非冷却赤外線センサシステムにおける視認性改善処理

非会員 林 健一* 非会員 長嶋 満宏*
非会員 蘇原 祥夫* 正 員 和田 英男*
非会員 梶谷 淳**

Improved Recognition of Image Processing for an Uncooled Infrared Sensor System

Ken-ichi Hayashi*, Non-member, Mitsuhiro Nagashima*, Non-member, Yoshio Sohara*, Non-member,
Hideo Wada*, Member, Atsushi Kajigaya**, Non-member

The low cost improved recognition of an uncooled infrared image processing has been required urgently for the development of high sensitive uncooled sensor like a cooled sensor. In this study, the uncooled infrared image taken by YBaCuO bolometer camera was improved with applying a special low cost image processing systems. The improved image with this processing exhibited not only the edge enhancement in a large contrast area but also the suppression of heat noise in a small contrast area. It is clarified that this improved recognition image processing is easy to realize at low cost, and the demand for this image processing will be expected to grow up as the use of uncooled infrared sensor system increases.

キーワード：非冷却赤外線センサ，YBaCuO ボロメータ，熱画像

Keywords : uncooled infrared sensor, YBaCuO bolometer, thermal imaging

1. まえがき

非冷却赤外線撮像装置は、冷却装置が不要であるため、小型、軽量、安価という点で優れているが、個人携行用暗視装置等の赤外線イメージング技術の応用に対して、冷却型赤外線撮像装置に匹敵する高性能化が求められている。非冷却赤外線センサの高性能化の方策としては、検知素子の高感度化と画像処理の改善が挙げられるが、近年、VOx⁽¹⁾⁽²⁾や YBaCuO (YBCO)⁽³⁾等の高感度ボロメータ検知素子材料が報告されている一方、画像処理の改善に関しても簡易な装置による視認性の向上が期待されている。非冷却赤外線センサの視認性においては、熱によるランダムノイズが問題となっている。このノイズは、センサ部を極低温まで冷却しないために発生しているノイズで、これを画像処理によって抑制することが、冷却型赤外線センサレベルにまで視認性を向上させる重要な点になる。

赤外線映像はモノクロで表示されるため、冷却型赤外線

センサでは、ダイナミックレンジが広いセンサシステムの方が視認性は高い。ダイナミックレンジは、撮像装置や表示装置に応じて減少し、明るい部分や暗い部分の細部情報が失われることが多いため、画像のダイナミックレンジを局所的に改善することにより視認性向上を図る試みがなされている⁽⁴⁾。このような通常の視認性改善処理では、赤外線センサで取得した映像に対して、エッジ強調による目標抽出処理の実行後にヒストグラム平坦化処理⁽⁵⁾⁽⁶⁾が行われている。ここでいうヒストグラム平坦化 (HE) 処理とは、頻度の高い濃淡領域は拡大し、頻度の低い濃淡領域は縮小する様な階調変換を行って、変換後の濃度ヒストグラムが全ての濃度において一樣になるようにする画像処理である^{(4)~(6)}。

一方、非冷却赤外線センサでは、ダイナミックレンジが狭いために、エッジ強調過程でコントラストの低い領域のランダムノイズが強調されると、視認性の向上が困難となる。そこで本研究では、特に目標抽出処理過程の改善のため、輝度が低い領域ではスムージングが働く新方式局所フィルタを導入し、非冷却赤外線映像の視認性向上を図った。

2. システムの概要

〈2・1〉 YBCO ボロメータ 本研究で用いた非冷却赤外線センサは、YBCO ボロメータ検知方式により画像取得するものである。その非冷却赤外線センサにより撮像した

* 防衛庁技術研究本部第2研究所
〒154-8511 東京都世田谷区池尻 1-2-24
2nd Research Center, Technical Research and Development
Institute, Japan Defense Agency
1-2-24, Ikejiri, Setagaya-ku, Tokyo 154-8511

** 三菱電機株式会社
〒247-8520 神奈川県鎌倉市上町屋 325 番地
Kamakura Works, Mitsubishi Electric Corp.
325, Kamakura-shi, Kanagawa 247-8520

表 1 非冷却赤外線センサの主要性能

Table 1. The main properties of the uncooled infrared sensor.

