雷撃写真像の画像解析

正員 小島 章義 (武蔵工大)

正員 堀井 憲爾 (豊田高専)

准員 長森 由貴 (武蔵工大)

正員 中村 光一 (名古屋工大)

正員 光井 英雄 (武蔵工大)

正員 曾禰 元隆 (武蔵工大)

Analysis of Lightning Channel by Image Processing

Akiyoshi Kojima, Member, Yuki Nagamori, Associate, Hideo Mitsui, Member (Musashi Institute of Technology), Kenji Horii, Member (Toyota College of Technology), Kouichi Nakamura, Member (Nagoya Institute of Technology), Mototaka Sone, Member (Musashi Institute of Technology)

The pictures of lightning taken by a photo camera or a video camera give us important informations, such as the paths, the intensity and the falling point of lightning. It is necessary to change the analog data on pictures into digital ones, in order to analyze the information objectively. In this study, a CCD camera with a microcomputer is used to obtain digital image data. By using the digitalization, it is able to abstract the clear lightning channel path from the illegible picture by the new digital filter, and further it is possible to compare with the intensity distribution of each channel branch.

キーワード：雷放電，雷チャンネル，チャンネル輝度，デジタルフィルタ

1. ま え が き

雷の機構解析の一手段として，静止カメラによる写真撮影やビデオカメラ，流しカメラによる動的撮影がある。雷の進展や雷撃は極めて速く，またその位置も予想し難く，撮影された資料は貴重である。写真の撮影により発光輝度や雷の形状，落雷点の位置の標定などを明らかにすることができ，他の測定法である電流，電位計測では解析できない情報を得ることができる。

しかし，写真からの情報はアナログ像であるため，結果の比較や表現に難がある。また，撮影環境やシャッター条件，更には落雷時の強い発光などにより，像は必ずしも鮮明とは限らない。貴重な写真からできる限り多くの客観的情報を抽出する工夫が必要である。

そこで著者らは，写真解析のために画像処理技術の導入を試みた。画像処理は写真のもつ輝度情報をデジタル化し，フィルタ処理による画像変換を行うことができる。例えば，前述した悪条件下での不鮮明な放

電チャンネルを明りょう化する新しいフィルタを工夫することにより，明りょうな画像にすることができる。また，デジタル化されたデータ，すなわちチャンネルの輝度変化の情報，チャンネル分岐での放電進展状況や，放電形態など，写真による落雷解析への画像処理の応用性を期待できる。

2. デジタルフィルタについて

〈2・1〉 デジタルフィルタ 不鮮明な画像をより明確な画像に変換するデジタルフィルタ処理としては，一般に輪郭強調処理が挙げられる。従来の輪郭強調のアルゴリズムとしては，ラブラシアンフィルタ，およびソベル法などが知られている。

ラブラシアンフィルタは隣接する画素の階調差が大きい画素を強調し，画像中の線やエッジの部分だけを高階調で表現するアルゴリズムで，二次微分操作に相当する変換である。フィルタは変換対象画素およびそれに隣接する画素の階調値に重みを与え，その総和を変換対象画素の階調値として与えるものである。変換

対象画素およびそれに隣接する画素に与えられる重みは、以下のマトリックスが一般に用いられる。

$$\begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

一方、ソベル法もまた隣接する画素の階調差を強調する一次微分変換である。フィルタは変換対象画素およびそれに隣接する画素の階調値に以下に示される重みを与え、縦方向と横方向のエッジ強調を与える。

$$\Delta x : \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

Δx : エッジの水平成分の強度

$$\Delta y : \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{vmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

Δy : エッジの垂直成分の強度

図 1 階調分布モデル図

Fig.1. Distribution model of brightness after and before image processing.

