

画像処理手法を応用したカメラ手ブレ検出装置†

中 嶋 正 之^{††} 安 居 院 猛^{††}
中 内 健 二^{†††} 柳 川 和 雄^{†††}

現在撮影ミスのなかで最も多い部類にあると考えられる手ブレに関し、そのデジタル信号による自動検出アルゴリズムの提案を行う。本論文では、ブレの判定基準をシャッターが開放時間中、50 μ m以上の移動が生じたと判断することにより行い、一方向に並べた複数の画素の濃度変化の割合を検出する方式について示す。濃度検出部の画素数 N を2から16まで変化させ、さらに、画像の階調レベル値を6~12ビットまで変化させてブレ検出のシミュレーションを行った結果を示す。本実験により、 $N=4$ 、階調レベル6ビットの構成でも94%以上のブレが検出可能であることが明らかとなった。また、本検出器を用いてブレ検出装置を構成する方式について述べている。

1. はじめに

近年、エレクトロニクス技術の急速な発展はさまざまな分野に影響を与え新しいニーズを実現可能にしている。このような技術開発の中にあつてカメラ産業も例外ではなくエレクトロニクス技術を応用した種々の新しい機能を備えたものが市場に出回っている。高級一眼レフカメラのなかには、絞り優先 AE、シャッター速度優先およびプログラム AE などの複数の機能をもつマルチモードタイプのものも多く、一眼レフカメラには困難といわれた AF (オートフォーカス) 機能をそなえたものもあり、マイクロコンピュータなどで演算、制御されている。また、モータドライブによるフィルムの巻き上げ、巻き戻しの完全自動化は連続撮影を可能にし、LED や電子音での情報伝達、ストロボ内蔵、データ記入もできこのほか生活防水のほどこされたウェザーマチックなど写真撮影から面倒な操作を不要にしてきた。

今後も、より簡単な操作でかつ確実な写真を失敗なく撮ることができるカメラの開発が続くものと思われる。本論文は、現在撮影のミスのなかで最も多い部類にあると考えられる“手ブレ”に関し、そのデジタル信号処理による自動検出装置の提案を行う。ここでは、画素の濃度変化を入力とする微小移動検出アルゴリズムおよび自動検出装置の構成方法について述べる。

2. カメラの手ブレについて

2.1 ブレについて

一般の写真撮影の失敗には「露出不適性」、「ピンボケ」、「ブレ*」等が考えられるが、このうち露出不適性は EE 機構で、ピンボケは AF 機構で補正および防止が可能であり実現化されている¹⁾。しかし、「ブレ」についてはこれを補正または防止する機能はなく、現在手ブレ警告をしてあるものは、シャッター速度が手ブレを起こす可能性が生じるほど遅くなった場合に警告を発するものであり、実際の手ブレを検出するものではない。ブレ検出が実現されていない理由として、ブレの方向が予測できないこと、ブレが非常に微妙な変化であること、また、実装上の問題から検出部の数が制限されることなどが上げられる。

手ブレの検出方法としては、大きく分けて次の二つの方法が考えられる。

1. 機械的ショックを検出する方法。
2. フィルム面上に写る画像の動きを検出する方法。

本報告では、光電変換素子を検出部に使うことを考え2.の方法について考察する。

2.2 ブレの判定基準について

ブレ検出をシミュレーションする場合、どの程度の画像の移動をブレとするかが問題になるが、本研究では下記のようにブレを定義する。

[定義1] ブレについて

ブレ=35 mm フィルム面上で

100 μ m 以上の画像の移動 (図1参照)

† Camera-Blurring Detection System by Image Processing Method by MASAYUKI NAKAJIMA, TAKESHI AGUI (Tokyo Institute of Technology), KENJI NAKAUCHI and KAZUO YANAGAWA (Fuji Photo Film Co.).

†† 東京工業大学像情報工学研究施設
††† 富士写真フィルム(株)

* ブレには「手ブレ」と「被写体ブレ」があるが、本報告では手ブレのみを対象とする。

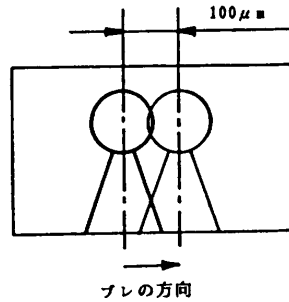


図1 ブレの判定基準

Fig. 1 A criterion of camera-blurring.
3.5 mm フィルム面換算で $100 \mu\text{m}$ 以上の画像の移動をブレとする

