輝度レベルの分散値に基づく縁辺検出

藤本公三* 木村 悟** 日野俊樹* 仲田周次*

Edge Detection on Variance of Gray Level

Kozo FUJIMOTO* Satoru KIMURA** Toshiki HINO* Shuji NAKATA*

Significant subject on edge detection is that edge points with small level change can be detected without mis-detection by noise or change of gray level on shadow or curved surface.

In our study we propose a new edge detection method based on variance of gray level. This is effective method, because the variance of gray level indicates the distribution of gray level. Edge points are detected by $V3$ value calculated by following expression.

$$V3(I, J) = V2(I, J) / V1(I, J)$$

$$V1(I, J) = \frac{1}{n^2} \sum_i \sum_j (L(I+i, J+j) - \text{Mean})^2$$

$$V2(I, J) = \frac{1}{n^2} \sum_i \sum_j |(L(I+i, J+j) - \text{Mean})^2 - V1(I, J)|$$

For the edge points, $V3$ value is less than 0.65 when step change is greater than $4\sigma_{\text{noise}}$. The other hand, for the points in the processing region without the edge line, $V3$ value is greater than 0.65. Therefore, $V3$ operator enables to detect only edge points with step change.

Key Words : Edge Detection, Variance of Gray Level, Changing Pattern of Gray Level, Robot Vision, Image Processing.

1. 緒 言

TV カメラ等の撮像装置により得られる画像を理解、認識するには画像における特徴線の抽出が必要となる。ロボットビジョンにおいて、ロボットの作業対象となる物体の形状を特徴付ける縁辺の検出は、作業対象物体が何であるかを照合認識するための形状情報の抽出として、また、その物体が作業空間においてどこにどのような姿勢で存在するかの位置情報の抽出として非常に重要である。ロボットの作業対象となる物体の形状を特徴付ける縁辺における濃淡の変化は、基本的にはステップ変化であ

り、このステップ変化を抽出すればよい。しかし、縁辺検出対象となる濃淡画像においては、このステップ変化にノイズによるランダム変化および“ぼけ”が加わり、ステップ変化が明確でなくなることが多い。さらに、濃淡画像内には、曲面上、影の部分などにおけるランプ状の変化も含んでいる。このような濃淡変化を含む画像からステップ状に変化をする縁辺を検出するオペレータとしては以下のような要件を具備する必要がある。

- (i) 検出可能な輝度レベル変化量が小さいこと。
- (ii) 耐ノイズ性が優れていること。
- (iii) 曲面や影などによる輝度レベル変化に対して誤抽出しないこと。
- (iv) エッジの方向により検出性が変わらないこと。
- (v) 処理が単純であること。

原稿受付 1988 年 11 月 14 日

* 大阪大学工学部

** 松下電器産業株式会社

(vi) 検出のためのしきい値の設定が容易であること。

縁辺検出オペレータとしては一次微分に基づく差分型オペレータ^{1)~5)}、ラプラスアンなどの二次微分に基づくオペレータ^{6)~10)}、エッジモデルを仮定してこのパラメータを求めるモデルフィット法^{11)~12)}など各種の方法が研究・提案されている。しかし、一次微分に基づく差分型オペレータのように画素点間の輝度レベル差に基づくものでは、処理は単純であるが画像に含まれるノイズ要素を検出し易く(耐ノイズ性が悪い)、また、曲面や影などによるランプ状の輝度レベル変化をも誤抽出してしまう。また、二次微分による方法では、ランプ状の輝度レベル変化に対しては有効であるが、微分値に基づくものであるため、耐ノイズ性に問題がある。このため、一般にはラプラスアンにフィルタリング要素を加味させたり(ガウスラプラスアン^{6)~10)}、まず適当なフィルタリングをかけた後このラプラスアンを適用したりして使われている。このフィルタリングは画像復元問題として、各種の方法が提案されている^{13)~15)}。また、このような微分値に基づくオペレータの場合、しきい値の設定が画像の質により異なるという問題も有している。モデルフィット法では、検出しようとする濃淡変化をモデル化し、このモデルに適合した濃淡変化を検出するものであるため、検出したい濃淡変化のみの抽出には有効であるが、処理が煩雑であり、処理対象画像の画質に応じてモデルを検討する必要があると思われる。

このように、ロボットの作業対象となる物体におけるステップ状に変化をする縁辺を有効に検出することを主眼とした縁辺検出オペレータに対しては、さらに検討が必要であると考えられる。

本研究では、標準化濃淡画像($N \times N$ 画素)における $n \times n$ 画素($n \leq N$)の小領域における輝度レベルの分散値に着目し、濃淡レベル変化と分散値の関係を明確にするとともに、この輝度レベルの分散値を用いて、輝度レベルがステップ状に変化する縁辺を検出する方法を確立するものである。