Detection method	YBCO microbolometer
Pixel number	320[H]×240[V]
Pixel size	40 μ m×40 μ m
Fill factor	90%
Thermal conductance	1.3×10^{-7} W/K
Heat capacity	2.2×10^{-9} J/K
TCR	-3.2%/K
IR absorption	69%
Responsivity	5.9×10^5 V/W
NETD (f/1.0)	0.08K

映像に対して、簡易システムで構成された局所フィルタを用いて画像処理を行い、視認性の改善を図っている。そのセンサ部の主要性能は表1に示すとおりであり、現用のVOxボロメータ検知方式に比べて感度が2倍程度優れている。

〈2・2〉 画像処理システム 画像処理部は、ビデオキャプチャボードを内蔵した汎用パーソナルコンピュータから成っており、インストールされた汎用画像処理ソフトウェア（IPLab Ver.3.06）と視認性改善処理ソフトウェア（三菱電機㈱製）を起動させることで、容易に画像の取り込みと画像処理ができる。画像処理手順として、まず局所フィルタのサイズを設定した後に、全画面領域に対して画像のエッジ強調または平滑を行って画像の認識度を高め、HE処理によりダイナミックレンジの有効利用を図った。

3. 実験及び結果

画像取得に関して、まず通常行われている局所フィルタ処理の問題点を上げる。次に視認性に関するフィルタサイズの依存性を調べた。フィルタサイズは、画素サイズによって表すこととし、水平方向画素数×垂直方向画素数は、最小3×3から最大33×33まで5段階で設定できる。このフィルタサイズのうち、温度差の小さな領域での視認性を評価して、本研究にふさわしいフィルタサイズを選出した。そして局所フィルタ処理結果から、通常行われている強調処理（本文では通常のエッジ強調処理と明記）と新方式処理（本文では可変局所フィルタ処理と明記）との比較を行って、視認性改善効果を調べた。最後にHE処理を行って本システムで得られる最終処理画像を示した。

〈3・1〉 赤外線画像における通常の視認性改善処理

図1(a)にYBCOボロメータ検知方式の非冷却赤外線センサ（画素数320×240）により撮像した原画像を示す。比較的高温度である人・車両・樹木等の存在は確認できるが、低温度側の輝度差が小さいため、その詳細が判りづらい。図1(b)は、HE処理のみを行った画像である。原画像に比べ、ダイナミックレンジを有効利用したので、画面全体のコントラストは大きく見えるが、視認性に大きな変化はない。視認性改善のためには、HE処理を行う前に、目標物体の抽出をする必要があり、その手段の一つとしてエッジ強調処

(a) 原画像

(a) The original image.

(b) ヒストグラム平坦化（HE）処理のみを実行した画像

(b) The histogram equalized processing image.

(c) 通常のエッジ強調後に HE 処理を実行した画像

(c) The edge enhanced and histogram equalized processing image.

図 1 非冷却赤外線センサによる赤外線画像

Fig. 1. Infrared images taken by the uncooled infrared sensor.

図2 各画像強調処理におけるブロック線図
Fig. 2. Block diagrams on each image enhance processing.

理が行われてきた。通常のエッジ強調処理を行った後に、HE 処理をした画像を図 1(c)に示す。人のように温度が高く、コントラストが高い被写体では、視認性が原画像 {図 1(a)} に比べて大きく向上する。しかし、路上のように温度差の小さい所では、ノイズが強調されて逆に視認性が下がる。つまり、従来型のフィルタ処理では、全画面を画一的にエッジ強調するため、目標抽出を改善する効果がある一方、温度差の小さい領域においては、ランダムノイズが強調されるため、視認性の低下が懸念される。