この $100 \mu\text{m}$ という値は、移動量を変えたいくつもの写真についてどの程度の移動量を「ブレ」と感じるかという富士フィルムによるアンケート調査の結果、 $100 \mu\text{m}$ 以上をブレと感じる人が多いという結果に起因している。また、実際のカメラの手ブレの場合、ブレによるカメラ本体の動きには平行移動、回転等が考えられるがここでは平行移動のみを対象とした。

3. 手ブレの検出部の構成

手ブレ検出には白黒の濃淡画像を使用している。実用的には被写体は色彩画像であり、検出素子の分光感度等を考慮しなければならないが、実験ではこれについてとくに考慮せず照度情報のみを使った。また写真撮影中（ブレ検出中）の被写体の明るさは変化せず一定のものと仮定する。

ブレ検出は複数個の光電変換素子の組合せで1組の検出部とすることを想定している。本研究では、検出部おのおのの素子に対応するものを「画素」と呼ぶことにする。画素の大きさが、被写体の濃淡変化を検出することができる最小範囲を決める。一次元画像を対象に画素の幅を x としこの画素を n 個連続に並べた検出部を考えると、各画素には画幅 x に対応する画像照度の平均値で入力される。

このような検出部では、サンプリング定理により、 $1/(2x)$ より高い空間周波数を含む画像の完全なサンプリングはできない。また画素数によって直流成分を除く情報として得られる最低の周波数が決まる。実際、被写体にどのような周波数成分が含まれているかは予測できない。もし、 $1/(2x)$ より高い周波数成分が存在する場合、高周波数成分の折り返しひずみにより検出に悪影響を与える可能性がある。本研究では、ブレ検出の判定基準が $100 \mu\text{m}$ であることから、1画素の大

きさを $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ の正方形とした。 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ において検出可能な最高の空間周波数は $1/200 (\mu\text{m}^{-1})$ となり、これ以上の高い周波数成分を含む画像では折り返しひずみにより誤検出する可能性があるが、 $1/f$ 特性²⁾により、 $1/200 (\mu\text{m}^{-1})$ よりも低周波数成分に対しては無視できるものとして扱うことにする。

4. 画素並び方向の移動検出シミュレーション実験

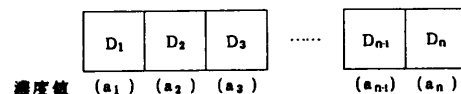
画像が移動する直前と移動後の検出部濃度データから画像移動量と関係する何らかの特徴量を求めることができれば、この特徴量の大小によりブレを判定することができる。そこで、このような特徴量の一つとして検出部各画素の濃度変化の絶対値総和と移動方向にずらした画素との濃度差変化の絶対値総和を用い、これを比較することによって移動点を検出する方法を利用したブレ検出アルゴリズムを提案する。

4.1 微小動きの検出アルゴリズム

対象画像が検出部画素間隔に比べて周期の長い周波数成分で構成され、高周波成分の少ない画像であるとすれば、図2のように一列に並べた検出部の各画素の画像移動による(1)式に示す濃度変化の絶対値は単調に増加し、その総和も単調に増加する(ただし、画像の移動量は1画素以内とする)。すなわち、図2のように画像の移動方向を検出部の画素が並ぶ方向と平行とし、 $D_1 \sim D_n$ 各画素の初期濃度値をそれぞれ $a_1 \sim a_n$ 、画像が1画素移動する途中のある場所での濃度値を $b_1 \sim b_n$ とすると移動による各画素の濃度変化の絶対値の総和 S_1 は(1)式のようにになる。また、1画素ずらした画素の初期濃度 a_{i+1} との差の絶対値総和 S_2 は(2)式のようにになる。

$$S_1 = \sum_{i=1}^{n-1} |a_i - b_i| \quad (1)$$

○画像移動前



○画像移動後

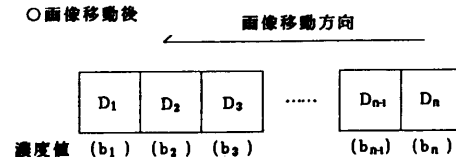


図2 検出方法

Fig. 2 Blurring detection using array detector.