2. 濃淡画像中における輝度レベル変化

物体の形状を特徴付ける縁辺(稜線、輪郭など)は、2つの面の境界線(稜線)または、面と背景の境界線(輪郭)である。背景も1つの面と考えると縁辺はすべて2つの面の境界線となる。濃淡画像において、物体を構成する面は個々に特有の明るさ(輝度レベル)を持つ。このため、縁辺においてその縁辺を共有する2つの面の明るさが変化する。一般に、濃淡画像を対象に縁辺を検出する場合、この輝度レベルの不連続性を利用する。

Fig. 1 は直方体の上に円柱を載せた対象物体を TV

カメラで撮像して得られた標準化濃淡画像における一走査線上の輝度レベル変化を示したもので、縁辺部や曲面上で輝度レベルの変化が大きくなっている。このため、一般に用いられる差分型オペレータを用いて縁辺を検出すると、縁辺だけでなく、曲面上や影での輝度レベル変化の大きな部分も検出してしまう。

この輝度レベルの変化の仕方は照明方法により大きく変わる。方向性の強い照明を用いた場合、その照明方向とTVカメラの2等分方向を向いた面は輝度レベルが高く、それ以外の傾きを有する面では輝度レベルが非常に低くなる。さらに、曲面上や影での濃淡変化も急峻で、縁辺での輝度レベル変化と区別できない。これに対し、**Fig. 2**の図中に示すような拡散照明を用いた場合、図に示すように縁辺での輝度レベル変化と影、曲面上での輝度レベル変化において、その変化度合が異なっている。このため、輝度レベルの変化の仕方を考慮することにより、縁辺だけを検出することが可能となる。ここで用い

Fig. 1 Gray level profile in scene including step edge and column

Fig. 2 Relation between total change V_H and average change ΔD_a of gray level against edge, shadow, local reflection, and column surface

た拡散照明は、蛍光灯の前面に白色の塩化ビニール板を設けたものである。なお、図中の濃淡変化幅 W は連続した濃淡変化を示す部分の幅で、 V_H はその間の濃淡変化量を示す。対象物体としては、白色立方体、白色立方体の上に白色円柱を載せた物体、熱間圧延鋼板で作成した立方体および Al 製の立方体、円柱を用いた。また、物体の置き方は、各種の輝度レベル変化が得られるように配置した。

3. 輝度レベルの分散値の特徴

一般に、縁辺を含む領域と縁辺を含まない領域では輝度レベルの度数分布は Fig. 3 (b-1), (c-1) に示すように差が生じる。つまり、縁辺を含む領域では縁辺を挟む 2 つの面の輝度レベルをピークに有する双峰分布となるのに対し、縁辺を含まない領域では単峰分布となる。また、輝度レベルとその領域内の平均輝度レベルの差の 2 乗 $(\text{Level}-\text{Mean})^2$ の度数分布は、Fig. 3 (b-2), (c-2) に示すように、縁辺を含む領域では単峰分布となるのに対し、縁辺を含まない領域では 0 値をピークにした裾広がり分布となる。この分布は画像データをマクロ的に見た時の輝度レベル分布を実際の画像（ロボットの作業対象物体を撮像した時の画像）におけるデータをもとにモデル化したものである。このように標準化画像内の各小領域 ($n \times n$ 画素) における輝度レベル分布と $(\text{Level}-\text{Mean})^2$ の分布はそれぞれ縁辺を含む場合と縁辺を含まない場合で異なるため、これらの分散値 $V1$ および $V2$ は縁辺を含む領域と含まない領域で異なることが期待される。ここで、 $V1, V2$ は、

$$V1(I, J) = \frac{1}{n^2} \sum_i \sum_j (L(I+i, J+j) - \text{Mean})^2 \quad (1)$$

$$\sum_i = \sum_{i=-n_1}^{n_2} \quad \sum_j = \sum_{j=-n_1}^{n_2}$$

$$n = n_1 + n_2$$

$$n \text{ が奇数の時 } (n_1 = n_2 = (n-1)/2)$$

$$n \text{ が偶数の時 } n_1 = n/2, n_2 = n_1 - 1$$

$$\text{Mean} = \frac{1}{n^2} \sum_i \sum_j L(I+i, J+j) \quad (2)$$

$$V2(I, J) = \frac{1}{n^2} \sum_i \sum_j |L(I+i, J+j) - \text{Mean}|^2 - V1(I, J) \quad (3)$$

で表される。

まず、この分散値 $V1, V2$ を Fig. 4 (a), (b) に示すノイズを含まない理想的なステップ変化（縁辺における輝度レベル変化）とランプ変化（曲面上、影の部分での輝度レベル変化）について考える。この理想濃淡変化モデルは、 $n \times n$ 画素の 2D 画像モデルで、図に示すように各行において、ステップ変化では $k=n/2$ を境に

Fig. 3 Distribution of gray level and (level-Mean)²

(a) scene

(b) in region including edge line

(c) in region without edge line

$L1$ から $L2$ に輝度レベルが変化し、ランプ変化では $L1$ から $L2$ へ等輝度変化をする。つまり、この画像モデルでは、輝度レベルの分散値は輝度レベル変化を一次元の変化として考えることができる。Fig. 4 (a) のステップ変化では、

$$V1 = \frac{1}{n} \left\{ \sum_{k=1}^{n/2} (L1 - \text{Mean})^2 + \sum_{k=n/2+1}^n (L2 - \text{Mean})^2 \right\} \quad (4)$$

