

オプティカルフローとテクスチャ内の画像特徴量に基づく
架空送電線領域検出

藤原孝幸

北海道情報大学

Transmission Power Line Detection Based on Optical Flow and
Estimation of Aluminum Conductors Boundary

Takayuki FUJIWARA

Hokkaido Information University

平成31年3月

北海道情報大学紀要 第30巻 第2号別刷

〈論 文〉

オプティカルフローとテクスチャ内の画像特徴量に基づく 架空送電線領域検出

藤原孝幸*

Transmission Power Line Detection Based on Optical Flow and Estimation of Aluminum Conductors Boundary

Takayuki Fujiwara*

要旨

架空送電線(電線)の経年変化による影響や、損傷を発見・判断する点検技術の自動化が期待されている。これまでも非接触でカメラを用いて電線を点検する手法が提案されているなか、著者らは強風下でも風の影響を受けにくく、また可搬性に優れた点検装置の実現を試みている。しかしながら、装置の堅牢性を重視しているため、スポーツ用途向けのウェアラブルカメラで電線を計測しており、画像処理に適した画像を得ることができていない。本論文ではこのような被写界深度が深く背景が鮮明に写り込む環境においても画像中の電線を安定して検出するための改善手法について提案する。

Abstract

It is expected that the criteria would propose the inspection system for detecting the power line of unusual condition such as the damage or the aged deterioration. In this paper, we propose the method for extracting the region of power line from the images obtained from the camera mounted on the automated moving device. Our method detected the region of power line even though there are the complex background with the roof of the building or the grove by using Optical Flow. Then it detected the detail region by using Graph Cuts for the post processing of the inspection.

キーワード

架空送電線領域検出 画像の領域分割 ガボールフィルタ オプティカルフロー

* 北海道情報大学情報メディア学部情報メディア学科, Associate Professor, Department of Information Media, HIU

1. はじめに

架空送電線(電線)の経年変化による影響や、損傷を発見・判断する点検技術の自動化が期待されている[1, 5, 6]。これまでも非接触でカメラを用いて電線を点検する手法が提案されているが、北海道電力の研究グループでは強風下でも影響が弱く、また持ち運びがしやすいサイズでの点検装置の実現を試みている[4]。

本論文では、電線点検用自動走行装置にて撮影した画像から、電線領域を検出する手法を提案する。従来手法では、カメラだけでなく、装置で電線を囲むことで画像処理を容易にしている一方で、装置のサイズと重量の大きさも原因となり取り回し時の手軽さを損なっていた[1, 3]。本研究では、山岳地域が多く、また風の影響が強い北海道での利用をまずは前提としている。そこで、装置サイズおよび重量を低減させることを重要視した。そのためロボットの設計については、ほぼフレームのみの簡素な設計で実装した。フード等で覆うことができれば、電線撮影時の背景をコントロールできるが、剥き出しの構造でカメラを取り付けているため、撮影の一部では結果的に地上側の複雑な背景を持つ画像が取得されることになる。最終的な検査の対象は電線であることより、背景は除去対象の領域となるため、本研究の目的として電線と背景を領域分割する問題であると位置づけ検討を進めた。そこで、本提案手法では電線と背景のカメラからの距離が異なり、また走行装置が一定の方向に動く事を利用し、画像のオプティカルフロー[2]を領域分割に用いることとした。また、オプティカルフローが安定しない場合の他の特徴量として、電線表面のテクスチャに着目することとした。電線はその構造上、表面に規則的な素線の境界があるので、電線検出のアルゴリズムに有効活用できると考えられる[7]。