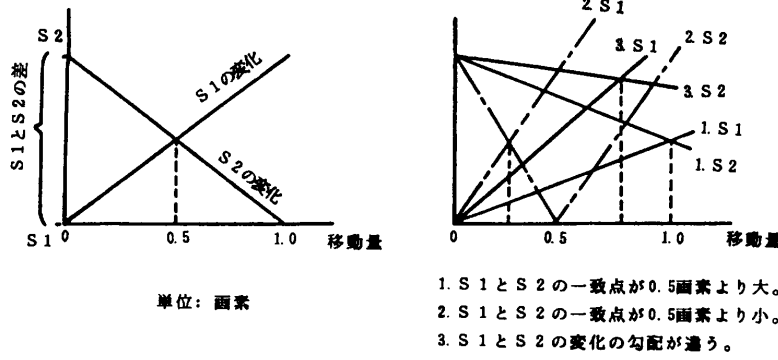


図 3 \$S_1\$ と \$S_2\$ の変化
Fig. 3 State change of \$S_1\$ and \$S_2\$.

$$S_2 = \sum_{i=1}^{n-1} |a_{i+1} - b_i| \quad (2)$$

画像の移動に伴い \$S_1\$ は 0 から増加していき、1 画素移動したところで \$S_2\$ の初期値と等しくなる。\$S_2\$ は \$S_1\$ と逆に減少していき、1 画素移動点で 0 になる。この \$S_1, S_2\$ の変化は画像が画素間隔に比べて十分に周期の長い濃淡で構成されていればほぼ直線的であると考えられ \$S_1\$ と \$S_2\$ の値が一致する点が 0.5 画素移動点である。この様子を図 3(a) に示す。上記のことは、あらかじめ画像の移動方向がわかっている必要があるがこの予測はできない。このため実際の移動検出では左右どちらの方向の移動に対しても検出できるように \$S_1, S_2\$ と逆方向の値も比較する。これを \$T_1, T_2\$ とし、それぞれ(3)式、(4)式のようになる。

$$T_1 = \sum_{i=1}^{n-1} |a_{i+1} - b_{i+1}| \quad (3)$$

$$T_2 = \sum_{i=1}^{n-1} |a_i - b_{i+1}| \quad (4)$$

図 2 において画像が左側に移動した場合、\$T_1, T_2\$ は逆方向移動となるが、画素並び方向の移動であれば \$T_1, T_2\$ の差はほぼ一定になり一致することはない。\$S_1(S_2)\$ と \$T_1(T_2)\$ のどちら側の値が一致したかを検出することにより移動方向も検出することができる。画像移動方向が検出部の画素並び方向と一致する場合は、\$S_1\$ と \$S_2\$、または \$T_1\$ と \$T_2\$ を比較することにより 0.5 画素移動点を見つけることができ、その移動方向も検出できる。すなわち 50 \$\mu\$m 以上の移動が生じたことを検出することができる。これが微小変化検出の原理となっている。

4.2 シミュレーション実験方法

4.1 節で述べたブレ検出のアルゴリズムに従い、実

際にブレ検出実験を行った。人物、風景、集合写真等の各種の写真についてそれぞれ画像中の任意の 16 個所に検出部を配置し、ブレ検出実験を行う。画像の移動は表 1 に示すように 35 回動かし、それぞれの移動画像において(5)式および(6)式により \$S_3, T_3\$ の値が 0 または負になった検出部の数をカウントする。

$$S_3 = S_2 - S_1 \quad (5)$$

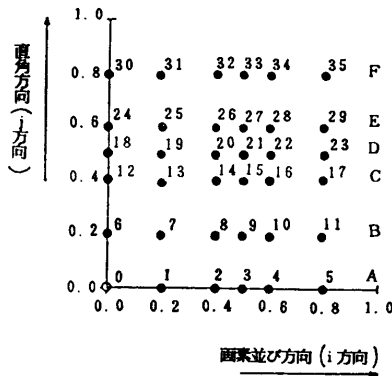
$$T_3 = T_2 - T_1 \quad (6)$$

カウント数の大小により \$S_1\$ と \$S_2\$ の一致点がどのくらいの移動量に多いかという傾向をみる。検出部は行列構成ではなく図 2 のように一列配置であり、シミュレーションは検出部の画素数を \$n\$ (\$n=2, 4, 8, 16\$) とし、データ階調レベ

表 1 移動画像の移動量
Table 1 Values of movement for moving figure.
(単位: 画素)