ここで、

$$\text{Mean} = (L1 + L2)/2 \quad (5)$$

ゆえに、

$$V1 = \{(L2 - L1)/2\}^2 \quad (6)$$

となる。また、 $V2$ は

$$V2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |(L(k) - \text{Mean})^2 - V1| = 0 \quad (7)$$

となる。また、Fig. 4 (b) のランプ変化では、

$$L(k) = L1 + \frac{k-1}{n-1} (L2 - L1) \quad (8)$$

$$\text{Mean} = \frac{1}{n} \sum \left(L1 + \frac{k-1}{n-1} L2 \right) = L1 + \frac{L2 - L1}{2} \quad (9)$$

Fig. 4 Ideal change of step and ramp

ゆえに

$$\begin{aligned}
 V1 &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left\{ \left(L1 + \frac{k-1}{n-1} (L2 - L1) \right) \right. \\
 &\quad \left. - \left(L1 + \frac{L2 - L1}{2} \right) \right\}^2 \\
 &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left\{ \left(\frac{k-1}{n-1} - \frac{1}{2} \right) (L2 - L1) \right\}^2 \\
 &= \frac{n+1}{3(n-1)} \left(\frac{L2 - L1}{2} \right)^2 \quad (10)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V2 &= \frac{2}{n} \left[\sum_{k=1}^{n/4} \{ (L(k) - \text{Mean})^2 - V1 \} \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{k=n/4+1}^{n/2} \{ V1 - (L(k) - \text{Mean})^2 \} \right] \\
 &= \frac{2(L2 - L1)^2}{n} \left[\sum_{k=1}^{n/4} \left\{ \frac{2k - n - 1}{2(n-1)} \right\}^2 \right. \\
 &\quad \left. - \sum_{k=n/4+1}^{n/2} \left\{ \frac{2k - n - 1}{2(n-1)} \right\}^2 \right] \\
 &= \frac{n^2}{4(n-1)^2} \left(\frac{L2 - L1}{2} \right)^2 \quad (11)
 \end{aligned}$$

となる。式(6),(7),(10),(11)からわかるように、分散値 $V1, V2$ はそれぞれ輝度レベル変化の絶対量

Fig. 5 Value of $V1, V2, V3$ in the region including step change and ramp change without noise

$(L2 - L1)^2$ の値により大きく変化する。ここで、 $V1, V2$ を処理領域内の最大変化量 $(L_{\max} - L_{\min})$ での基準化を計る。 $\{(L_{\max} - L_{\min})/2\}^2$ で除した値をそれぞれ $VV1, VV2$ とすると、この場合、 $L_{\max} = L2, L_{\min} = L1$ より

ステップ変化に対しては

$$VV1(\text{step}) = 1 \quad (12)$$

$$VV2(\text{step}) = 0 \quad (13)$$

ランプ変化に対しては

$$VV1(\text{ramp}) = \frac{n+1}{3(n-1)} \quad (14)$$

$$VV2(\text{ramp}) = \frac{n^2}{4(n-1)^2} \quad (15)$$

となり、処理領域の大きさにのみ依存する値となる。

Fig. 5 は、これを図示したもので、ステップ変化とランプ変化では明瞭な差が見られる。さらにこの図より、ランプ変化に対しては $VV1, VV2$ ともに同程度の値であるのに対し、ステップ変化では大きく異なっているのがわかる。このため、 $VV2$ を $VV1$ で除した値 $V3$

$$V3 = \frac{VV2}{VV1} = \frac{V2}{V1} \quad (16)$$

は、式(10)~(13)より

$$V3(\text{step}) = 0 \quad (17)$$

$$V3(\text{ramp}) = \frac{3}{4} \times \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (18)$$

となり、Fig. 5 からわかるように、ステップ変化、ランプ変化とも処理領域の大きさに関わらずほぼ一定値となる。さらに、この $V3$ はステップ変化とランプ変化とでより明瞭な差となっている。

4. 輝度レベル分散値の耐ノイズ性

前項に示したのは、ノイズ成分を含まない理想変的な

Fig. 6 Influence of noise on V1 Value

化に対するものである。しかし、一般の画像にはノイズ成分が含まれており、このノイズ成分が縁辺検出を阻害している。そこで、ステップ変化およびランプ変化に正規分布ノイズを加えた輝度レベル変化に対する輝度レベル分散値について検討する。

Fig. 4 に示したモデル画像に付加されるノイズレベルを $N(k)$ とすると、ノイズが付加されたステップ変化に対する分散値 $V1$ は、(付録 1 参照)

$$V1 = \left(\frac{L2 - L1}{2} \right)^2 + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n N^2(k) \quad (19)$$

