設置パターンを利用した熱画像からの電柱機材の抽出と 局所温度変化を利用した異常検知

正 員 石野 隆一 (電力中央研究所)

正 員 元治 崇 非会員 中野 博 (関西電力)

Extraction of apparatuses in a thermal image using installation pattern of them and detection of a faulty apparatus by local temperature gradient

Ryuichi Ishino, Member (CRIEPI)

Takamu Genji, Member, Hiroshi Nakano Nonmember (Kansai Electric Power Co., Inc.)

A thermal image has been often used to inspect a power apparatus. If an automatic diagnosis method for the apparatuses by thermal images is developed, it makes inspection more efficiently. Then, a new method of diagnosis of a power distribution apparatus by a thermal image is developed as one of functions incorporated into a monitoring device that moves on a ground wire. The method consists of both extraction of an apparatus from a thermal image by using installation pattern of apparatuses and detection of a faulty apparatus by local temperature gradient. The experiments with the proposed method were done under many different conditions like different weather, time, and season. An error rate of 3% is obtained with the experiments of extraction of an apparatus. And an error rate of 17% is obtained with the experiments of detection of a malfunctioning apparatus. The proposed method could extract and detect them except the case that the distance between a pole and an infrared camera was so far that the intensity sensitivity was not sufficient.

キーワード: 画像処理, 設備診断, 赤外線カメラ, 高次局所自己相関特徴

Keywords: image processing, diagnosis of apparatus, infrared camera, high order local autocorrelations features

1. はじめに

電力会社においては、故障した装柱機材の確実な発見のために、不良機材から発する高周波雑音や熱情報から異常を検知する研究が行われている[1,2]。また、設備点検の自動化を目的に架空地線を移動する配電設備点検装置の開発も行われており[3]、その際に、高周波雑音や熱情報を使う自動診断機能の組み込みも検討されてきた。

赤外線カメラは機材に異常があった場合に異常箇所からの発熱を容易に観測できる装置であり[4]、ポリマ複合がいしへの適用の報告もなされている[5]。ここでの利用は、いずれも、検査員が赤外線カメラで撮影した熱画像を使って異常部分を見つけるというものであった。一方、熱画像を用いて自動診断を行うために、熱画像の解釈の重要性が指摘されており、そのためのデータベ-

ス開発の報告がなされている[6]。

筆者らは、前述の架空地線上を走行する配電設備点検装置に組み込むことを目的として、熱画像を利用した設備診断手法を開発した。開発手法は、ピンがいし、耐張がいし、開閉器を対象に、これらの機材の設置パターンを利用して熱画像中から機材を抽出し、不良機材の局所的な温度変化を検出して異常検出を行うものである。これらにより自動で異常を検出する機能を実現した。

本論文では、まず、自動設備診断に熱画像を用いる上での問題について述べた後、問題解決のための設置パターンを利用した熱画像からの電柱機材の抽出法と局所温度変化を利用した異常検知手法について述べる。最後に手法の有効性を示す実験結果について述べる。

2. 自動設備診断に熱画像を用いる上で の問題

熱画像を用いて自動設備診断を行う場合、熱画像中からの対象物の自動抽出と温度による異常検出のプロセスが必要となる。

<2.1> 熱画像から機材抽出の際の 問題

図1は、電柱付近の可視画像であり、図2は、図1の可視画像中の点線で囲まれた部分の熱画像である。これらの図からわかるように、熱画像は、似たような熱パターンが多く現れ、コントラストがあまりない、ぼやけた画像である。従って、可視画像で使われている抽出手法をそのまま利用しても、うまく機材を抽出できないという問題がある。例えば図2で、ピンがいしの熱パターンを白枠で示しているが、これと同様の熱パターンが熱画像中、様々な部分に現れている。この場合、奥の電柱に取り付けられた耐張がいしのカバーが同じような熱パターンとなっている。