\$j\$ 方向	\$i\$ 方向	\$j\$ 方向	\$i\$ 方向	\$j\$ 方向	\$i\$ 方向	\$j\$ 方向	\$i\$ 方向	
0	0	0	9	0.2	0.5	18	0.5	0
1	0	0.2	10	0.2	0.6	19	0.5	0.2
2	0	0.4	11	0.2	0.8	20	0.5	0.4
3	0	0.5	12	0.4	0	21	0.5	0.5
4	0	0.6	13	0.4	0.2	22	0.5	0.6
5	0	0.8	14	0.4	0.4	23	0.5	0.8
6	0.2	0	15	0.4	0.5	24	0.6	0
7	0.2	0.2	16	0.4	0.6	25	0.6	0.2
8	0.2	0.4	17	0.4	0.8	26	0.6	0.4
						27	0.6	0.5
						28	0.6	0.6
						29	0.6	0.8
						30	0.8	0
						31	0.8	0.2
						32	0.8	0.4
						33	0.8	0.5
						34	0.8	0.6
						35	0.8	0.8

注) No. 0 は基準画像で移動前の画像である。
\$j\$ 方向は画像に対して垂直方向、\$i\$ 方向は画素並び方向の移動量を表す。



単位: 画素

図 4 画像の移動配置図
Fig. 4 Values of movement of moving figure.

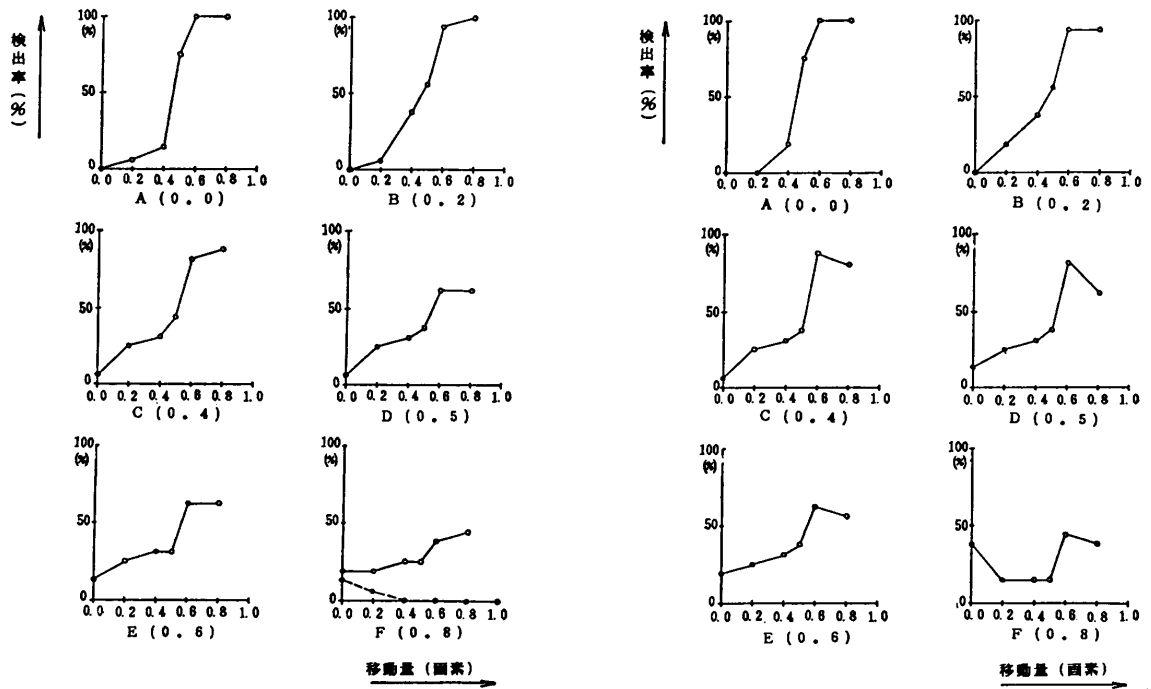
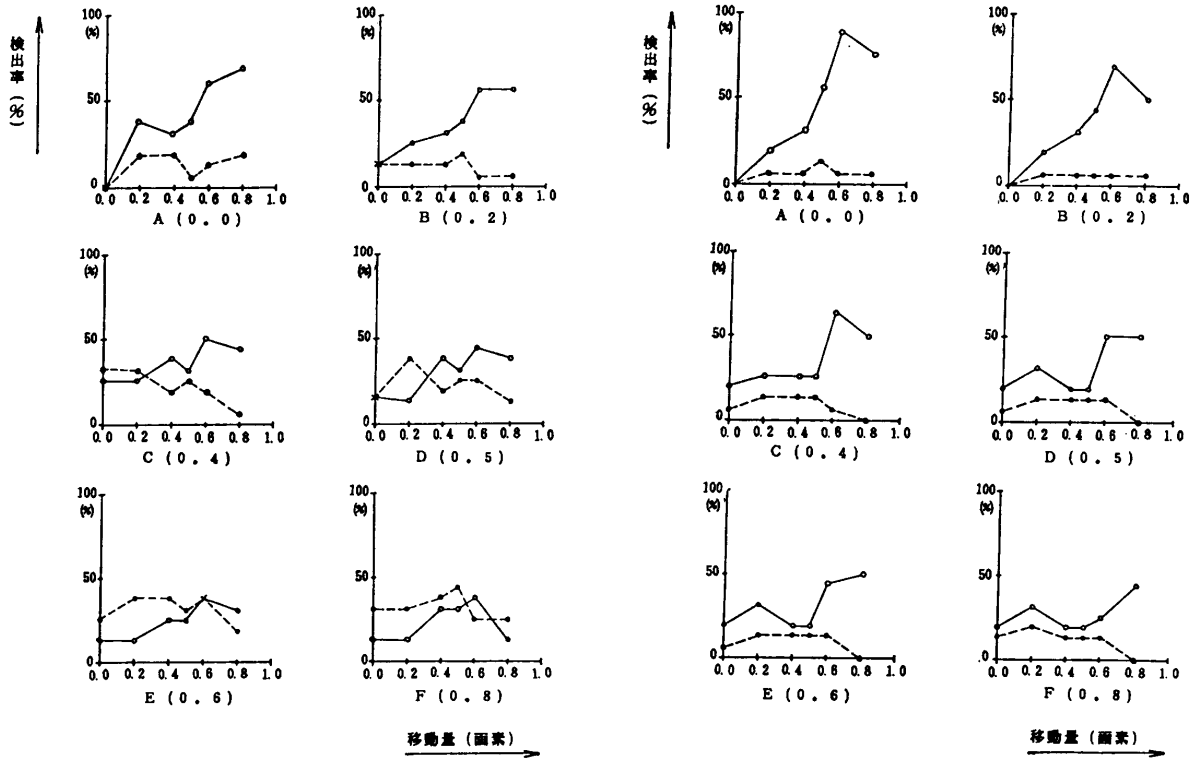