〈2・2〉 累乗強調処理 前記の既存のデジタルフィルタは、後述するように必ずしも雷放電路に適してはいない。そこで、新しく、雷放電画像のフィルタリングに対し有効なデジタルフィルタを工夫した。以下そのアルゴリズムを述べる。

雷チャネルは輝度の低い不鮮明な画像とし、放電路を中心にしたモデル図として図1に示される二等辺三角形形状としてモデル化する。この成分 $f(x)$ をもつ各ドットに対して以下の強調関数を定義する。

$$F(x) = \left(\frac{f(x)}{\text{Max}} \right)^N \times 255 \dots\dots\dots (4)$$

$F(x)$: 強調後の画素の階調, $f(x)$: 強調前の画素の階調, Max : 注目の1ライン中でのチャネル最大階調

この関数は累乗関数であるため、 N の値を適切に定めれば雷チャネル部(三角形頂点の近傍画素)はより大きい階調値で表される。

3. 目的とする画像への修正方法

〈3・1〉 霧, 雨, 雪などによりチャネルの不鮮明となっている場合のチャネルの明りょう化 図2に各デジタルフィルタの効果が示される。(a)図に原画像および50ラインおきの各ライン方向の階調分布を、(b)図にソベル法、(c)図にラプラシアン法、(d)図

(a) 原画像および三次元階調分布

(b) ソベル法

(c) ラプラシアン法

(d) 累乗強調処理

図 2 各種デジタルフィルタによるチャネル強調処理の比較

Fig.2. Comparison with emphasis image by many digital filters.

に累乗強調処理を施した画像を示す。(a)図より、原画像のパターンの階調分布は雑音を含みながらなだらかに変化している。これに対し、(b)図のソベル法、(c)図ラプラシアン法フィルタによる処理結果において、両者とも、視覚的に放電チャネルを確認することは不可能である。この理由は、階調の変化が雑音に対し、緩やかであることによる。そのためチャネルの強調の困難さにつながる。

一方、累乗強調処理(d)図の場合、チャネルが明確化されており、チャネルの位置の確認を行うことができる。ただし、強調処理により、輝度は原情報を失ってしまうため、位置標定が行われた後、原画像での輝度を解析には用いる必要があることを付記する。このように、天候による悪影響によりチャネルがほとんど確認できない画像の場合、ソベル法、ラプラシアン法によるチャネル強調は困難であるが、累乗強調処理は有効な手段であることがわかる。

〈3・2〉 ハレーションを起こした雷画像のチャネル抽出 不鮮明画像を与える他の条件として、落雷時の強力な発光によるハレーションがあげられる。ハレーションによる画像輝度の“ぼけ”ばかりでなく、写真撮影時のシャッターブレやシャッター速度、あるいは露出設定のミスによる画像の“ぼけ”などはチャネル部分の明確な観察に大きな障害となる。そこで前節と同様に、ハレーションなどによってチャネルが不鮮明となっている画像に対し強調処理を行った。

図3にハレーションを起こした雷画像の階調分布、そしてソベル法、ラプラシアン法、累乗強調処理による処理結果をそれぞれ示す。人間の目には白色の広がりをもつ画像も、CCDカメラによる256階調の識別ではその輝度の差として表すことができる。(a)図に示される階調分布は地上部のラインに近づくほど大きな山状の分布が現れている。このライン350~480の領域がハレーションを起こしている部分である。しかし、これらの領域の分布にはピークが明らかに認められる。

このような画面に対し、(b)図のソベル法による処理では、画面下部(地上部)において(a)図からわかるように、エッジが認められるため明りよう化される。しかし、上空部に移るにつれてなだかな階調分布となるため、微分操作に有効となるエッジが認められない。それゆえ、チャネルの明りよう化は行えない。また、(c)図に示されるラプラシアンフィルタによる処理でも、同様に“ぼけ”が生じチャネルの確認ができない。一方、(d)図の累乗強調処理された画像は、ハレーションを起こしている領域にチャネルが強調され、

(a) ハレーションを起こした画像の三次元階調分布

(b) ソベル法

(c) ラプラシアン法

(d) 累乗強調処理

(e) 雷チャネル処理

図3 各種デジタルフィルタによるハレーションを起こした写真のチャネル強調画像

Fig. 3. Emphasized image by many digital filters for illegible picture with halation.