となり、ノイズの付加によりノイズ成分 $N(k)$ の 2 乗平均の分だけ分散値は大きくなる。Fig. 6 は、この輝度レベル分散値 $V1$ の耐ノイズ性を計算機シミュレーションした結果である。ここで示す結果は、処理領域 100 個の値で、各プロットはその平均値、縦線はバラツキを示している。バラツキはほぼ正規分布をなしており、処理個数を増やすと多少バラツキが大きくなるが、大きな変化はない。これからわかるように、処理領域を大きく取るほど含まれるノイズ要素が正規分布に近づき、ノイズの影響を除外しやすくなる。ノイズ分布の σ 値が 3.0 の時は処理領域 8*8 以上、また、 σ 値が 5.0 の時は処理領域 16*16 以上になると、ステップ変化量 6.0 の縁辺要素を抽出することができる。このように、輝度レベ

ルの分散値 $V1$ は、耐ノイズ性に優れている。しかし、この $V1$ は前項で述べたように、曲面上や影の部分で生じるランプ状の輝度レベル変化に対しても大きな値を取る。

そこで、次にノイズを含むステップ変化とランプ変化について前項で示した $VV1, VV2$ について検討する。ノイズを含むステップ変化の $VV1$ は

$$VV1 = \frac{1}{1 + (1/A)^2} + \frac{f1(N(k))}{((L_{\max} - L_{\min})/2)^2} \quad (20)$$

$$A = (L2 - L1) / (\max N(k) - \min N(k))$$

$$f1(N(k)) = 1/n * \sum N^2(k)$$

と表される(付録 2)。ここで、ノイズによる最大変化がステップ変化量と同程度の場合 ($A=1$) を考えると、

$$VV1(A=1) > 0.5 \quad (21)$$

となる。

ノイズが付加されたステップ変化の $VV2$ は、

$$VV2 = \frac{f2(N(k))}{\{(L_{\max} - L_{\min})/2\}^2} \quad (22)$$

$$f2(N(k)) = \frac{2}{n^2} \sum N(k) * \left\{ \sum^{n/4} N1(k) - \sum^{n/4} N2(k) \right\}$$

$N1(k)$: 正のノイズ $N2(k)$: 負のノイズ

となる(付録 3)。また、ノイズが付加されたランプ変化における輝度レベルの分散値 $VV1, VV2$ は以下のよ

Fig. 7 VV1 value in the region including step change and ramp change with noise

Fig. 8 VV2 value in the region including step change and ramp change with noise

うになる (付録 4, 5).

$$VV1 = \frac{n+1}{3(n-1)} + \frac{f3(N(k))}{\{(L_{\max} - L_{\min})/2\}^2} \quad (23)$$

$$f3(N(k)) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n N^2(k) + \frac{L2 - L1}{n} \sum_{k=1}^n N(k) \frac{2k - n - 1}{n - 1}$$

$$VV2 = \frac{n^2}{4(n-1)} + \frac{f4(N(k))}{\{(L_{\max} - L_{\min})/2\}^2} \quad (24)$$

$$f4(N(k)) = \frac{4}{n} \left\{ \sum_{k=1}^{n/4} N(k)(L(k) - \text{Mean}) - \sum_{k=n/4+1}^{n/2} N(k)(L(k) - \text{Mean}) \right\} + \frac{2}{n} \left\{ \sum_{k=1}^{n/4} N^2(k) - \sum_{k=n/4+1}^{n/2} N^2(k) \right\}$$

式 (20)~(24) に示したように、ノイズが付加されることにより分散値は変化する。ステップ変化に対しては、VV1 値はノイズの付加により減少し、VV2 値は増加する。また、ランプ変化に対する分散値においては、ノイズの状態によりノイズによる値が正負両値を取るため、ノイズの無い時の分散値を基準値としたバラツキとして現れる。

Fig. 7, 8 は、ノイズを含むステップ変化とランプ変

Fig. 9 V3 value in the region including step change and ramp change with noise

化に対する VV1, VV2 を算出した結果である。なお、処理領域は 8 画素 * 8 画素で行なったものである。これらの結果には式 (20)~(24) で示されたノイズによる影響がよく現れている。これらからわかるように、ランプ変化に対してはランプの変化量、ノイズの大きさ (σ で表示) に関わらずほぼ一定で、

$$VV1(\text{ramp}) < 0.5 \quad (25)$$

$$VV2(\text{ramp}) > 0.3 \quad (26)$$

となっている。また、ステップ変化に対しては、変化量が小さくなるほど、また、ノイズの大きさが大きくなるほどランプ変化に対する値に近くなっている。

次に、式 (14) で示した V3 について検討する。

Fig. 9 は Fig. 7, 8 で示した VV1(V1), VV2(V2) から算出した V3 を示したものである。これからわかるように、ステップ変化に対する値とランプ変化に対する値がより明瞭に分離されている。図からわかるように、ステップ変化に対して、

$$\frac{\text{ステップ変化量}}{\sigma_{\text{noise}}} \geq 4 \Rightarrow V3(\text{step}) < 0.65 \quad (27)$$