〈3・2〉 新方式局所フィルタを用いた処理 本研究では、通常のエッジ効果のみが働く局所フィルタを改良して、新方式の局所フィルタを導入した。新方式の局所フィルタを以下では可変局所フィルタと呼ぶ。この可変局所フィルタの特徴は、コントラストの低い領域では、エッジの強調ではなくスムージングによりランダムノイズを抑制することである。通常のエッジ強調処理とともにその概要を図 2(a),(b)に示す。通常のエッジ強調処理では、平均輝度よりも高い輝度をもつ領域に対して、平均輝度からの差を大きくするような輝度を加え、画像を強調してきた。図 2(a)もその一つで、全画面及び局所的な平均輝度に関して、それぞれの平均輝度よりも高い輝度をもつ領域では、平均輝度から上まわった輝度差がそのまま加算される。

一方、可変局所フィルタの概要を図 2(b)に示す。全画面

平均輝度以上をもつ領域の輝度が強調される点は、通常のエッジ強調処理と同じであるが、局所領域における強調過程が通常のエッジ強調処理と異なる。相違点は局所領域平均輝度からの輝度差が K 倍されて加算されることである。(1)式に K の表达式を示す。

$$K = \frac{\sigma^2 - (\bar{\sigma})^2}{\sigma^2 + (\bar{\sigma})^2} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 σ は局所的な輝度標準偏差、 $\bar{\sigma}$ は全画面の輝度標準偏差である。 K は-1 から 1 までの値をとり、 $\sigma \geq \bar{\sigma}$ 即ち局所領域の輝度分布が全面平均の輝度分布よりも大きい場合は、 $0 \leq K \leq 1$ であり局所輝度分布が大きい領域ほど K は大きくエッジが強調される。一方 $\sigma < \bar{\sigma}$ の領域では、 $-1 \leq K < 0$ であり局所輝度分布が小さい領域ほど輝度が大きく減算されて、結果的にスムージングが働く。この処理過程を図 2(b)中で指示した図 3 (a)~(c)に示す。図 3 (a)は原画像であり、図 3 (b)は K による判別の基礎となる画像、そして図 3(c)は可変局所フィルタ処理の画像である。図 3 では、各画素に $128(K+1)$ に相当する輝度をつけ、 $K > 0$ では輝度が高く、 $K=0$ は中間色を示し、 $K < 0$ では輝度が低く表されている。ここで図 3(a)と図 3 (b)を比較すると、図 3 (a)でコントラストが高い所は、輝度標準偏差 σ が大きいため、図 3 (b)ではエッジが強調されて白く表示されている。逆に Fig.3 (a)で温度差が小さい所は σ が小さいため、図 3 (b)ではスム

(a) 原画像
(a) The original image.

(b) K による判別の基礎となる画像
(b) The enhanced K {defined in eq.(1)} image.

(c) 可変局所フィルタ処理後の画像
(c) The new processing image.

図 3 可変局所フィルタ処理過程における赤外線画像
Fig. 3. Infrared Images of the new processing.

ージングがなされて黒く表示されている。さらに、図 3 (a) と図 3 (c) を比較すると、原画像でコントラストが高い所は、エッジが強調されてシャープに見える一方、温度差が小さい所は、スムージングによりノイズが抑制されている。

次に K に関する画像と可変局所フィルタ処理画像における局所フィルタサイズ依存性を調べた。各画像の画素数は 320×240 である。図 4 に示すように局所フィルタサイズが大きくなるにつれて、エッジが強調される高輝度領域と、スムージングされる低輝度領域が拡大され、 9×9 以上のフィルタサイズでは物体の識別が困難になる。図 5 で示す可変局所フィルタ処理画像では、この K 画像が直接反映される。フィルタサイズの増加に伴い高輝度領域（人や木等）と低輝度領域（植え込み等）は明確になるが、温度差の大きな領域（人と路上の境界等）では、画像強調範囲が広すぎるため、エッジにぼけが生ずる。

