

画像処理技術を用いた ワイヤーロープ素線切れ検出技術の開発

藤田 雄一¹・ルイ笠原 純ユネス²・山下 淳³

¹非会員 鹿島建設株式会社 機械部 機械技術イノベーショングループ
(〒107-8477 東京都港区元赤坂1-3-8)

東京大学大学院共同研究員 工学系研究科総合研究機構 i-Constructionシステム学寄付講座
(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
E-mail:fujityui@kajima.com

²非会員 東京大学大学院特任講師 工学系研究科総合研究機構 i-Constructionシステム学寄付講座
(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)
E-mail:louhi@robot.t.u-tokyo.ac.jp

³正会員 東京大学大学院教授 新領域創成科学研究科 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)
E-mail:yamashita@robot.t.u-tokyo.ac.jp

建設機械のワイヤーロープ点検作業のほとんどが、現場環境下にて人力で実施されている。そのため、点検に使用できる機器や作業時間などの作業環境に制約があり、結果として点検結果が点検者の技量に左右されてしまう。本研究は、作業環境、作業者の技量に左右されないワイヤーロープ点検システムの開発を目的としている。本稿では、ワイヤーロープにとって重大な損傷の1つである素線切れの検出を対象に、画像処理技術を用いた検出手法について検討したので報告する。

Key Words: construction site, wire rope, inspection system, damage detection, image processing

1. はじめに

ワイヤーロープは、建設現場で使用される荷役および運搬用機械装置の主要構造に広く使用されている。クレーンやエレベーターなどがその例であり、これらは非常に大型である。そのため、ワイヤーロープの破断が起きると、機械の倒壊や吊荷の落下などの重大かつ大規模な災害につながる。これら機械装置の使用にあたっては、ワイヤーロープに対する正しい知識を持って管理することが必要である¹⁾。

クレーンのワイヤーロープ点検作業の場合、一般社団法人日本クレーン協会が示すワイヤーロープ廃棄基準および簡易点検マニュアルに則り、目視で損傷の状況をチェックする。表-1 に点検項目の例を示す²⁾。この基準に基づいて日常及び定期的に点検を実施し、損傷有無や劣化状態を常に把握することが重要であるが、これらの点検のほとんどが現場環境下で人力・目視により実施されているため、作業にはさまざまな制約があり、結果として点検結果が作業者の技量に左右されてしまう。

近年では、この目視点検の代替手法として、画像セン

表-1 ワイヤーロープ点検項目、廃棄基準

点検項目 (抜粋)	廃棄基準
 素線断線	素線断線数が ・ロープ1より(1ピッチ)間で10%以上 ・ロープ5より(5ピッチ)間で20%以上
 摩耗	直径の減少が公称径の7%を超えたもの
 腐食	素線の表面にピッチングが発生 内部腐食により素線がゆるんだもの
 形崩れ	キンク、うねり、偏平化、 心鋼のはみ出し、著しい曲がり、など

サ／画像処理技術を用いた手法が開発されている³⁾⁴⁾⁵⁾。それらの手法の多くはエレベータや屋内天井クレーンなどを対象としている一方、建設現場のような屋外の喧噪な環境で使用される機械を主対象としているものはない。

また、既存手法を上記の環境で有効に活用した例もないことから、これらの環境の違いは非常に大きいと考えられる。

本開発では、作業環境や作業者の技量に左右されないワイヤーロープ点検システムの開発を目的としており、本稿では、ワイヤーロープにとって重大な損傷の1つである素線切れの検出を対象に、画像センサ／画像処理技術を用いた検出手法について検討したので報告する。