実験においては、家屋や林等の複雑な背景

においても安定した結果を得ている。また、後工程の検査のため、グラフカット[8]による領域のセグメンテーションを用いた詳細な電線領域を得ることができた。

2. 電線の撮像機器と取得画像

先行研究では地上や電線に併走するヘリコプタから画像を得る方法[6]も提案されているが、全周の画像を得ることが困難であることや、強風下での利用に向かないことが問題となっていた。また、自走式の点検装置においても 20~25kg 程度であれば人による運搬も可能ではあるが、50kg 超のサイズとなると計測に必要なコストも問題となる。本研究ではさらなる軽量化と計測にかかるトータルコストを軽減すべく新たに計測用自動走行装置を設計している。この装置では画像の取得において、図1のように電線の周りに120°間隔で3台のカメラを配置している。ここで、運搬時に必要とされる堅牢性や撮像手順の簡易化のため、本研究ではSONY製HDR-AS30Vを採用している。近年、ウェアラブルカメラとも呼ばれ、スポーツ時の一人称撮影等に用いられているカメラであるが、図2のようにワイドな画像が取得されるのが特徴であり、画像周辺部の歪みも強いため点検に用いる場合には問題となる。カメラ設置の条件と画像周辺の歪みの影響が少ない方向を考慮し、画像の縦方向を電線の長手方向としている。また、カメラアーム形状よりその揺れも無視できない程度にあるが、電線がほぼ画像中央に位置するため、取得段階では1280x720で得る画像を、中央部600ピクセルのみを後の処理で用いている。なお、カメラ設置の精度が高まれば画像の横幅をさらに狭くすることもできるが、簡易な取り付けにも対応すべく一定以上の幅としている。

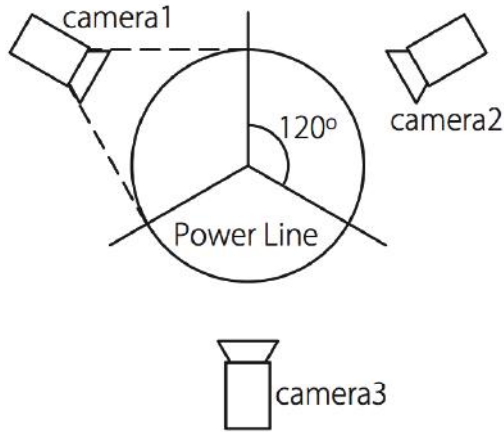


図1 電線とカメラの配置



(a) カメラ 1



(b) カメラ 2



(c) カメラ 3

図2 取得された画像

3. 素線境界の検出λ

電線の中心には、鉄塔間の張力に耐えるための鋼心があり、そのまわりを軽く腐食に強いアルミニウムの素線で覆う構造となっている。4章で述べる電線の左右端を抽出する手法については、この素線境界を抑制するような

前処理を用いる。一方で、本章では素線を複雑背景下でも検出できるようにするため、図3のようなアルゴリズムを構築する。なお、環境によって外部の素線が変色することや外乱光の影響が強いことより、グレースケール画像を対象とした処理となる。なお、以下の解説では画像の左上を原点とし、横方向に X 軸、縦方向に Y 軸とする。λ

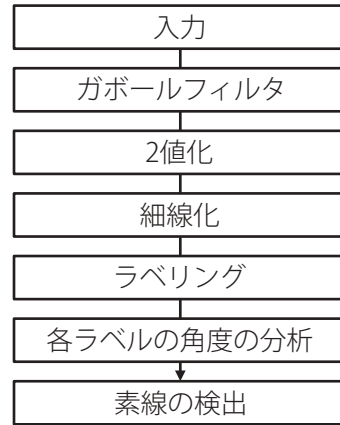


図3 処理の流れ

3-1 素線境界の候補

素線境界の候補となる線を検出するため、図4のような入力画像に対し、ガボールフィルタを用いる。素線間の影によって濃度値が低くなる領域を抽出することを狙うため、式(1)のようなフィルタを設計した。

$$g(x, y; \lambda, \theta, \psi, \sigma, \gamma) = \exp\left(-\frac{x'^2 + \gamma^2 y'^2}{2\sigma^2}\right) \cos\left(2\pi \frac{x'}{\lambda} + \psi\right), \quad (1)$$

$$(x' = x \cos \theta + y \sin \theta, \quad y' = -x \sin \theta + y \cos \theta)$$

ここで、カーネルサイズや波長 λ については画像内のおおよその電線のサイズにあわせて求めるが、厳密な値とはしていない。また、位相 ψ を 180°, 方向 θ は 0° として、図5に示すようなカーネルを用いている。なお、連続して計測しているため、2フレーム目以降では角度 θ は前フレームの素線情報を基にして最適化

している。 π

得られたガボールスペースに対して、2値画像を図6のように得る。この画像に対してラベリングをし、素線とならないような例外値の面積を持つラベルを除去する。本手法ではかなり小さいエッジを除去するため面積の閾値を200ピクセルとした。図7は各領域の細線化結果であり、この領域群を素線境界の候補とする。