図 5 検出器の画素数に対するブレ検出率 $n=2\sim 16$
 Fig. 5 Experimental results of blurring detection for the number of detector array elements.

ルは12ビット(2,048)とする。

4.3 実験結果

表1および図4に示す35種類の画像の微小変化を与えて、16個所の検出部により、その移動検出を行った結果を図5に示す。この図で検出率とは(5)式および(6)式より S_3 , T_3 の値が0または負である検出箇所全体の割合であり、直線が正しく動きを検出した率を表している。図のグラフには破線で移動方向と逆方向の移動を検出してしまった「逆移動誤検出」も同時に示している。また図中、A(0.0)~F(0.8)の図は図4に示すように j が0から0.8まで移動している場合を示している。すなわち、Aは、図4における0,1,2,3,4,5の順に移動させ、Bは、0,6,7~11、Cは0,12,13,~17、に移動させ、D~Fに従い、直角方向への移動量を増加させている。

図5から次のことがわかる。

1. 各図中、最も良好な結果を示しているのは各図とも、左上のA(0.0)の結果である。これは移動方向が画素並び方向で斜め方向および直角方向の移動がない場合である。
2. 図では画素数 n を変化させているが当然のことながら、いちばんよい結果を示しているのは画素数が

$n=16$ である。これは $n=16$ では0.6画素移動点で100%移動検出して、また逆移動誤検出も少ない。これより、画素数は16で十分であるといえる。

3. n は16以上は不必要であるが、その下限は、画素数 $n=8$ でも $n=16$ と変わらない程度の結果が得られている(Aの検出では0.6画素移動点で97%検出している)。

4. 2とは逆に最も悪い結果を示したのは(a)図に示す実験結果で、これは $n=2$ と画素数が最も少ない条件でAの0.8画素移動点でも50%の検出で $n=16$ の約1/2の検出率であり逆移動誤検出も多くなっている。

5. 2と4より、画素数が少ないとそれだけ情報を失うことになり検出率も低く逆移動誤検出が多くなる。

6. 逆移動誤検出は画素数 n が小さいほど大きくなる。これより、画素数 $n=8$ 以上であれば、88%以上の検出率で微小動きの検出が行えることが明らかとなった。