2. 課題

建設現場で実施するワイヤーロープ点検作業に対して、本研究で着目している画像センサ／画像処理技術を活用する際の、主な課題を以下に示す。

(1) 点検環境

前述のとおり、建設機械のワイヤーロープ点検作業のほとんどが現場環境下で実施されるため、計測手法の選定に際しては、機械振動や天候変化などの厳しい計測環境を考慮する必要がある。計測機器を常設する場合は尚更である。前者の機械振動については、建設機械が稼働する際に生じる機械本体の振動や、ワイヤーロープが稼働する際のブレなどである。既存のワイヤーロープの素線切れ検出手法の1つに接触式の磁気センサを用いた手法⁹⁾があるが、大きく振動するワイヤーロープとの繰り返しの接触によりセンサ自体が破損する恐れがある。後者の天候変化については、日照、晴雨、気温などである。

なお、本開発で着目している画像センサについては、前者に対しては有効である一方、後者は影響が大きいと考えられる。そのため、特に現場実装の段階では十分に検討が必要である。

(2) 素線切れ（損傷）の特徴

ワイヤーロープの損傷については、本稿が対象としている素線切れに限らず、その種類や程度は様々であり、それらの損傷について画像特徴量を抽出・表現することは難しい。さらには、使用中のワイヤーロープに素線切れが発生すること自体が少ないため（日常のメンテナンス、運転時間を基準とした早期交換を実施）、それらのサンプルを多数集めることも難しい。そのため、例えば、既知の素線切れ画像をテンプレートとしたマッチング手法や、教師あり学習による画像分類手法では、今後発生する未知の損傷を検出することは困難である。

これらの特徴があることから、本開発では、素線切れを第一対象としつつ、広く損傷状態を検出可能な手法を検討する。

3. 検討手法

(1) オートエンコーダによる検出

前章の課題を解決する手法として、オートエンコーダを用いた素線切れ検出手法を検討する。

オートエンコーダとは教師なし深層学習の1つで、入力層と出力層が同一になるように学習する畳み込みニューラルネットワークであり、入力データを一度圧縮するエンコーダ部分と、そこから出力データが入力データと同一になるように再構成するデコーダ部分を有するネットワーク構造である。

検討した素線切れ検出手法のコンセプトを図-1に示す。まず学習段階において、正常な（損傷が無い）ワイヤーロープ画像のみを入力として、正常な状態の特徴量を学習させる。次に予測段階では、学習したネットワークに対して、未知のワイヤーロープ画像を入力し、学習段階と同様に入力画像の再構成を試みる。そして、入力画像が正常な場合は元画像の再構成可能、入力画像が異常（損傷あり）な場合は再構成困難であるという性質から、入力画像と出力画像の差（＝再構成誤差）によって画像内の損傷有無を判断することを検討する。

図-1では、入力／出力画像の同一ピクセル毎に輝度値の差を再構成誤差（値：0-1）として、図右下のカラーマップにより異常箇所を可視化している。緑～赤の領域ほど誤差が大きい（＝異常度が高い）ことを表している。

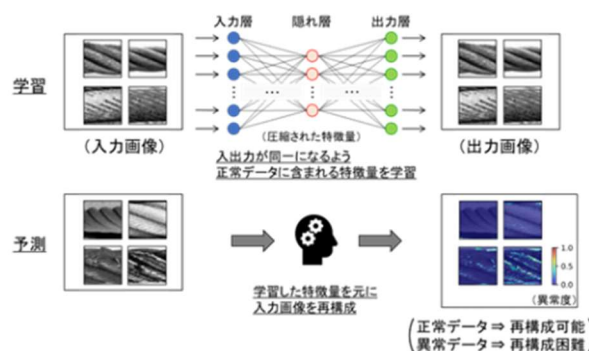


図-1 オートエンコーダによる検出

(2) ガボールフィルタによる検出

もう1つの素線切れ検出手法として、ガボールフィルタ⁷⁾による局所周波数特徴量を用いた手法を検討する。

ワイヤーロープ構造は図-2に示すように、ワイヤーロープ、ストランド、素線（最小単位）に分解される。そして、いずれのワイヤーロープも素線は図のように一定方向に流れており、図に示した「普通 Z より」と呼ばれる線種では、素線はロープ軸（水平方向）にほぼ平行である。ここで画像内の素線領域に注目すると、その領