図4 入力画像の例



図5 ガボール
フィルタの例

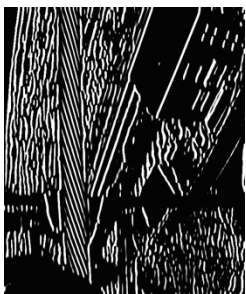


図6 2値画像の例

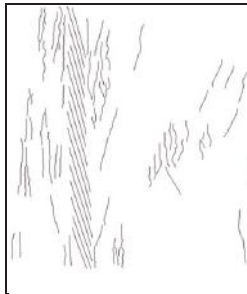


図7 細線化結果例

3-2 素線境界の選定

全ての素線境界の候補より、その領域におけるモーメント特徴を算出し、図8のようなヒストグラムを生成する。このヒストグラムは横軸に角度、縦軸にその角度を持つ領域の頻度(領域の個数)を示している。このヒストグラムに対して、より頻度の高い角度を持つモードが素線であると仮定し、その角度付近のエッジを素線として図9のように抽出する。検出された素線境界については、4章の電線領域抽出手法において2値の特徴量として用いる。 π

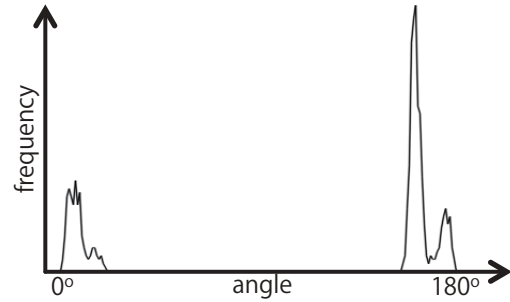


図8 素線境界候補の角度ヒストグラム

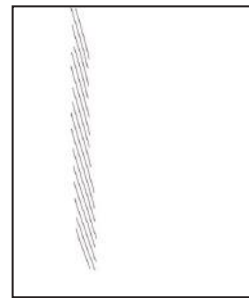


図9 素線の検出結果

4. 電線と背景の領域分割 π

本研究の最終的な目標は電線に対する外観検査により、電線の経年変化や損傷の状況を得ることである。本論文ではそのための前処理である電線領域の検出を目的とする。本手法の電線領域の検出においては、電線のテクスチャがほぼ均一であることを利用し、グラフカットを用いて領域分割している。領域分割に与えるシードについては、上記の理由より詳細な領域は必要ではなく、画像内の電線領域の一部が確実に与えられればよい。このアルゴリズムによって、電線表面の経年変化や外乱光の影響によって様々に変化することへ対処している。また、電線の太さについても規格が複数あるため、その変化にも対応できるように各パラメタの設定に余裕を持たせてアルゴリズムを構築した。

4-1 処理手順

全体の処理手順を図10に示す。最終的な画像の領域分割に用いるシードは、電線の左右

端の直線から求めており、その内側を候補領域としている。そこで、電線の左右端が確実に抽出できるように、電線の素線のエッジはぼかしつつも、電線の左右端エッジが確実に抽出できるようにアルゴリズムを構築した。