視覚的に放電経路を判断できる。以上の比較より、累乗強調処理がハレーションなどによる不鮮明な画像のチャンネルの明りょう化に有効であることがわかる。

なお、チャンネルの明りょう化により、チャンネルの中心位置の軌跡は、(e)図に x - y 平面としてその結果を示す。

4. 画像からの情報抽出

〈4・1〉 チャンネル軌跡、および輝度の推移特性の抽出 前述した方法で、雷撃写真よりチャンネルの任意の位置およびその輝度をデジタル量で表すことが可能になったので、従来抽象的な解析しかできなかった雷チャンネルの軌跡および輝度特性を解析することができる。図4に原画像データの一例を三次元階調分布グラフとして示す。同図において、 x 軸は画面水平方向(横方向)ラインのドット位置を表し、 y 軸は画面の垂直方向(縦方向)へのラインナンバを表している。更に、 z 軸は座標 (x, y) のドットがもつ輝度を示している。

この分布において x 軸、 y 軸のスケールは、それぞれ、写真における水平(左右)方向の距離、および垂直方向の距離(高度)に対応することになる。すなわち、同分布においてラインナンバが小さい値であるほど、高度が大きいことを意味する。同図より各ラインの単一のピークが雷チャンネルに相当し、チャンネルは x 軸に対してほぼ垂直に分布している。また、その輝度は上空に向かうに従い徐々に低下していくことがわかる。そこで同分布より得られる放電路の位置、およびその階調の高さ方向に対する推移をグラフ化し図5に示す。

(a)図は雷チャンネル軌跡を示している。同図において、縦軸には高度、横軸には水平方向距離が示されている。なお同図の高度は、前述までラインナンバとして表現されていたが、最高高度を“10”と規格化された値を示す。雷解析においては雷雲直下、または雲中に最高高度は位置すると思われるが、その確認ができないため、本論文では規格化された値を用いる。(a)図において、放電チャンネルは、水平方向(左右)に大きな“ブレ”はなく、垂直に立上っていることが示されている。一方、チャンネルの高度に対する輝度の変化を(b)図に示す。

同図において、上空部での雷チャンネルの輝度と地上部での輝度は大きく異なり、高度に依存して上空部になるに従い輝度は減少している。輝度の変化は電流の成長や放電形態の違いを考慮するうえで重要となる。

しかし、他の雷放電と比較する目的から、地上部の

図4 原画像データの階調分布の一例

Fig. 4. Brightness distribution of original lightning channel.

(a) 雷チャンネル (b) 階調絶対値 (c) 相対輝度
の軌跡

図5 雷チャンネル軌跡の階調絶対値および相対輝度

Fig. 5. Brightness distribution and relative intensity distribution on light of channel.

輝度を1.0として規格化し、(c)図にその特性を示す。(a)図と(c)図の比較により、地上より垂直に立上っている領域、高度1.2以下において輝度は飽和し、この領域では大きな放電の変化はないことが示されている。また、形状の屈曲のある箇所の輝度は大きな減衰を示している。

〈4・2〉 チャンネル分岐点での輝度推移特性 静止写真による雷放電では、放電チャンネルは複数に分岐している場合が多い。分岐点には多くの雷解明に対する情報が含まれている。例えば、どの枝放電が主放電か、電荷注入に対する各枝の役割などがあげられる。ただし、静止写真像においては時間的分解ができないため、たとえ異なった時間に発生していても放電の経路が同じであれば、見掛け上一つのチャンネルとして解析されることに留意すべきである。しかし、電流計や電圧計その他の計測器では、必ずしもこれらの情報の提供には十分とは限らず、画像解析も一つの有効な解

