算を行うスプレッド関数の形を表すものであり、撮像蓄積管では、必要な記録像の極性と位置の移動を伴った、露光量一定の撮像動作に分解して駆動する。

5.1 空間フィルタリング

空間フィルタリングは、画像の周波数成分を変えるもので、特定方向だけを考える場合と、すべての方向を考える場合とがある。本装置では、記録位置の移動を X 、 Y 直交成分によって制御し、シャッター開放中(露光中)に移動する方法と、シャッター閉鎖中に階段状に移動して新しい位置に記録する方法とがある。これらは高域成分の除去、高域成分の抽出、方向性の抽出、線の太さの変換などに利用できる。

(1) コントラスト増強撮像

通常の光学装置では、光強度分布に対して直接スライスやクリップをする非線形処理を行うことができない。このため、遠方や水中の物体、顕微鏡像などのように、コントラストの小さい被写体を良好に観測することができない。

コントラストの小さい光情報 $g_1(x, y)$ は情報の変化分 $f(x, y)$ と光のバイアス分 C の重畳したもので、

$$g_1(x, y) = f(x, y) + C \quad (14)$$

と表わすことができる。信号変化分の最大振幅を A として、光のバイアス分 $(C-A)$ を除去すれば、

$$g_2(x, y) = f(x, y) + A \quad (15)$$

となり、コントラストが最大となる。この減算は、ビジコンカメラなどで得られる電気信号で行うこともできるが、撮像管のダイナミックレンジで制限され、(15)式に示す信号が小さいものとなり、 S/N が悪くなる。

撮像蓄積管では、被写体 $g(x, y)$ を正極性で撮像し、次に $(C-A)$ に相当する均一被写体を負極性で撮像して

重畳すれば、(15)式で示す画像が得られる。またさらに、被写体 $g(x, y)$ の正極性撮像、均一被写体の負極性撮像を次々に重畳していくことができる。この処理を n 組行ったとき得られる画像 $g_{2n}(x, y)$ は、

$$g_{2n}(x, y) = n \{ f(x, y) + A \} \quad (16)$$

となる。これは蓄積面で信号分が n 倍になることを意味し、 S/N およびコントラストの良好な画像を得ることができる。

なお、均一被写体の負極性撮像を行うかわりに、撮像蓄積管準備動作と同様に電子銃で蓄積面に電子を付着させる方法、被写体の記録位置を大きく動かしながら負極性で撮像(低域成分除去)する方法などがある。

写真1はコントラストの小さい石膏像で実験した例であり、(a)はビジコンカメラによるテレビ画像、(b)は本装置で前記処理を3組行ったものである。

(2) 網目画像の修正

網目画像は、格子点の近傍に周囲の情報を集めたものと考えられ、周囲にこの情報を再分配して平均化すれば、網点ノイズが減少し、修正が行える。図5に網目画像を修正するオペレーターを示す。これらは格子点(オペレーター中心)の情報を図中に示す比重で周囲に分配するもので、正常位置での撮像と、露光中に記録位置を少し移動しながら行う撮像に分解して、重畳する。

写真2は網目画像をオペレーター M_2 で修正した例である。網目画像の修正は、格子点距離によって移動量を選ぶ必要があるが、本装置では、処理像を観測しながらこれを調整することができる。

5.2 2次元微分

輪郭や縁の抽出は、物体の認識、画像の尖鋭化などに利用でき、画像処理装置として欠くことのできない機能である。一般に物体の輪郭や縁は輝度の変化している所

(a) ビジコンカメラで得られる像
Picture taken by a vidicon camera.
(b) コントラスト増強撮像を行ったもの
Picture taken with the method of contrast enhancement by the pickup storage tube camera.

写真1 コントラストの増強
Contrast enhancement.

図 5 網目画像修正オペレーター

Examples of the operator correcting mesh type image.

(a) 原画像
Without the image processing.
(b) 処理像
Result of the image processing.

写真 2 網目画像の修正
Correction of mesh type image.

であるから、輝度分布を微分することが考えられる。

画像 $u(x, y)$ の 1 次微分 (グラディエント) はベクトル、2 次微分 (ラプラシアン) はスカラーとなる。また、1 次微分をとれば輝度の変化する所が抽出され、ラプラシアンをとれば、輝度の勾配が変化する所が抽出される。したがって、1 次微分よりラプラシアンをとった方が輪郭抽出機能が優れていると考えられる。

これらの演算は、画像を“画素の集り”と考えて、差分式に変形して処理する。この方法はコンピューターで広く行われ、正方メッシュでの差分表記について種々提案されている¹⁰⁾。ここでは本装置による画像のラプラシアン演算とその応用について述べる。

画像中の任意の点のラプラシアンは、その点の輝度とその点を中心とする周りの輪の部分の輝度の平均との差で表わされる¹⁰⁾。図 6 に本装置で用いられるラプラシアンオペレーターを示す。これらは中心とその周辺の情報を図中に示す比重で集めて中心の情報とするもので、オペレーターによって周辺の情報の取り方が異なる。また、これらのオペレーターは全画素に対して並列に作用するもので、この点がコンピューターで用いられている

図 6 2 次元 2 次微分 (ラプラシアン) オペレーター

Examples of the Laplacian operator.