図 10 処理の流れ

って、電線の左右輪郭のエッジ点の連続性を向上させ、また素線および背景の複雑に孤立・連結するエッジ点を抑制している。

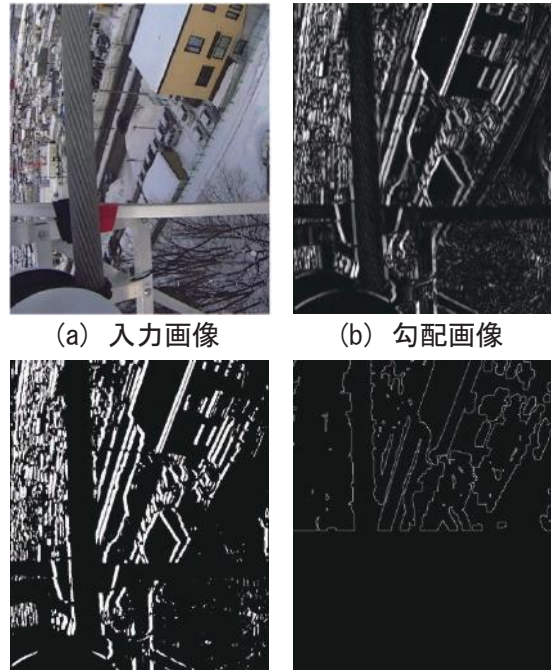


図 11 前処理の結果

4-2 前処理

直線検出までの前処理を以下に示す。電線の表面は素線という細い線が束ねられらせん状に巻かれている。後の処理である検査の段階では、素線に対する精査が必要となるが、本手法では電線の左右端を得ることが目的であるため、現段階で素線の情報は必要ない。そのため、素線のエッジが弱くなるよう、強めの平滑化処理をする。その後、Sobel オペレータにて図 11(b)に示すような勾配画像を得た後に、判別分析法による閾値で 2 値化することにより、弱エッジを消去することで図 11(c)を得る。さらに膨張処理を加え、電線内部のエッジ点を抑制し、電線輪郭のエッジ点の連続性を高めている。その後、画面下部の装置が見える範囲を除外して Canny オペレータを用いているが、処理対象画像がすでに 2 値画像となっており、現状では図 11(d)のような細線化結果を得るために利用している。これらの処理によ

4-3 電線の左右端抽出

前処理で得られた 2 値のエッジ画像に対し、Hough 変換を用い、図 12 のように一定投票数以上の直線を検出している。得られた複数の直線の中から、その直線の角度 θ が画像の Y 軸に対して $\pm 1/10\pi$ の範囲にあり、また直線間の角度 θ_p がほぼ等しく、さらにその間隔 d がある範囲内のペアを左右端として以下のように定めた。

$$\theta_p < 0.01 \tag{2}$$

$$20 < d < 100 \tag{3}$$

$$\theta \in (1/10)\pi, \theta \in (19/20)\pi \tag{4}$$

ここで、角度の単位はラジアン、間隔の単位はピクセルである。またこれらのパラメタは余裕を持たせて設定しており、機器の精度の高い設置を必要としない。例えば間隔の下限に

については、素線よりは明らかに太く、上限については、電線より明らかに太い値としているため、設置条件を考慮した調整はほぼ必要ない。これらの条件を満たす複数の直線ペアを得ることになるため、以下の各特徴量を用いて、最良の直線ペアを定める。



図 12 Hough 直線の検出結果

4-3-1 オプティカルフロー

電線の候補となる領域を評価する特徴量としてオプティカルフロー[2]の上下方向への強度を用いた。オプティカルフローの出力結果を図 13 に示す。なお、本実験では装置が画面下方向に移動しているため電線や背景は上方向に流れる。この図では上方向(フロー強度のマイナス方向)を赤、下方向を青に割り当てて描画している。また本実験では 120 fps で映像を取得しており、オプティカルフローの算出には連続する 2 フレームから求めている。北海道の全ての電線には難着雪リングが設置されており、装置の移動には支障をきたさないが、得られる映像には強く影響する。カメラのシャッタースピードおよびオプティカルフローのフレーム間隔については現時点で最も高速に取得できる設定を採用しているが、継続して詳細な検討が必要である。具体的には、この難着雪リングを乗り越える際の衝撃等の影響により画像全体の見かけ上で「止まる」、「反対方向へ動く」ような結果を得る。実際にはカメラから電線もしくは背景までの距離が異なるため、上記のような状況においても、背景に対して電線の領域は常に一定のオプティカル

フローを画像内で相対的に持つ。



図 13 オプティカルフローの縦方向成分

これらの状況に対処すべく、本手法では以下の手順でオプティカルフローの結果を補正処理した。まず、得られたオプティカルフローの各列において式(5)にてその中央値を得る。

$$m_x = \text{mid}(o_x, y) \quad (5)$$

ここで、 o_x, y は画像のオプティカルフローの各画素における、縦方向成分とし、 m_x はそれらの各列における中央値を示す。 m_x は図 14 に横軸を画像の X 方向、縦軸をオプティカルフロー強度のグラフとして示しており、この例では画像の右側ほどオプティカルフローの縦成分が強く(上側へ流れている)なる。従って、電線よりも背景右側のフローが強くなるため、この結果に対し閾値処理を試みる場合、平均値・中央値どちらでも良好な結果は得ることができない。そこで、 m_x への近似直線をこのオプティカルフローに対する閾値として、閾値以下の成分を除去した結果を図 15 に示す。この結果が示すとおり、図 13 と比べ電線付近のフローが強調され、背景部のフローが低減されていることが分かる。