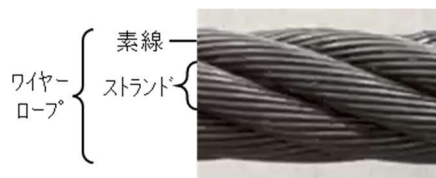


図2 ワイヤーロープ構造

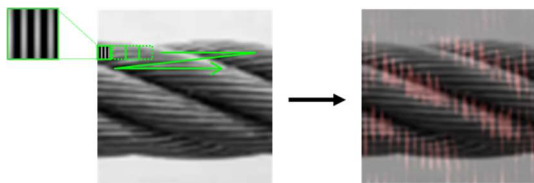


図3 ガボールフィルタによる特徴量抽出

域における素線平行方向の空間周波数強度は低い。逆に注目した素線に断線がある場合、その箇所は正常な素線と比べて高い空間周波数強度が存在することになる。図-3は素線に直交するガボールフィルタ（緑四角）を畳み込み、正常画像における素線平行方向の空間周波数強度を算出した結果を示しており、図右の赤で示した箇所ほどその強度が高いことを示している。ここでは、ストランドの境目には高い強度がみられるが、素線領域ではそれはみられないことがわかる。これらより、ガボールフィルタによって素線領域に局所周波数特徴量がみられた際は、何かしらの異常があると判断することを検討する。

4. 検証結果

(1) オートエンコーダによる検出

学習にあたっては、現場環境および実験室内での撮影などにより取得した正常なワイヤーロープ画像と、それらについて色変換（明るさ、コントラスト、彩度、色相）、回転、左右／上下反転などのデータ拡張を行い取得した計 3,870 枚の画像を学習に用いた。ネットワークに入力する際は、 64×64 画素にリサイズ、グレースケール変換、1次元テンソルに変換する。使用したネットワークについて、エンコーダ層では 4096, 2048, 1024 の順で次元削減し、デコーダ層ではその逆順で復元し、最終的な出力として 64×64 画素画像を再構成する。活性化関数はエンコーダ層では ReLU 関数、デコーダ層ではシグモイド関数、誤差関数は最小二乗誤差、最適化手法は Adam を用いた。学習は 100 エポック行った。

図4に検証結果を示す。左列から、入力画像、損傷ラベル、誤差画像の二値化（閾値がそれぞれ 0.2, 0.4, 0.6）、を表している。代表例として、上3つの素線切れ画像、最下の摩耗画像での結果を示している。今回の検証では、素線切れ抽出という観点において良好な結果は得られなかった。原因としては、検討した再構成誤差の算出方法

入力画像	損傷ラベル (白: 損傷)	誤差画像の二値化(黒: 正常, 白: 異常)		
		閾値: 0.2	0.4	0.6

図4 オートエンコーダによる異常検出結果

入力画像	損傷ラベル	誤差画像 (大津の二値化)	抽出領域

図5 連結成分による異常検出結果

及び二値化閾値の設定方法に起因していることが考えられる。また、本稿で対象とした素線切れ自体が非常に微少な損傷であるために、誤差画像内のノイズ（誤検出箇所）との区別がそもそも難しいことが考えられる。

しかしながら、最下の摩耗画像に対する誤差画像に注目すると、点在している異常（白）だけでなく、中央部分にまとまった異常の領域が確認でき、入力画像内で面的に存在する摩耗痕の領域と合致しているように見える。そこで追加検証として、画像内の連結⁹⁾に注目した。連結とは二値画像におけるひとまとまりの領域を定義する概念であり、ある注目画素の近傍に同一の画素値があるとき、それらはひとまとまりであるとみなす。今回は注目画素の上下左右の画素に対して連結を定義した4連結成分に注目する。図-5に追加検証結果を示す。ここでは、前述の手順で再構成誤差の算出までを行った後、大津の二値化⁹⁾によって二値誤差画像を取得、当該画像に含まれる4連結成分の内、面積が最大のものを抽出した（緑四角）。結果として摩耗領域と近い領域の抽出に概ね成功しており、摩耗痕のように画像内で一定程度の大きさを有する損傷について、検出可能性が確認された。