析手段となる。

そこで、チャンネルが分岐している画像に対してチャンネル軌跡、および輝度推移を求め、分岐点前後での輝度の増減状態の特性を解析する。例として、2種類の画像データを取上げ、図6、図7にそれぞれ示す。図6(a)に示されるように、チャンネル軌跡は高度10～7.5の範囲において3本の枝が存在している。もしも高度を実距離に置き換えることができれば、その枝分れの位置や、雷雲との位置関係が議論できる。

一方、雷の成長は電流密度の増加につながり、輝度に反映する。そこで地上輝度を1.0とした成長の過程を(b)図に示す。(b)図において、地上から続く雷チャンネルの輝度変化の連続性から、枝1が主放電路であることがわかる。枝2、枝3の輝度は分岐点において、明らかに不連続性を示している。また各分岐の最

先端部の輝度は約0.2に収束している。なお、チャンネルは位置に対し、わずかな振動を繰返して進行していることも、特徴の一つであることを付記する。一方、他の一例のチャンネル軌跡を図7に示す。(a)図に全経路を示す。同図より、高度10～5の範囲で複数に分岐していることがわかる。そこで主チャンネルと枝とを区別するために図中①、②の領域を拡大して、それぞれの枝チャンネルの輝度特性を(b)、(c)図に示した。すなわち、(b)図は(a)図で示された①の領域(高度4～8、水平距離0～3)を示し、(c)図は(a)図で示された②の領域(高度5.5～10、水平距離0～10)を示している。なお、分割された各チャンネルには番号が与えられている。領域①、すなわち(b)図における枝1、枝2の輝度は主チャンネルとの輝度の連続性より、枝1が主チャンネルとして判断できる。枝2は明らかに不連続な値を示し、支流であることがわかる。更に支流(枝2)は上空部が、枝(2-1、2-2、2-3)の三つに分岐されるが、それらの輝度は同一特性上に分布し、上空部の放電が一つの集合であることがわかる。

同様に(c)図において、枝1-1と枝1-2に分れるが、輝度の分布から主たる経路は次のように認識される。

主チャンネル → 枝1 → 枝1-1 → 枝1-1-1
→ 枝1-1-1-1

以上、例1、例2の実画像から、主チャンネルの過程を輝度分布から求めてみた。今後より多くの写真から、より多くの情報の取出しが可能となる。

〈4・3〉 落雷点の明りょう化 送電系統において鉄塔への落雷事故対策として、鉄塔への落雷点を認識することは重要である。そこで、当強調アルゴリズムを応用することにより、鉄塔への落雷点を明らかにす

図6 分岐点での輝度推移(例1)
Fig. 6. Distribution of relative intensity at branches (example 1).

図7 分岐点での輝度推移(例2)
Fig. 7. Distribution of relative intensity at branches (example 2).

図 8 鉄塔落雷点の明りょう化(試料 1)

Fig. 8. Composite steel image for tower and lightning channel (sample 1).

図 9 鉄塔落雷点の明りょう化(試料 2)

Fig. 9. Composite steel image for tower and lightning channel (sample 2).

る。図 8(a)にある落雷時の写真を示す。同図は、上空部での雷チャネルの輝度が薄く、肉眼では確認しにくい。また、落雷点は強い発光のためハレーションを生じ、同様に観測不可能である。

鉄塔への落雷点を明らかにするためには、鉄塔の情報および雷チャネルの情報が必要となる。後者は当強調アルゴリズムを応用することにより得ることが可能であるが、前者は落雷時の写真から得ることはほぼ不可能である。そこで、昼間同一アングルで撮影される鉄塔写真との画像合成を行う。合成を行う一つの方法としてチャネルのみの画像、鉄塔のみの画像をそれぞれ二値化し合成する。(b)図は昼間撮影される鉄塔写

真画像をその階調値に応じて白画素、黒画素のみに二値化したものである。一方、(c)図は当強調アルゴリズムで処理された不明りょう画像を二値化した写真である。それに対し(d)図は両者の情報を合成した画像である。同図より、不明りょうで確認不可能であった鉄塔とチャネルの位置関係が明らかとなり、落雷点が明りょう化される。