具体的に図 4, 5 における輝度ヒストグラムを調べ、それを図 6(a),(b) に示す。図 6(a) の K 画像においては、フィルタサイズが増加するにつれて、次第に輝度分布が狭くなり、K がとりうる範囲が狭くなる。つまり、フィルタサイズが大きくなることで画像強調効果に偏りが発生すると考えられる。図 6(b) では、可変局所フィルタ処理後の全領域画素における輝度分布を示す。原画像では多くの特徴的なピークをもつ輝度分布であるが、フィルタサイズの増加と共に、これらのピークが消失してなだらかな輝度分布になる。この原因としては、フィルタサイズが増加すると画像強調効果が偏り、微細な輝度差が失われるためと考えられる。

以上の結果をふまえると、フィルタサイズが大きくなると、特定の画像強調効果が強くなり目標抽出効果が期待できるが、その一方で原画像がもっていた微細輝度差が失われやすくなる。つまり、視認性を改善しようとする対象物の大きさに対して最適なフィルタサイズが存在すると考えられる。本研究のように 20×20 画素程度の人等に関する視認性を向上させる場合には、数画素程度の微細構造情報も重要なのでフィルタサイズは人等より十分小さい必要があり、フィルタサイズとしては 9×9 より小さい方が適当である。ただし、フィルタサイズ 3×3 における人等の画像強調効果は小さい {図 5(b)} ことを考慮して、以後の画像処理はフィルタサイズ 5×5 で行うこととした。

〈3・3〉 新方式局所フィルタにおけるスムージング効果

ここでは、可変局所フィルタによってもたらされるエッジ強調とスムージング効果について評価した。評価の対象にした画像領域は、図 7 で示す温度差が小さい路上である。評価手順としては、まず、図 7 の拡大図で示す中央 4 画素分の高輝度領域を目標領域として設定し、通常のエッジ強調処理と可変局所フィルタ処理を行った。次に、高輝度の目標領域とその周辺部で、温度差の小さい背景領域（160 画素分）が処理方式によりどのように変化するのか確かめた。各処理ごとの輝度分布を図 8 に示し、さらに算出した各領域における平均輝度等を表 2 に示す。はじめに目標領域平均輝度に注目すると、通常のエッジ強調処理では原画像に

(a) 原画像
(a) The original image.

(d) フィルタサイズ 9×9 における K の分布画像
(d) The enhanced K image of 9×9 filter size.

(b) フィルタサイズ 3×3 における K の分布画像
(b) The enhanced K image of 3×3 filter size.

(e) フィルタサイズ 17×17 における K の分布画像
(e) The enhanced K image of 17×17 filter size.

(c) フィルタサイズ 5×5 における K の分布画像
(c) The enhanced K image of 5×5 filter size.

(f) フィルタサイズ 33×33 における K の分布画像
(f) The enhanced K image of 33×33 filter size.

図 4 K の分布画像における局所フィルタサイズ依存性
Fig. 4. Filter size dependence of enhanced K images.

(a) 原画像
(a) The original image.

(d) フィルタサイズ 9×9
(d) The enhanced image of 9×9 filter size.

(b) フィルタサイズ 3×3
(b) The enhanced image of 3×3 filter size.

(e) フィルタサイズ 17×17
(e) The enhanced image of 17×17 filter size.

(c) フィルタサイズ 5×5
(c) The enhanced image of 5×5 filter size.

(f) フィルタサイズ 33×33
(f) The enhanced image of 33×33 filter size.

図 5 可変局所フィルタ画像におけるフィルタサイズ依存性
Fig. 5. Filter size dependence of enhanced images by the new processing.

(a) K による画像（図 4）の全領域輝度分布
(a) Brightness distribution in all areas of K image (shown in Fig.4).

(b) 局所フィルタ処理画像（図 5）の全領域輝度分布
(b) Brightness distribution in all areas of enhanced image by the new processing (shown in Fig.5).

図 6 輝度分布におけるフィルタサイズ依存性
Fig. 6. Filter size dependence of Brightness distribution by the new processing.

図 7 目標領域及び背景領域の明示図
Fig. 7. Target area and background area.

(a) 原画像における目標及び背景領域図
(a) Target area and background area in original image.