従って、図2のような画像全体から、ピンがいしを抽出しようとした場合、似た熱パターンである耐張がいしのカバーをピンがいしと誤抽出してしまう問題がある。

図1 架空地線の付近から撮影した可視画像
Fig.1 Visible image from overhead ground wire

図2 似た熱パターンが多く現れる例
Fig.2 Example of similar patterns of a pin insulator

<2.2> 温度の高低のみで熱画像から異常 検出を行う場合の問題

機材の異常で発熱している場合、局所部分の温度変化が高くなる。一方、太陽光からの受熱により暖まっている場合は、温度が高くなる範囲は比較的広い。また、図1のような状況では、電柱が太陽光によって暖められて温度が高くなり、単純に温度の高低だけで異常を検出すると、電柱の影響も受けてしまう。図3は、熱画像から機材が取り付けられているアーム方向にそって、温度変化を示したものである。なお、熱画像では、温度が256階調の明るさの情報で表現されるため、ここでは、温度を輝度値で表現してある。そこで、以下では、輝度値が温度を示しているとする。この場合、各地点の温度は、 11×11 画素の矩形領域の明るさの平均をその点の輝度値とした。図3は、一番右にあるピンがいしにひびが入り、漏れ電流が流れているため、不良ピンがいしと示してある部分でピークが生じている。ところが、図2で示しているように、中相のピンがいしと電柱が重なっているため、電柱の輝度値に引きずられて中相のピンがいしの輝度値も上がってしまい、健全な機材であるにもかかわらず輝度値が大きくなり、輝度値の大きさだけみれば、異常と判定してしまう。したがって、このような問題を防ぐには、電柱の影響を取り除く必要がある。これは、電柱に限らず、対象機材の背景に、太陽光により一様に広い範囲で暖められた屋根などがあった場合にも同様の影響が考えられるため、このような背景の影響を考慮した手法の開発が必要となる。

図3 アーム方向の輝度値の変化
Fig.3 Brightness value in direction of the arm

3. 熱画像中からの検査対象機材の抽出 手法

<3.1> 機材の抽出手法の概要

2. 1節の課題を解決するために、候補の絞り込みを行う必要がある。ここでは、赤外線カメラが架空地線上を動くことを想定しているため、対象機材がアームに3相で装柱されている点に着目

した。すなわち、アームのような長尺物に、似た熱パターンが3回等間隔で現れるという制約を用いた機材の抽出手法を開発した。その概要を図4に示す。架空地線上から、電柱を3相すべて写るように撮影し、熱画像中から、アームを抽出し、抽出したアームにそって、対象機材の熱パターンが等間隔に3回現れる組み合わせを探索するものである。

＜3.1.1＞ 高次局所自己相関特徴を用いた参照パターンの作成

アームや機材の抽出には、人の動作の認識や繊維の材料判別等の画像中の物体抽出に用いられている高次局所自己相関特徴[7-9]を用いた。このためには、アームや機材の熱パターンを予め登録しておく必要がある。それぞれの熱パターンは、図5のように対象機材部分を画像中より切り出すことにより作成する。切り出した部分画像を3×3画素を含むブロックに分割し、高次局所自己相関特徴の計算を行い、それをアームや機材のパターンとした。

高次局所自己相関特徴は、以下のように求めた。一般に、自己相関関数は、平均0の時系列データ $\{X(t) | t=0, \dots, N-1\}$ が与えられた場合、式(1)で表現する。さらに、これを高次に拡張すると式(2)のようになり、これを用いて高次自己局所相関特徴を計算する[10]。

図4 熱画像からの機材抽出法
Fig. 4 Diagnosis by an IR-image

図5 機材パターンの作成

Fig.5 Making of image patterns for apparatuses

$$r(l) = \frac{1}{N} \sum_{t=0}^{N-l-1} X(t+l)X(t) \quad (1)$$

ここで $r(l)$ は、着目時点 t から l だけ進んだ時点のデータとの自己相関をあらわす。

$$X(a_1, \dots, a_N) = \int I(p)I(p+a_1) \cdots I(p+a_N) dp \quad (2)$$

ここで p は注目点であり、 $I(p)$ は点 p の輝度値である。 N は注目点に対して相関をとる画素の個数を表しており、 $a_1, \dots, a_N$ は、 p からみた変位を示す。