 図 7 ラプラシアンオペレーター L_2 の駆動方法

A method of driving the Laplacian operator L_2 .

ものと異なる。なお、 L_1 は本装置独自のものである。

図 7 はラプラシアンオペレーター L_2 の駆動方法を示すもので、図示のように 8 回の撮像に分解し、おのおのに必要な記録の極性と位置の移動を与える。図中 (a) は電子シャッターの開閉を、(b) は記録の極性を制御する蓄積電極電圧を、(c) はイメージ部の偏向コイルに流す電流の波形を示す。

写真 3 は白地に黒い字のある画像を、(a) はオペレーター L_1 で、(b) はオペレーター L_2 で処理したものである。 L_1, L_2 は周囲の平均の取り方が異なるため、パターンの角部でやや異なったものとなる。

写真 4 は、コントラストの小さい石膏像の輪郭を抽出した例である。オペレーターは L_2 であるが、このような角部のない被写体では、オペレーターによる差はほとんど認められなかった。

写真 5 は、画像の尖鋭化を行った例である。ピントのぼけた原画像 (a) の輪郭をオペレーター L_2 で抽出して原画に加え合わせると、(b) に示すように線構造などの高域周波数成分が強調され、ピントの修正が行える。この場合は、図 7 に示すオペレーター L_2 の駆動の最後に原画を加え合わせる正極性の記録を付け加えて行う。このような場合、輪郭と原画の比重配分によって画質が大きく変わるが、本装置では処理の途中経過を観測しながら、原画を少しずつ加えていくこともできる。

(a) オペレーター L_1 Processed by operator L_1
(b) オペレーター L_2 Processed by operator L_2

写真 3 2次元2次微分とそのオペレーターによる差
Two dimensional second derivative.

写真 4 輪郭抽出の例 (オペレーター L_2)
Edge extraction by the operator L_2 .

6. む す び

撮像蓄積管自体で画像処理を行うことについて検討し、コントラストの増強、画像の平均化などの空間フィルタリング、画像の2次微分演算、輪郭の抽出、画像の尖鋭化などが行える画像処理装置について述べた。

これらの画像処理機能は、画像処理オペレーター選択スイッチによって選ぶことができる。また本稿では、静止した被写体について述べたが、動く被写体に対しては、イメージ減算による移動物体の抽出、パターンマッチングなどの処理方法⁴⁾⁵⁾があり、本装置の処理機能に含めることができる。

本装置は、比較的構造が簡単で、処理時間が1 sec以下である。またテレビカメラ方式であるから、フィルム以外の被写体にも適用でき、操作も容易であるから現場用装置として広く利用できる。この実験での問題点は、像のわずかな回転による解像度の劣化であるが、イメージ部を静電集束型にすれば解決できる。

終りに、本研究の機会を与えられた晝馬専務ならびに

(a) 原画像 Without the image processing.

(b) 修正画像 Result of the image processing.

写真 5 画像の尖鋭化

Correction of defocusing image.

実験に協力された佐野邦彦君他関係各位に深く感謝する。

(昭和48年10月29日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) たとえば社内: 画像情報の処理, テレビ誌, 25, 12(1971) 934-947
- 2) J.K. Hawkins and C.J. Munsey: Image Processing by Electron-Optical Techniques, JOSA, 57, 7 (1967) 914-918
- 3) 鈴木: イメージ蓄積管, テレビ誌, 27, 6 (1973) 474-476
- 4) 鈴木, 倉沢: 撮像蓄積管とその画像処理への応用, テレビ誌, 27, 9 (1973) 697-703
- 5) 鈴木, 土屋: 撮像蓄積管の特性とイメージ演算, テレビ全大, 3-11 (1973)
- 6) 土屋, 鈴木: 撮像蓄積管による画像処理, テレビ全大, 3-12 (1973)
- 7) 井上, 佐柳編: 分布と重ね合わせ, 印写工学I, 共立出版 (1970) 38-46
- 8) A. ローゼンフェルド (石田, 島村, 佐雑訳): 電子計算機による画像処理, 共立出版 (1971) 37-50
- 9) 鈴木: 撮像蓄積管, テレビ全大, 3-11 (1967)
- 10) たとえば, 長尾, 金出: パターン認識における縁・線の抽出, 信学誌, 55, 12 (1972) 1618-1627