同様に他の落雷写真に関して図 9 に示す。(a)図に示されるチャネル画像と、図 8(b)の鉄塔画像を合成することにより、図 9(b)が得られる。このように、画像処理を用いることにより鉄塔への落雷点を明りょう化することができる。

5. む す び

画像処理を雷の撮影された写真に応用することによって以下に示されることが明らかにされた。

(1) デジタルフィルタの一種である累乗強調処理は、霧、雨、雪などの気象条件下で撮影されるチャネルが不明りょうな画像に対し有効である。従来のデジタルフィルタであるソベル法およびラプラシアン法では、チャネル明りょう化は行うことはできない。またハレーション画像に対しても、同様に極めて有効である。これにより従来解析不可能であった不明りょうな写真のチャネル形状や鉄塔への落雷点の議論が可能となった。

(2) 画像処理技術の導入により、雷チャネルの輝度の推移が客観的なデジタルデータとして把握でき、チャネル分岐点での放電進展状況、放電進展形態などの解析への応用の可能性が示された。

このような解析手法により得られる情報を、今後雷研究の分野に提供することにより、雷解析のいっそうの発展を促せればよいと考えている。

本論文の作成にあたり、多大な協力をしていただいた、電気学会東海支部「高度情報化時代の雷研究」の若手セミナーに関連された方々に深く感謝いたします。また、日ごろから本研究を支援して下さい武蔵工業大学高電圧研究室 久保山洋一氏に深く感謝いたします。

(平成2年5月28日受付、同3年5月2日再受付)

文 献

(1) 榎本：画像の情報処理，コロナ社

小 島 章 義 (正員)

昭和40年4月25日生。平成3年3月武蔵工業大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年4月日本石油(株)入社。現在、中央技術研究所において、炭素繊維の研究・開発に従事。

長 森 由 貴 (准員)

昭和41年7月31日生。平成2年3月武蔵工業大学工学部電気電子工学科卒業。同年4月同大学大学院電気工学専攻修士課程進学、現在に至る。主として、高速演算、雷写真の画像解析に関する研究に従事。

光 井 英 雄 (正員)

昭和9年6月13日生。32年3月武蔵工業大学電気工学科卒業。38年3月東京電機大学大学院電気工学専攻修士課程修了。32年4月武蔵工業大学電気電子工学科勤務、51年4月同教授、現在に至る。この間48年イギリス・サルフォード大学に客員研究員として1年間赴任。工学博士。主として、電気絶縁物の絶縁破壊と放電機構に関する研究に従事。47年電気学会論文賞受賞。真空協会、電気設備学会会員。

堀 井 憲 爾 (正員)

昭和5年1月7日生。27年3月名古屋大学工学部電気学科卒業。同年4月通産省工業技術院電気試験所(現、電子技術総合研究所)入所、高電圧現象、高エネルギー研究室長。46年4月名古屋大学工学部教授。平成2年10月豊田工業高等専門学校校長。工学博士。電力工学、電力応用工学、高電圧工学、ロケット誘雷、極低温超電導工学に関する研究に従事。61年電気学会電力賞受賞。CIGRE 会員。

中 村 光 一 (正員)

昭和17年3月7日生。41年3月名古屋工業大学電気工学科卒業。42年4月同大学工学部電気工学科助手、55年同工学部講師、63年同助教授、現在に至る。工学博士。系統解析、ロケット誘雷、高温超電導の電力応用などに関する研究に従事。57年電気学会論文賞、平成2年同進歩賞受賞。IEEE 会員。

曾 禰 元 隆 (正員)

昭和17年1月12日生。43年3月武蔵工業大学大学院電気工学専攻修士課程修了。40年4月同大学電気電子工学科勤務、平成2年4月同教授、現在に至る。この間59年アメリカ・クラークソン大学に客員研究員として1年間赴任。工学博士。主として、有機絶縁材料の絶縁破壊機構および気中放電現象に関する研究に従事。47年電気学会論文賞受賞。電子情報通信学会会員。