N の大きさは任意であるが、ここでは画素間の相関は近傍の方が高いため、次数を2とする。このことは、相関を取る画素を注目点 p の周りの3×3画素の領域とすることを意味する。従って、 a_1, a_2 は $0, \pm 1$ のいずれかとなる。結局、式(2)は、図6のようなマスクパターンを使って画素 p の輝度値との相関をとることを示している。このマスクパターンは、3×3の画素で構成可能な全てのパターンのうち、平行移動により等価な特徴を除いた計35個ある。

各マスクパターンの特徴の計算は、対応する画素の輝度値の積をとり、これを分割した全ブロックに対し加算することで行う。ここで得られた35次元のベクトルをその画像の特徴とし、アーム、ピンがいし、耐張がいし、開閉器について機材パターンを作成した。

図 6 高次局所自己相関特徴を計算するためのマスクパターンの例

Fig.6 Mask patterns for feature of high order local autocorrelation features

<3.1.2> アームの抽出

想定している点検装置は、一本の架空地線上を走行するため、各機材が画像面で水平に並ぶことは期待できない。そこで、図 4 に示した機材の走査方向を状況に応じて動的に変える仕組みが必要になる。

対象は、電柱の装柱機材であるため、姿勢を判定するランドマークとなりうるのは、ピンがいしなどを支えるアームや電柱である。アームの上にピンがいしや開閉器が取り付けられているため、アームを熱画像中より抽出し、その傾きを決定できれば、画像面内で電柱が傾いて写っていても対象機材の抽出が可能となる。

アームの抽出は、図 7 に示すような熱画像から切り取ったアームの画像を用意し、その画像に対して高次局所特徴を求め、その特徴を用いて行う。

熱画像中のアームの探索は図 8 のように行う。垂直方向の y_1 画素（ y_1 ライン目）を探索しているとすると、 (x_0, y_1) を中心としてアームの特徴を画像上で回転させ、最も類似している特徴を持っている方向を y_1 画素でのアームの候補とする。これを $y_1=0$ から $y_1=y_{\max}$ について行い、各 y_1 での候補のうち、最も類似しているものを解とし、このときの回転角をカメラの回転角としてカメラの傾き角度を推定する。

この時の類似度の計算は、式(3)に示すように、予め用意したアームの特徴と各探索点で求めた高次局所自己相関特徴とのマンハッタン距離を用いて求めた。

$$\text{Similarity} = \sum_{k=1}^{35} |\text{feature}_{\text{input}}^k - \text{feature}_{\text{reference}}^k| \quad (3)$$

ここで、 $\text{feature}_{\text{input}}^k$ は入力画像の高次局所自己相関特徴の k 番目の特徴、 $\text{feature}_{\text{reference}}^k$ は予め用意した特徴を示す。

図 7 アームの画像

Fig.7 Image of an arm attached to a pole

図 8 アームの探索方法

Fig.8 Method of search of an arm attached to a pole in an infrared image

<3.1.3> 機材の抽出

アームを抽出すれば機材を探索する領域が決定できるので、図 4 に示したように、アームに沿った方向を走査線とし、3.1.1 節で記した機材パターンを用いて、“類似したパターンが等間隔で 3 度現れる”という条件を用いて、熱画像中より機材を抽出する。

<3.2> 熱画像による異常検出手法

電柱に装柱されている機材の異常を検知するには、2.2 節で述べたように電柱の影響を除去する必要がある。電柱は各機材と比較して、比較的広い範囲で一様の温度分布になる。つまり、電柱は、不良機材に比べ、温度が高い範囲が広く存在する。

一方、不良機材の場合、温度の高い部分がアームと直交する方向に局所的に現れる。そこで、アームに沿った各画素ごとに、アームに直交した方向に走査し、アームと直交する成分の輝度の変化率（輝度勾配と以下では表現する）を計算すれば、電柱が受熱して温度が高くなった場合でもその影響を取り除くことができ、局所的に温度が高くなった部分の検出が可能になり、不良機材の検出がより正確に行えることになる。