Fig. 10 Influence of edge profile on V3 value

であり、ランプ変化に対しては、

$$\left. \begin{array}{l} V3(\text{ramp}) > 0.65 \\ V3(\text{ramp}) 90\% > 0.7 \end{array} \right\} \quad (28)$$

で、縁辺検出の場合、しきい値として0.65~0.7の値を採用すればよく、他のオペレータの場合に問題となるしきい値の決定はこの分散オペレータを用いる場合においてはあまり問題とならない。

TVカメラで、物体を撮像した時に画像に含まれるノイズ成分は、用いるカメラおよび撮像する対象で異なる。本研究で使用した1インチのビジコンとカルニコンをそれぞれ撮像管として持つTVカメラで、室内の壁を撮像し、標本数 256 * 256、8ビットのデジタル画像にした時のノイズレベルは、ビジコンで $\sigma=2.0$ 、カルニコンで $\sigma=1.3$ 程度であった。このノイズレベルから判断するとステップ変化量が8程度の縁辺もランプ変化を誤抽出せずに容易に検出できる。

5. 各種縁辺に対する輝度レベル分散値

Fig. 9 は、縁辺での輝度レベル変化が理想的なステップ変化で、それにノイズ成分が加わったものに対して処理した結果である。しかし、一般の画像では、縁辺がボケて急峻なステップ変化とならないことがよくある。また、縁辺を挟む両側の輝度レベルが一定でなく、ランプ

Fig. 11 Influence of composed ramp change on V3 value

状に変化する場合が多い。そこで、これらのことを考慮した各種の縁辺に対して検討を行う。

Fig. 10 は、縁辺での立ち上がり方を図中に示すようにに変化させたときの V3 値を各々算出した結果である。これからわかるように、ステップ変化の立ち上がりが急峻でなくなるほど V3 値は大きくなり、ランプ変化との境界値 ($V3=0.65$) に近づく。しかし、処理領域の 1/2 以下の立ち上がり (ボケ) であれば、大きな問題ではないようである。また、ボケが特に問題になるのは、ステップ変化量の大きい場合であり、この場合には、V3 値自体が小さいので、問題にはならない。

Fig. 11 は、縁辺の両側の輝度レベルを図中に示すように、ランプ状に変化させたものに対する V3 値を算出したものである。ランプの変化 ΔL_r が正の場合は V3 値に大きな影響を与えないが、 ΔL_r が負の変化をするものでは、V3 値に大きく影響し、縁辺検出を困難にすると考えられる。図からわかるように、画像に付加されるノイズの σ 値が 2.0 の場合、正のランプ変化が複合された縁辺では、ランプ変化量 ΔL_r がステップ変化量 ΔL_s の 1/3 まではランプ変化と区別可能であり、負のランプ変化が複合された縁辺では ΔL_r が ΔL_s の 1/10 まではランプ変化と区別可能である。

6. V3 オペレータによる縁辺検出線幅

次に、V3 を縁辺検出オペレータとしたときの検出線幅について検討する。Fig. 12 (b)~(d) は、図 (a) に示すステップ状変化に対する V1, V2, V3 の値の変化を示したものである。ここに示した値は、Fig. 1 に示した直方体の上に円柱を載せた物体を TV カメラで撮像した濃淡画像のある縁辺点近傍の輝度レベル変化およびその分散値を示したものである。分散値 V1 は縁辺点

Fig. 12 Profile of gray level and value of V_1 , V_2 , V_3 in neighbourhood of edge point

で最大となり、 V_2 は縁辺点で小さくその両側で大きくなっている。このため、この両者の商である V_3 は、縁辺点近傍でのみ値が小さくなる。このため、 V_1 で縁辺を検出した場合は、処理領域に匹敵する検出線幅を有するが、 V_3 の場合では、処理領域サイズの $1/2$ 以下と細く、また、この線幅はステップ変化量の大きさにあまり影響されない。

7. 処理結果

輝度レベルの分散値 V_1 は、Fig. 6 からわかるように、画像中にランプ的な変化がないものに対する耐ノイズ性はオペレータ V_3 より優れている。また、 V_3 は V_1 を基に算出される。このことより、縁辺検出に際しては、この V_1 , V_3 両オペレータを組み合わせて抽出するのが、縁辺検出性能、処理時間の点で有効である。つまり、

$$V_1 \geq V_1 \text{ th. AND. } V_3 \leq V_3 \text{ th.} \quad (29)$$

V_1 th.; V_1 のしきい値 (10 程度)

V_3 th.; V_3 のしきい値 (0.65 程度)