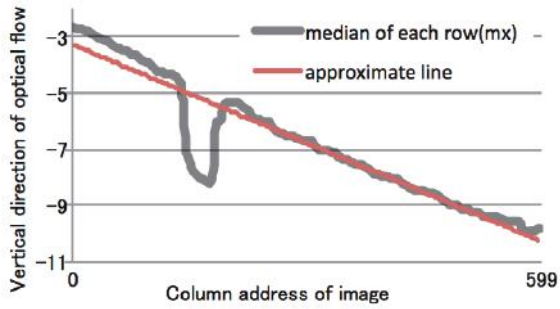


図 14 各列の中央値の例と近似直線



図 15 オプティカルフローの補正結果

4-3-2 電線左右端の選定

複数の直線ペアからオプティカルフロー、素線特徴、および RGB 各プレーンの濃度値を特徴量として選定する。本手法では複数の直線ペア p における直線間の領域に対し、各特徴での分散 v_i, p を算出した。この各特徴を降順ソートし、ペア p 毎に各特徴量の順位を求め、その合計が最も小さいペアを左右端として定めた。

4-4 領域分割

Graph cuts に与えるシードとして、直線の左右端の座標を基に図 16 のようにオブジェクトの候補領域と背景領域を定めた。ここで、前景を与える手順として、1 ライン毎に $x_l - x_r$ を仮装電線幅とおき、その幅の 90% を候補領域とみたと、同様の間隔を外側にとるように背景領域として定義している。図 17 に各カメラの入力画像で領域分割できている結果を示す。