具体的には次のように計算する。図 9 のようにアームに直交する方向に推定されたアームの位置から、各機材が存在する 30 画素まで 5 画素おきに、矩形領域の輝度値の平均をとる。隣接する矩形領域ごとに平均輝度値の差分をとり、式(4)に示すように差分の絶対値を求め、これを輝度勾配とした。さらに、変化の大きさを強調するために輝度勾配の累積を評価尺度とし、これを累積輝度勾配と定義する。

$$\text{累積輝度勾配} = \sum_{n=2}^7 |I_n - I_{n-1}| \quad (4)$$

ここで、 I_n は n 番目の輝度値の平均を示す。

図 9 アームに直交する方向の輝度平均の計算
Fig.9 Calculation of average of brightness value in vertical direction to the arm

図 10 累積輝度勾配を用いた機材の異常診断手法
Fig.10 Diagnosis using the sum of gradient of brightness value in the vertical direction of the arm

図 10 に示すように、漏れ電流の影響で熱を発していれば、局所的な温度変化が大きくなる。その結果、累積輝度勾配が大きくなり、異常検出が可能になる。

4. 実験

熱画像は、表 1 に示す仕様の赤外線カメラ(アビオニクス製 TVS-2000MkIILW)を用いて撮影した。また、不良部分の模擬は、実際の配電線において故障の原因となって撤去したクラックのある高圧ピンがいしに対し、試験配電線に設置後、3800V (常規対地電圧) から 6600V の電圧をかけて行った。不良の程度によって漏れ電流の値がかなり異なることから、ある程度の漏れ電流値を確保するため、供試品には課電電極導体を直接接触させるとともに、課電前に霧吹きで湿潤させ、さらに、漏れ電流値に応じて課電電圧を前述の範囲で変化させた。課電開始後、赤外線カメラでピンがいしが発熱している様子が観測可能になって

から、熱画像を撮影した。なお、この間約 20 分であり、発熱を観測できた漏れ電流は 3mA ~ 20mA であった。一方、発熱を観測できなかった場合の漏れ電流は 0.5mA であった。

<4.1> 熱画像中からの機材抽出実験

図 11 に示すような実験系で、機材の抽出実験を行った。天候(晴れ・雨・曇り)、季節(春・夏・冬)、撮影時刻を変えた 合計 30 ケースについて行った。結果は表 1 に示すように、天候、季節、撮影時刻を変えても機材抽出が可能のため、設置パターンを利用した機材抽出法が有効な手法であることがわかる。

また、電柱-カメラ間の距離が離れると、カメラの熱感度の限界により、背景と機材の識別が困難になり検出不能となる場合もある。実際、電柱-カメラ間約 6.5m で撮影したところ、パターンの検出ができず機材抽出ができないケースもあった。このため、カメラの熱感度の限界を考慮した適用法が必要となる。

表 1 赤外線カメラの仕様

Table 1 Specification of the infrared camera

検出波長	8~12 μ m
測定温度分解能	0.1℃(黒体温度 30℃において)
測定温度精度	± 0.4%(フルスケール)
測定視野角	15° (H) × 10° (V)
測定距離	20cm~∞
測定温度範囲	-40℃~300℃

表 2 実験結果

Table 2 Experiment results

対象機材	抽出結果(成功/総数)
ピンがいし	25/25
開閉器	3/3
耐張がいし	2/2

<4.2> 異常検出実験

図 12 は、図 11(b)の実験系で撮影した熱画像に対し、累積輝度勾配をアームの長さ方向に対して求めたものであり、中相の近くにある電柱の影響を除去できている。同様の実験を、電柱との撮影位置を 5.0m から 6.5m まで 0.3m ごと移動した 6 地点で、画像中でアームが水平に写る場合、アームが 15 度左右に傾いて写る場合の 3 ケースの計 18 ケースの実験を行った。そのうちの 15 ケースが図 12(b)のように、不良部分のピークを検出できた。検出できなかった 3 ケースは、赤外線カメラと電柱との距離が最も離れていた 6.5m 地点で撮影した 3 ケースであり、機材の抽出実験と同