を満たす点を縁辺要素点として抽出する。

Fig. 13 Image model for edge detection

この分散オペレータ V_3 の縁辺検出性能を差分型オペレータおよびガウ斯拉プラシアンによるオペレータと比較するため、Fig. 13 に示すような縁辺画像を作成した。これは 240 画素 * 240 画素の画像メモリを 100 分割 (10 * 10) し、その各々の領域 (24 画素 * 24 画素) 内の中央に 1 本縁辺を含むモデル画像である。各区画において、縁辺でのステップ変化量 ΔL_s を変化させ、さらに縁辺の両側の輝度レベル変化をランプ状に変化 (ランプの変化量 ΔL_r) させたものである。また、参考に最下列に一定なランプ変化パターンを作成してある。なお、ノイズとしては $\sigma=2.0$ の正規分布ノイズを付加してある。比較対象に差分型オペレータとガウ斯拉プラシアンを用いたのは、両者とも縁辺検出処理が単純であり、さらに、本研究で取り扱っているランプ状の輝度レベル変化に対する比較に適しているためである。

Fig. 14 は、Fig. 13 の縁辺検出比較画像から各オペレータにより縁辺を検出した結果である。(a) は分散オペレータ V_3 による結果、(b) は 5 画素 * 5 画素の処理領域による差分型オペレータによる結果 (Sobel オペレータを拡張したもの)、(c) は処理領域 9 画素 * 9 画素のガウ斯拉プラシアン画像からゼロクロス点を検出したものである。これらからわかるように、差分型オペレータは、縁辺の両側の輝度レベル変化が一定値 (ステップ変化) の場合には、良好な検出がなされているが、ランプ変化を含むと誤抽出してしまう。この誤抽出を少なくしようとする、縁辺検出しきい値を大きくしなければならず、この場合、縁辺の検出性能が大きく低下す

る。また、ガウスラプラシアンのような2次微分に基づくオペレータの場合、ランプ状変化の誤抽出はほとんどなくなるが、基本的に微分演算であるので、処理領域を

9画素×9画素としているにもかかわらずノイズによる誤抽出が生じている。これに対して、分散値 $V3$ による縁辺検出は、ノイズ、ランプ変化ともに誤抽出せずに良好な結果となっている。

Fig. 15 (b) は、Fig. 15 (a) に示す濃淡画像（直方体の上に円柱が載ったもの）に対して、式 (29) により縁辺を検出したものである。なお、処理領域は8画素×8画素で行っている。また、Fig. 15 (c) は Sobel オペレータを用いて検出した結果である。これからわかるように、差分形オペレータで縁辺を検出すると曲面（円柱）上等の輝度レベル変化の大きい箇所を縁辺として抽出している。これに対し、 $V3$ を用いて抽出を行なったものでは、多少の途切れがあるが不要な縁辺要素をほとんど抽出していない。 $V3$ による検出での線の途切れは、縁辺での輝度レベル変化のなかった箇所と3本以上の縁辺が交わる箇所である。

このように、輝度レベルの分散値を基にした $V3$ オペレータを用いると、拡散的な照明下において、曲面上や影等でのランプ状の輝度レベル変化を抽出することなく、 $4\sigma_{\text{noise}}$ より大きなステップ変化を示す縁辺を容易に検出することができる。なお、対象物としては、それを構成する面が滑らかな反射特性を示すものに対して有効であり、鏡面反射的な面では局部反射部を検出してしまふ。

以上に示したように、この $V3$ をオペレータとして縁辺を検出することは、耐ノイズ性、ランプ変化との分離性、しきい値設定の容易さ、検出線幅、さらに処理の単純さの点から非常に有効であると考えられる。

8. 結 論

本研究は、輝度レベル変化と分散値の関係を明らかにし、この輝度レベルの分散値を基にした縁辺検出法を確立した。以下に本研究で明らかになった点を要約する。

- 1) 拡散的な照明を用いることにより、縁辺における輝度レベル変化を広範囲に作り出すことができ、さらに、影や曲面上での輝度レベル変化を緩やかなものとすることができる。
- 2) 輝度レベルの分散値 $V1$ は、画像に含まれるノイズ成分を平滑化する効果が大きい。
- 3) 輝度レベルの分散値 $V1$ をその分散値算出領域内の $\{(L_{\max} - L_{\min})/2\}^2$ で除した値 $VV1$ は縁辺を含む領域で大きく縁辺を含まない領域で小さくなる (0.5 以下)。
- 4) (輝度レベルー平均レベル)² の分散値 $V2$ をその分散値算出領域内の $\{(L_{\max} - L_{\min})/2\}^2$ で除した値 $VV2$ は縁辺を含む領域で小さく、縁辺を含まな

(a)

(b)

(c)

Fig. 14 Processing result for the image shown by Fig. 13

- (a) $V3$ operator. (8 pixel×8 pixel) $V3 \text{ th}=0.65$
 (b) Differential Operator (5 pixel×5 pixel)
 (c) Gause Laplacian (9 pixel×9 pixel) $\sigma=1.0$

Fig. 15 Processing result

(a) gray image (b) edge image detected by V1 (8*8) and V3 (8*8)
 (c) edge image detected by Sobel operator

い領域で大きくなる (0.3 以上).