4.4 S_1 と S_2 の変化について

図6は、代表的な画素並び方向の移動における S_1 と S_2 の変化の様子、図7は、画素並びに対し、斜め

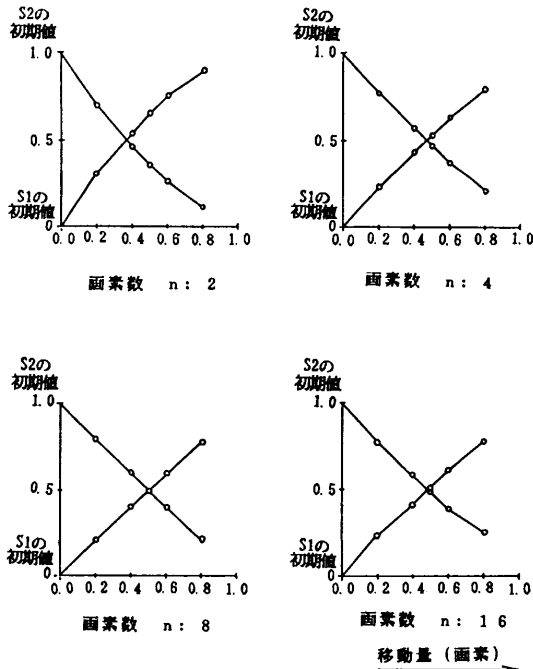


図6 画素並び方向の移動における S_1 と S_2 の変化の様子

Fig. 6 Typical patterns of S_1 and S_2 for movement to sensor array line direction.

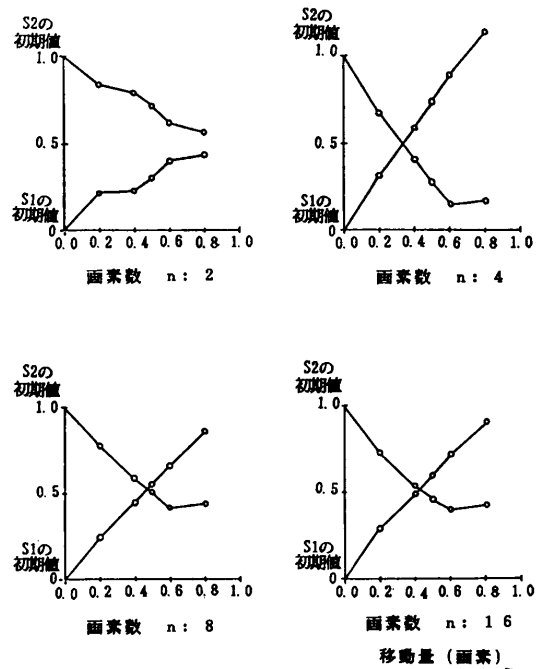


図7 斜め45度方向移動における S_1 と S_2 の変化の様子

Fig. 7 Typical patterns of S_1 and S_2 for movement of 45 degree to the sensor array line direction.

45 度方向移動における S_1 と S_2 の変化の様子を示したものである。ただし画素数は $n=2, 4, 8, 16$ である。

図 6, 図 7 について以下のことがわかる。

図 6: 画素数 ($n=2, 4, 8, 16$) とも、画素並び方向の移動としては図 3 (a) に示すように理想的な結果を示しているが $n=2, 4$ において S_1 と S_2 の一致点が 0.5 画素移動点よりずれている。

図 7: 画素数が $n=2$ では S_1 と S_2 の一致点がない。 S_2 の変化が直線的でなく S_1 の変化の傾きが大きい。

これらの S_1 と S_2 のグラフより共通に次のようにいうことができる。

1. 検出部画素数 $n=8$ と 16 の場合は画素並び方向および斜め 45 度方向移動でも S_1 の変化はほぼ直線的であることがわかる。画素数 $n=2, 4$ では、 S_1 の変化が直線的でなくばらついている。

2. S_2 の変化は、画素並び方向の移動については、直線的であるが、斜め 45 度方向の移動では直線的でない。

3. 画素並び方向移動では、画素数 $n=8$ と 16 では S_1 と S_2 の一致点がほぼ 0.5 画素移動点であるが画素数 $n=2$ と 4 の場合は 0.5 画素移動点よりずれている。また、斜め 45 度方向では S_1 と S_2 の一致が 0.5 画素移動点よりずれていて画素数 $n=2$ では一致しない場合もある。

4 章におけるシミュレーション実験の結果を以下にまとめる。

1. 画素並び方向の移動では、検出部画素数 $n=8, 16$ では 0.6 画素移動点で 100% 移動検出し、 S_1 と S_2 の変化も図 3 (a) に示すように理想的な結果を示している。