(b) 通常のエッジ強調を行った画像における目標及び背景領域図
(b) Target area and background area in ordinary edge enhanced image.

(c) 新方式局所フィルタ処理における目標及び背景領域図
(c) Target area and background area in the new enhanced image.

図 8 画像強調処理における輝度分布（目標及び背景領域図のうち、内黒枠内が目標領域輝度分布、外黒枠内が背景領域輝度分布を表す）。

Fig. 8. Brightness distribution of each enhanced image. (Inner bright pixels (4 pixels) are target area. Outer bright pixels (160 pixels) are background area).

表 2 図 8(a)-(c)の画像における各領域輝度平均、背景領域輝度標準偏差及び S/N ここで、S/N は(2)式から算出
Table 2. Average brightness of each area and brightness standard deviation of the background area, and S/N calculated by eq.(2).

	Average brightness of target area <T>	Average brightness of background area 	Brightness standard deviation of background area σ_B	S/N
The original image	22600.0	18228.4	422.9	10.34
The ordinary edge enhanced image	26217.5	18216.1	736.0	10.87
The new enhanced image	25228.8	18235.1	317.2	22.05

図 9 強調処理画像における背景領域輝度の画素数ヒストグラム

Fig. 9. Brightness histogram in background area of enhanced images.

比べて輝度が 16%増加している。同様に可変局所フィルタ処理でも輝度が 12%増加し、可変局所フィルタでもエッジ強調効果が維持されていることがわかる。次に背景領域の平均輝度は、各処理とも大きな差はないが、図 8 に示した背景領域を見ると、通常のエッジ強調処理では原画像より輝度分布が大きくなる一方 {図 8(b)}, 可変局所フィルタではスムージング効果により背景領域輝度が、原画像に比べて一定になる {図 8(c)}。背景領域の輝度分布については、図 9 に表すような輝度ヒストグラムを用いてさらに分析を

(a) 通常のエッジ強調処理画像
(a) The ordinary edge enhanced image.

(b) 可変局所フィルタ処理画像
(b) The new enhanced image.

図 10 強調処理後に HE 処理を実行した画像
Fig. 10. Enhanced and histogram equalized processing images.

行った。原画像のヒストグラムでは 17200~19400 までの背景領域輝度分布であったが {図 9(a)}, 通常のエッジ強調処理ではそれが 16300~20000 まで広がり、分布中心も不明確

である{図 9(b)}。一方、可変局所フィルタ処理を用いた場合のヒストグラムでは、背景領域輝度平均を中心に 17400 ~19200 までの狭い分布を示している{図 9(c)}。これはスムージングが有効に機能し、背景領域輝度が平滑化されたことを表している。

また、表 2 における背景領域輝度標準偏差は、背景領域輝度分布が処理方式に大きく依存していることを示している。目標領域と背景領域の輝度差と、背景領域輝度標準偏差との関係が、その画像が視認性能に優れた良質画像かどうかを判断する基準になると考えられる。ここで、エッジ強調とスムージングの効果により、背景領域の視認性能がどれくらい改善されているかを評価するため、表 2 の値を用いて式(2)のように定義した S/N による比較を試みた。

$$S/N = \frac{\langle T \rangle - \langle B \rangle}{\sigma_B} \dots\dots\dots (2)$$

この(2)式を用いて算出した原画像及び各処理画像の S/N は表 2 の右端に示してある。可変局所フィルタ処理を行った画像では、上記したように、エッジ強調効果を保ちつつ、スムージング効果でノイズによる輝度分布を抑えるため、他の画像と比較して S/N が 2 倍程度向上している。

〈3・4〉 最終処理画像 図 10(a)に通常のエッジ強調処理後に HE 処理を行った画像、図 10(b)に可変局所フィルタ処理後に HE 処理を行った画像を示す。可変局所フィルタ処理を経た画像では、人の歩く姿勢や木の植生等の詳細まで判別でき、通常のエッジ強調処理に比べて視認性が大幅に向上している。