- 5) 分散値 $V2$ を分散値 $V1$ で除して得られる $V3$ は, ステップ変化に対して,

$$\frac{\text{ステップ変化量}}{\sigma_{\text{noise}}} \geq 4 = > V3(\text{step}) < 0.65$$

であり, ランプ変化に対しては,

$$V3(\text{ramp}) > 0.65, \quad V3(\text{ramp})90\% > 0.7$$

で, ステップ変化に対する値とランプ変化に対する値が 0.65~0.7 で分離できる.

- 6) $V3$ オペレータで検出される縁辺の線幅は, 処理領域サイズの半分以下 (8 画素×8 画素で, 線幅 3 画素程度) である.

参 考 文 献

- 1) J.M.S.Prewitt, "Object enhancement and extraction" Picture Processing and Psychopictories Academic Press. p.75-149, 1970,
- 2) R.Kirsch, "Computer determination of the constituent structure of biological images" Comput. Biomed. Res. Vol.4, p.315-328, 1971.
- 3) A.Rosenfeld and M.Thurston, "Edge and curve detection for visual scene analysis" IEEE Trans. on Computer Vol.C-20, p.562-569, 1971.
- 4) A.Rosenfeld, M.Thurston and Y.H.Lee, "Edge and curve detection; Further experiments" IEEE Trans. on Computer Vol.c-21, p.677-715, 1972.
- 5) R.Nevatia and K.R.Babu, "Linear feature extraction and description" Computer Graphics and Image Processing Vol.13, p.257-269, 1980.
- 6) D.Marr and E.Hildreth, "Theory of edge detection" Proc. R. Soc. Lond. B207, p.187-217, 1980.
- 7) W.H.H.J.Lunscher and M.P.Beddoes, "Optimal edge detector design I: Parameter selection and noise effects" IEEE Trans. on PAMI Vol.PAMI-8, No.2, p.164-177, 1986.
- 8) W.H.H.J.Lunscher and M.P.Beddoes, "Optimal edge detector design II: Coefficient quantization"

IEEE Trnns. on PAMI Vol.PAMI-8, No.2, p.178-187, 1986.

- 9) J. Canny, "A computational approach to edge detection" IEEE Trans. on PAMI Vol.PAMI-8, No.6, p.679-698, 1986.
- 10) J.S.Chen, A.Huertas and G.Medioni, "Fast convolution with Laplasian-Gaussian mask" IEEE Trans. on PAMI Vol.PAMI-9, No.4, p.584-590, 1987.
- 11) M.H.Hueckel, "An operator which locates edges in digitized pictures" Journal of ACM, Vol.18, p.113-125, 1971.
- 12) M.H.Hueckel, "A local visual operator which recognizes edges and lines" Journal of ACM, Vol.20, p.634-647, 1973.
- 13) D.Slepian, "Linear least squares filtering of distorted images" J. Opt. Soc. America, Vol.57, p.2353-2362, 1967.
- 14) A.K.Jain and E.Angel, "Image restration, modeling, and reduction of dimensionality" IEEE Trans. on Computers, Vol.C-23, No.5, p.470-476, 1974.
- 15) A.K.Jain, "A semicasual model for recursive filtering of two-dimensional images" IEEE Trans. on Computers, Vol.C-26, No.4, p.343-350, 1977.

【付録 1】 式 (19) の導出

Fig. 5 に示した付加されるノイズレベルを $N(k)$ とすると, ノイズが付加されたステップ変化に対する分散値 $V1$ は,

$$V1 = \frac{1}{n} \left\{ \sum_{k=1}^{n/2} (L1 + N(k) - \text{Mean})^2 + \sum_{k=n/2+1}^n (L2 + N(k) - \text{Mean})^2 \right\} \quad (1.1)$$

ここで, 平均レベル Mean は,

$$\begin{aligned} \text{Mean} &= \frac{1}{n} \left\{ \sum_{k=1}^{n/2} (L1 + N(k)) + \sum_{k=n/2+1}^n (L2 + N(k)) \right\} \\ &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n N(k) + \frac{L1 + L2}{2} \end{aligned} \quad (1.2)$$

ゆえに, $V1$ は

$$V1 = \left(\frac{L2 - L1}{2} \right)^2 + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n N^2(k) \quad (1.3)$$

で表される。

【付録 2】 式 (20) の導出

ノイズを含むステップ変化の場合、処理領域内の最大輝度レベル $L_{\max}$ および最小輝度レベル $L_{\min}$ は、

$$\left. \begin{aligned} L_{\max} &= L2 + \max N(k) \\ L_{\min} &= L1 + \min L(k) \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

となり、レベルの基準化量 $((L_{\max} - L_{\min})/2)^2$ は、

$$\begin{aligned} & \left(\frac{L_{\max} - L_{\min}}{2} \right)^2 \\ &= \left(\frac{L2 - L1 + \max N(k) - \min N(k)}{2} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.2)$$

ここで、

$$\max N(k) - \min N(k) = (L2 - L1)/A \quad (2.3)$$

とすると、

$$\left(\frac{L_{\max} - L_{\min}}{2} \right)^2 = \frac{(1 + 1/A)^2 (L2 - L1)^2}{4} \quad (2.4)$$