2. 検出部画素数が $n=2, 4$ では 0.8 画素移動点であっても検出率が 50% と低く S_1 と S_2 の変化も直線的でなくばらつきがある。画素数が少ないとそれだけ情報を失うことになり検出率も低く、逆移動誤検出が多くなる。

3. 斜め方向の移動検出では、画素並び方向より直角方向移動成分の影響が増大するが、 $n=8$ 以上であれば、高い検出率で移動検出が可能である。

5. ブレ検出装置の構成

4 章に示した実験結果より (1), (2) 式を用いた微小動きの検出方式がブレ検出に有効であることがわかった。そこで実際にブレ検出装置を構成する方式につ

いて示す。

5.1 検出部の配置

一般の写真撮影では、カメラの手ブレ方向としてシャッターを押すという作業に伴い発生すると考えられるため上下方向のブレが多いものと考えられる。そこで、カメラ内に配置する検出部の画素並びは、図 8 に示すように上下方向にすることが望ましい。また、検出部の個数は、多いほうがよいと考えられるが、検出部が多いほどコストの上昇と演算時間が長くなるという欠点がある。また、検出部の配置は、画面内均等に配置することが望ましい。そこで、ブレ検出部は、4 行 4 列の合計 16 個で図 9 に示すように配置した。たとえば、青空などのようにまったく変化のない部分に対しては、本方式によりブレ検出が不可能なので、全画面に均等に配置されることが望ましい。この 16 個の全検出部が同時にブレ検出の演算を行い、 $S_3(T_3)$ の値が 0 または負となった個数をカウントして、複数の検出部が同時にブレの検出を行った時点でブレが生じ

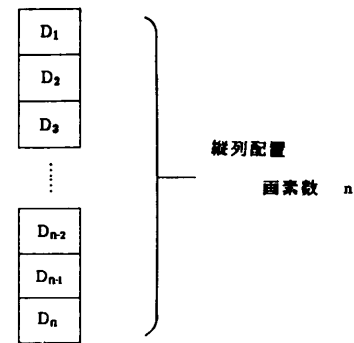
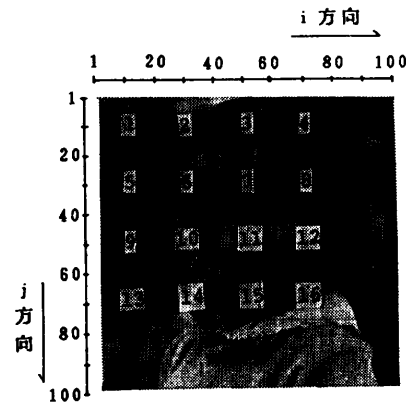


図 8 検出部の構成

Fig. 8 Structure of camera-blurring detectors.



単位: 画素

図 9 検出部の配置

Fig. 9 Arrangement of camera-blurring detectors.

たと判定する。

5.2 検出部画素数と階調レベルの影響

4章で示した実験結果より、画素数は、16 以上は不必要と考えられるので、 $n=4$ と 8 に設定する。また、 S_1, S_2 を計算するための階調レベルは、6, 7, 8, 10, 12 ビットの五つの階調について実験を行った。図 10 は、 $n=4$ における 16 個の検出部に対するブレ検出結果を示すものであり、図 11 は $n=8$ における結果を示したものである。これらの結果より次のことがいえる。

1. 画素並び方向の検出であれば $n=4$ であっても $n=8$ と同様十分検出できることがわかった。
2. 0.6~0.8 画素の移動点で平均検出率が 94% と良好な結果を得ている。
3. 階調レベル値は多いほど良好な結果を示すが、8 ビットもあれば十分であり 6 ビットでも検出は行えることが明らかとなった。