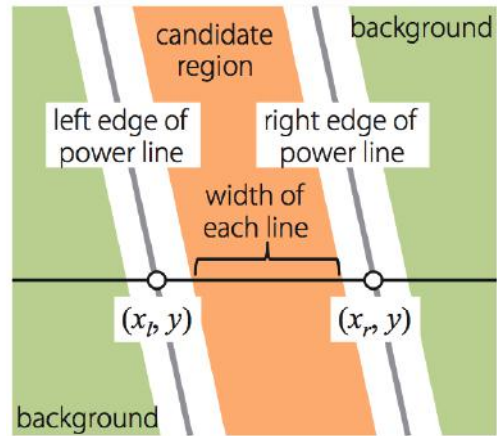


図 16 電線の左右端と各候補領域

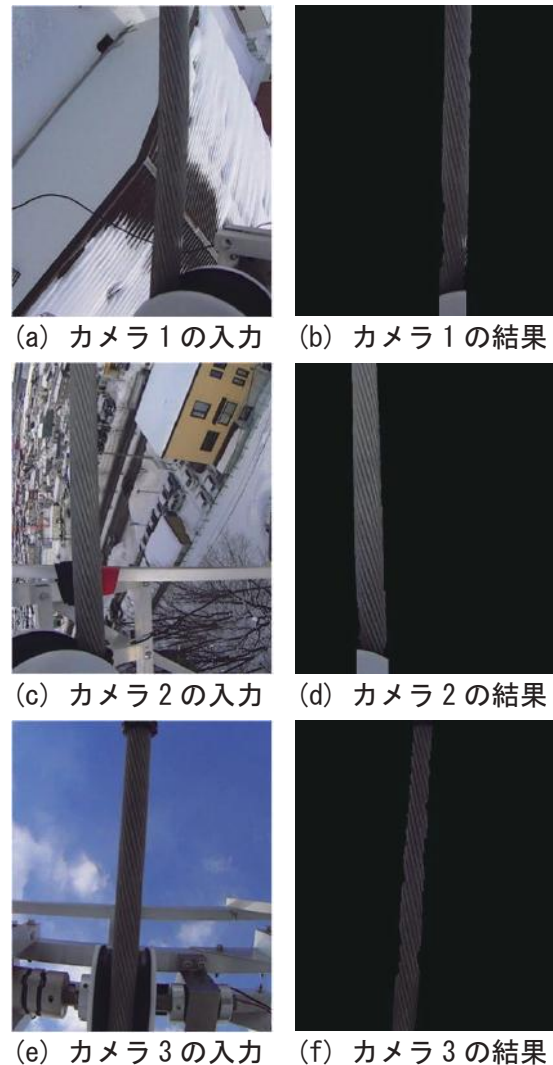


図 17 電線の検出結果

5. 実験

北海道電力内の走行試験場において、電線点検用走行装置に取り付けたカメラで得た画像を用い、画像からの電線領域検出性能を確認した。本実験では各カメラで得られた映像より 240 フレームを対象としてテストデータを作成した。これらのデータセットに対し電線領域抽出の実験を行ったところ全てのフレームで電線領域を検出できたことを確認した。図 17(a および b) で示すように、カメラ 1 のデータセットでは背景に写る屋根の色が電線に似ており、また屋根の周期的なテクスチャも電線の素線に似通っているが問題無く検出できている。図 17(c および d) はカメラ 2 の入力と結果であり、背景の住宅地が非常に複雑なテクスチャとなっている。また、道路も電線に似た色でかつ直線性の高いエッジを含んでいるが、それらのノイズに影響されず電線が検出できている。この例では特にオプティカルフローが効果的であることが知見として得られた。図 17(e および f) はカメラ 3 の入力と結果であり、背景のテクスチャは雲程度だが電線の下側であるため暗くなる。結果として Graph cuts に与えるシードが電線よりもかなり細かい場合は画像の領域分割結果が安定しない結果となった。

6. まとめ

本論文では電線外観検査の前処理である画像内からの電線領域の検出手法を提案した。簡易的なカメラセッティングや、電線の太さが異なる規格でも動作することを前提とした手法を提案し、電線点検用走行装置に取り付けたカメラを用いて実験した結果、良好な検出性能を確認することができた。

今回の実験は試行段階であるため、カメラのフレームレートや装置の動作スピードについては引き続き検討をしていく必要がある。実験回数も不足しており、それに伴い複数の

天候や明るさでの検証や手法の改善についても取り組んでいく。また、領域分割や前処理の内容についても今後改善していきたい。

参考文献

- [1] Debenest, Paulo, Michele Guarnieri, Kensuke Takita, Edwardo F. Fukushima, Shigeo Hirose, Kiyoshi Tamura, Akihiro Kimura, Hiroshi Kubokawa, Narumi Iwama, Fuminori Shiga (2010) "Expliner - Robot for Inspection of Transmission Lines", The transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. B, A publication of Power and Energy Society 130(5), pp. 469-472.
- [2] Farneback, Gunnar (2003) "Two-Frame Motion Estimation Based on Polynomial Expansion", Proceedings of SCIA2003, pp.363-370.
- [3] 藤原孝幸・岩崎准一・伊藤真也・明河伸一 (2013)「オプティカルフローとグラフカットに基づく電力線領域抽出」『電気学会知覚情報次世代産業システム合同研究会』PI-15-020, IIS-15-046。
- [4] 林原健人・中村尚彦・浜克己・岩崎准一 (2013)「送電線用自動点検装置の開発」『第13回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会』1G1-6。
- [5] 石野隆一・堤富士雄 (2010)「自走式点検装置で撮影した架空地線映像からの異常検出手法」『電力中央研究所研究報告書』R09016。
- [6] 架空送電線の電線劣化(腐食)現象調査専門委員会 (2004)「架空送電線の電線腐食現象」『電気学会技術報告』968, pp.1-90。
- [7] Matsuda, Jukiya, Takayuki Fujiwara, Jun-ichi Iwasaki, Shinya Ito and Shin-ichi Akegawa (2015) "Improvement of Transmission Power Line Detection by Using Gabor Filtering", Proceedings of Electronics, Information and Systems, SS6-2.
- [8] Rother, Carsten, Vladimir Kolmogorov and

Andrew Blake (2004) ""GrabCut" :
Interactive foreground extraction using
iterated graph cuts", ACM Transactions on
Graphics, Vol.23-3, pp.309-314.

謝辞

研究を進めるにあたり重要な知見の提供
を頂いた北海道電力ネットワーク技術グル
ープのメンバーに感謝いたします。