となり、 $VV1$ 値は

$$VV1 = \frac{1}{1 + (1/A)^2} + \frac{f1(N(k))}{((L_{\max} - L_{\min})/2)^2} \quad (2.5)$$

$$f1(N(k)) = 1/n \sum N^2(k)$$

と表される。

【付録 3】 式 (22) の導出

ノイズが付加されたステップ変化の $V2$ は、

$$\begin{aligned} V2 &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |(L(k) + N(k) - \text{Mean})^2 - V1| \\ &= 0 \end{aligned} \quad (3.1)$$

で表される。こま、正のノイズと負のノイズの出現確率が 1:1 であるとし、正のノイズを $N1(k)$ 、負のノイズを $N2(k)$ とすると、

$$\begin{aligned} V2 &= \frac{1}{n} \left[\sum_{k=1}^{n/4} \{(L1 + N1(k) - \text{Mean})^2 - V1\} \right. \\ & \quad + \sum_{k=1}^{n/4} \{(L2 + N1(k) - \text{Mean})^2 - V1\} \\ & \quad + \sum_{k=1}^{n/4} \{V1 - (L1 + N2(k) - \text{Mean})^2\} \\ & \quad + \sum_{k=1}^{n/4} \{V1 - (L2 + N2(k) - \text{Mean})^2\} \\ & \quad \left. + \frac{2}{n} (L1 + L2 - 2 * \text{Mean}) \right. \\ & \quad \left. \times \left\{ \sum_{k=1}^{n/4} N1(k) - \sum_{k=1}^{n/4} N2(k) \right\} \right] \end{aligned} \quad (3.2)$$

となる。ここで、式 (1.2) より

$$\text{Mean} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n N(k) + \frac{L1 + L2}{2} \quad (3.3)$$

ゆえに、

$$V2 = \frac{2}{n^2} \sum N(k) * \left\{ \sum_{k=1}^{n/4} N1(k) - \sum_{k=1}^{n/4} N2(k) \right\}$$

$$= f2(N(k)) \quad (3.4)$$

となる。よって、 $VV2$ は

$$VV2 = \frac{f2(N(k))}{\{(L_{\max} - L_{\min})/2\}^2} \quad (3.5)$$

となる。

【付録 4】 式 (23) の導出

ノイズが付加されたランプ変化の $V1$ は、

$$\begin{aligned} V1 &= \frac{1}{n} \sum \left\{ L1 + \frac{k-1}{n-1} (L2 - L1) + N(k) \right. \\ & \quad \left. - \left(L1 + \frac{L2 - L1}{2} \right) \right\}^2 \\ &= \frac{1}{n} \sum \left\{ \frac{k-1}{n-1} - \frac{1}{2} \right\} (L2 - L1) + N(k) \right\}^2 \\ &= \frac{n+1}{3(n-1)} \left(\frac{L2 - L1}{2} \right)^2 + \frac{1}{n} \sum N^2(k) \\ & \quad + \frac{L2 - L1}{n} \sum N(k) \frac{2k - n - 1}{n - 1} \end{aligned} \quad (4.1)$$

となる。よって $VV2$ は、

$$VV2 = \frac{n+1}{3(n-1)} + \frac{f3(N(k))}{\{(L_{\max} - L_{\min})/2\}^2} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} f3(N(k)) &= \frac{1}{n} \sum N^2(k) \\ & \quad + \frac{L2 - L1}{n} \sum N(k) \frac{2k - n - 1}{n - 1} \end{aligned}$$

【付録 5】 式 (24) の導出

ノイズが付加されたランプ変化の $V2$ を考える場合、まずノイズの付加されたレベル値 $(L(k) + N(k))$ を降べきの順に並べかえると、 $V2$ は、

$$\begin{aligned} V2 &= \frac{2}{n} \left[\sum_{k=1}^{n/4} \{(L(k) + N(k) - \text{Mean})^2 - V1\} \right. \\ & \quad + \sum_{k=n/4+1}^{n/2} \{V1 - (L(k) + N(k) - \text{Mean})^2\} \\ & \quad = \frac{n^2}{4(n-1)} \left(\frac{L2 - L1}{2} \right)^2 \\ & \quad + \frac{4}{n} \left\{ \sum_{k=1}^{n/4} N(k)(L(k) - \text{Mean}) \right. \\ & \quad \left. - \sum_{k=n/4+1}^{n/2} N(k)(L(k) - \text{Mean}) \right\} \\ & \quad + \frac{2}{n} \left\{ \sum_{k=1}^{n/4} N^2(k) - \sum_{k=n/4+1}^{n/2} N^2(k) \right\} \\ & \quad \left. = \frac{n^2}{4(n-1)} \left(\frac{L2 - L1}{2} \right)^2 + f5(N(k)) \right] \end{aligned} \quad (5.1)$$

となり、 $VV2$ は、

$$VV2 = \frac{n^2}{4(n-1)} + \frac{f5(N(k))}{\{(L_{\max} - L_{\min})/2\}^2} \quad (5.2)$$

となる。