4. 結 論

今回、非冷却赤外線センサシステムの視認性向上のため、通常のエッジ強調に改良を加えた可変局所フィルタを導入した。その結果、熱源のエッジ強調効果を保ったまま、背景領域のノイズを抑制することにより、視認性に優れた鮮明画像を得ることができた。このような簡易なシステムで視認性向上が可能であったことから、今後非冷却赤外線センサシステムの汎用化が進むにつれて、このような画像処理システムに対する需要は、ますます高くなるであろうと考えられる。

(平成 15 年 3 月 25 日受付, 平成 15 年 8 月 25 日再受付)

文 献

- (1) P. W. Kruse and D. D. Skatrud : "Uncooled Infrared Imaging Arrays and Systems", (Academic Press, San Diego, 1997) Semiconductors and Semimetals, Vol.47
- (2) P. W. Kruse : "Uncooled Thermal Imaging Arrays, Systems and applications", (SPIE Press, Washington, 2001) Tutorial Texts in Optical Engineering, Vol. TT51
- (3) H. Wada, T. Sone, H. Hata, Y. Nakaki, O. Kaneda, Y. Ohta, M. Ueno, and M. Kimata : "YBaCuO Uncooled Microbolometer IRFPA", Sens. & Mater. 12, p.315 (2000)
- (4) K. Takahashi : "Adaptive Dynamic Range Improvement Method for Recognition of Detailed Information", M. S. Thesis, Graduate School of Science and Technology, Keio University (1999) (in Japanese)

高橋耕生 : 「視認性向上のためのダイナミックレンジ改善法」, 平 11 慶應義塾大学理工学部修士論文

- (5) A. Rosenfeld and A. C. Kak : "Digital Picture Processing", Academic Press (1976) (in Japanese)
A. Rosenfeld, A. C. Kak : 「デジタル画像処理」, (監訳)長尾 真, (棚近代科学社, p.177 (1978)
- (6) M. Nagao : "Pattern Information Processing", Inst. Electron. Commun. Eng. Jpn., Vol.1-4, p.57 (1983) (in Japanese)
長尾 真 : パターン情報処理, (株)コロナ社, 電子通信学会編, 電子通信学会大学シリーズ, Vol.1-4, p.57 (1983)

林 健 一

(非会員) 1993 年名古屋大学理学部物理学科卒業。95 年名古屋大学大学院理学研究科物理学専攻博士前期課程修了。96 年名古屋大学大学院理学研究科物質物理学専攻博士後期課程中退。同年防衛庁技術研究本部入庁。2002 年慶應義塾大学大学院理工学研究科物質科学専攻後期博士課程修了。赤外線検知素子材料および赤外線センサシステムの研究に従事。現在、防衛庁技術研究本部第 2 研究所第 3 部光波電子戦研究室員。博士 (工学)。日本物理学会会員。

長 嶋 満 宏

(非会員) 1990 年東京大学理学部物理学科卒業。92 年防衛庁技術研究本部入庁。赤外線受光素子の材料・デバイスの研究開発に従事。現在、防衛庁長官官房情報通信課部員。博士 (工学)。応用物理学会会員。

蘇 原 祥 夫

(非会員) 1982 年東京理科大学工学部電気学科卒業。同年防衛庁技術研究本部入庁。赤外線センサシステムの研究開発に従事。現在、第 2 研究所第 3 部光波電子戦研究室長。日本光学会、計測自動制御学会会員。

和 田 英 男

(正員) 1980 年防衛大学校理工学部電気工学科卒業。85 年防衛大学校理工学研究科物理工学専攻修士課程修了。88 年三井金属鉱業(株)総合研究所研究員。93 年防衛庁技術研究本部第 2 研究所第 3 部光波第 4 研究室主任研究官。赤外線検知素子および材料の研究に従事。現在、第 2 研究所研究調整官。工学博士。日本赤外線学会、応用物理学会、電子情報通信学会、SPIE 会員。

梶 谷 淳

(非会員) 1994 年早稲田大学理工学部電気工学科卒業。同年三菱電機(株)入社。主として赤外線撮像装置に関わる制御装置及び画像処理装置の開発に従事。