5.3 斜めのブレの検出

5.2 節では、上下方向のブレに対する検出結果を示した。多くのブレは上下方向と考えられるが、多少斜め方向の移動も検出できることが望ましい。

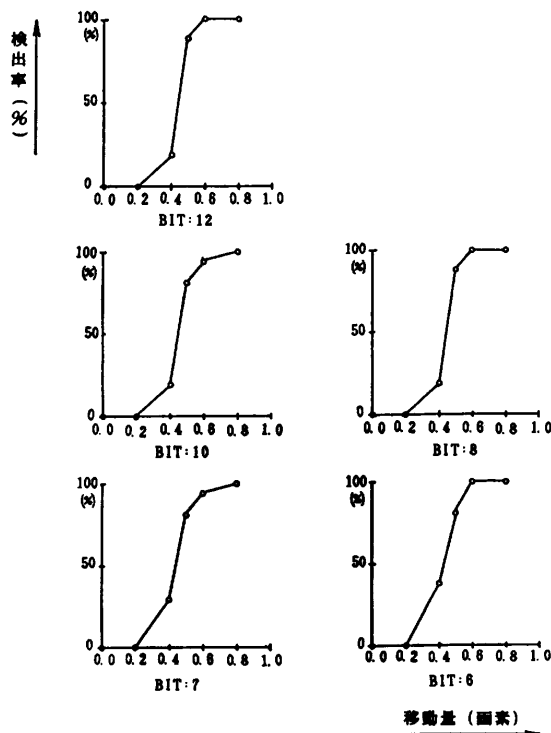


図 10 $n=4$ の場合における階調レベルの影響
Fig. 10 Experimental results for effects of gray-values of $n=4$.

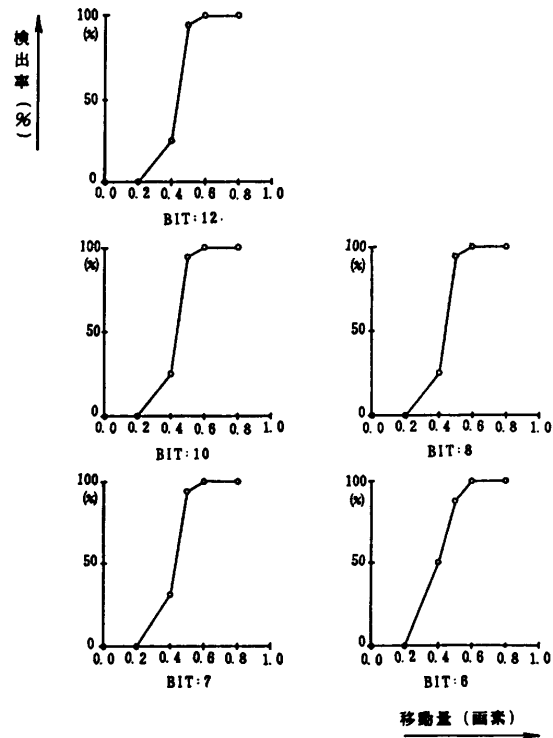


図 11 $n=8$ の場合における階調レベルの影響
Fig. 11 Experimental results for effects of gray-values of $n=8$.

$n=8$ で階調数が 12 ビットの場合、図 5 (c) に示すように、B(0.2) および C(0.4) において 0.6 移動時に約 90% の検出率を得ているが、D(0.4) になると 60% と悪化している。これより、本ブレ検出装置においては、約 ± 20 度以内の斜め方向のブレ検出も可能となると考えられる。

6. おわりに

実際カメラの手ブレ検出の問題としてブレの方向が予測できないこと、ブレが非常に微妙な変化であること、また実装上の点で検出部の数が制限されることなどがあげられる。本報告では、画素濃度変化の絶対値の総和 S_1, S_2 を求め、 $S_1 > S_2$ となる変化を検出することによりカメラのブレを検出する方式の提案を行っている。すなわち 50 μm 以上動いたときブレを検出しはじめ、100 μm 移動したら 100% ブレを検出するように設計を行った。通常のカメラのブレは上下方向が多いものと考えられるため、上下方向に並べられた $n=4, 8$ の検出部画素数でブレの検出実験を行い、 $n=4$ 、階調レベル 64 であっても、94% 以上のブレ検出が行えることを示した。また、本論文では、カメラの移動の検出方式について述べたが、カメラが移動しなく

ても、被写体が動けば同様に移動の検出を行い、その区別は本アルゴリズムだけでは困難である。しかし、ブレの場合、複数の検出部が同時点でブレ検出を行う可能性が高く、対象物体の動きの場合、検出器の位置により時間差が生じる可能性がある。今後は、時間差の利用により正確なブレ検出器の構成について検討を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) Linge, H., Zimmer, H. and Neuhoff, V.: Focus Adjustments Linear Systems, Proceeding of the First International Symposium on Medical Imaging and Image Interpretation ISMIII, 82 (Oct. 1982).
- 2) 武者利光: ゆらぎの世界, 講談社ブルーバックス, 講談社, 東京 (1980).

(昭和 59 年 7 月 5 日受付)

(昭和 60 年 2 月 21 日採録)