様に、赤外線カメラの熱感度の限界によるものである。

このように、赤外線カメラの感度が十分あれば、背景に電柱などがあっても、累積輝度勾配だけで異常検出が可能である。

(a)実験系 I

(b)実験系 II

図 11 実験系

Fig.11 Configuration of experiment

5. おわりに

本論文では、配電設備点検装置の機能として組み込むことを想定した熱画像を利用した装柱機材の異常検知手法について述べた。対象機材抽出には、従来の画像処理手法に加えて、機材の設置パターンを考慮して抽出し、異常検出には、温度の局所的な変化を示す累積輝度勾配が背景の影響を小さくできることを示し、提案手法が、有効であることを示した。

なお、異常検出を行うためのしきい値は、機材の種別ごとに定める必要があり、異常判定のための温度しきい値について知見を蓄積していく必要がある。

本研究を進めるにあたり、北陸電力 坂下 雅弘

氏、当所上席研究員 栗原正幸博士に有益なるご討論を頂きました。この場を借りて感謝申し上げます。

(a) アームとがいしの抽出

(b) アーム腕方向の累積輝度勾配

図 12 不良がいしの異常検出結果

Fig.12 Example of detection of a faulty pin insulator
(平成 13 年 08 月 01 日 受付, 平成 13 年 10 月 23 日 再受付)

文 献

- [1] 関根編, “配電技術総合マニュアル”, オーム社 1991
- [2] 渡辺他, “配電機材劣化診断装置の開発” 現場技術, VOL.38 No.444, pp.45-47, 1999
- [3] 奥田他, “自走式柱上点検装置の開発” 電気学会研究会資料 PE93-56 1993
- [4] R.D.Lucier et al, “Infrared Thermograph Guide”, EPRI REPORT, September 1990
- [5] C.de Tourreil et al, “REVIEW OF ‘IN SERVICE DIAGNOSTIC TESTING’ OF COMPOSITE INSULATORS”, ELECTRA, No.169, pp.105-119, 1996
- [6] T.Moore, “Images in infrared”, EPRI JOURNAL, pp.14-21, March 1993
- [7] N.Otsu et al, “A new scheme for practical, flexible and intelligent vision systems”, Proc. IAPR Workshop, pp.431-435, 1988
- [8] 依田他, “3次元動き情報を利用した複数対象物の抽出とその実時間認識”, 電子情報通

信学会論文誌, Vol. J81-D-II, No. 9, pp. 2043-2051, 1998

[9] 岩崎他, “高次局所自己相関特徴と判別分析を用いた並列学習的な獣毛判別”, 第6回画像センシングシンポジウム, pp121-124, 2000

[10] J.A.Mclaughlin et al, “Nth-Order Autocorrelations in Pattern Recognition”, Information and Control, Vol. 12, pp.121-142, 1968

石野 隆一

(正員) 1964年7月7日生.

1991年3月横浜国立大学大学院工学研究科博士課程前期終了. 同年(財)電力中央研究所入所, 現在に至る. 主に, 画像処理による設備監視に関する研究に従事.

元治 崇

(正員) 1951年1月30日生.

1975年3月岡山大学大学院工学研究科修了. 同年 関西電力(株)入社. 1985年より同社総合技術研究所に勤務. 主として, 配電系統の雷害対策, 配電自動化, 分散電源の連系に関する研究に従事.

中野 博

(非会員) 1948年12月29日生.

1967年3月大阪府立今宮工業高校電気科卒業. 同年 関西電力(株)入社. 1996年~1999年同社総合技術研究所に勤務. 主として, 配電用機材の劣化診断技術に関する研究に従事. 現在, 同社 グループ経営推進室に勤務.