(2) ガボールフィルタによる検出

検討手法の有効性を確認するために検証を実施した。ワイヤーロープ画像はあらかじめロープ軸が水平方向になるよう調整し、ガボールフィルタは図-3に示したもの

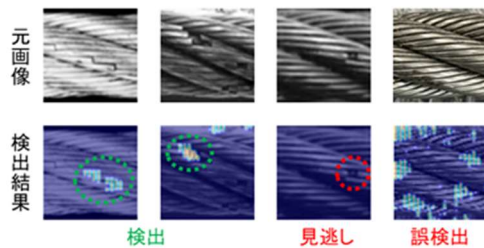


図-6 ガボールフィルタによる特徴量抽出

を使用した．図-6に検証結果を示す．図左の2枚では、緑丸で示した領域の素線切れ検出に成功した結果．図右の2枚ではそれぞれ、見逃し、誤検出結果を示している．結果として、先のオートエンコーダ手法では検出が困難であった微少な素線切れ検出について一部成功している．一方、見逃し、誤検出結果については照明条件、油脂付着などに起因していると考えられるため、それらの影響を抑える工夫は今後の課題となる．

5. おわりに

本稿では、建設機械のワイヤーロープ点検の内、素線切れの検出を対象に画像処理技術を用いた検出手法について述べた．素線切れの状態は多様であり、それらの画像特徴量の定義が困難であることから、正常ワイヤーロープ画像が持つ特徴を用いた検出手法として、オートエンコーダによる検出、ガボールフィルタによる検出を検討した．前者では素線切れ検出について良好な結果は得られなかったが、追加検証にて異なる損傷の類（摩耗）に対して良好な結果が得られた．後者では対象とした素線切れ検出に一部成功した．

今後もこれらの検出手法の改良に取り組み、ワイヤーロープ点検手法の高度化に努めたいと考えている．

謝辞：本研究は、東京大学「i-Constructionシステム学寄付講座」のもと、東京大学と鹿島建設㈱との共同研究により実施されたものである．関係者の皆様に厚く御礼申し上げます．

参考文献

- 1) 一般社団法人 日本クレーン協会, “クレーン等のワイヤーロープの安全点検”, http://www.cranenet.or.jp/susume/susume07_08.html, (閲覧日 2024.05.08)
- 2) 一般社団法人 日本クレーン協会, “ワイヤーロープの簡易点検”, <http://www.cranenet.or.jp/tisiki/wire.html>, (閲覧日 2024.05.08)
- 3) 東京製綱株式会社, “高精度センサーを用いたエレベーターの定期検査に係る技術開発報告”, <https://www.nedo.go.jp/content/100940190.pdf>, 2021 (閲覧日 2024.05.08)
- 4) 株式会社島津製作所, “規制の精緻化に向けたデジタル技術の開発／高精度センサーを用いたエレベーターの定期検査に係る技術開発”, <https://www.nedo.go.jp/content/100940189.pdf>, 2021 (閲覧日 2024.05.08)
- 5) 株式会社熊谷組, “クレーンワイヤー全周囲外観検査システムの開発”, <https://www.kumagaigumi.co.jp/news/2023/development-of-crane-wire-all-around-visual-inspection-system.html>, (閲覧日 2024.05.08)
- 6) 東京製綱株式会社, “ワイヤーロープ断線検知装置”, https://www.tokyoropeco.jp/product/wirerope/pdf/MF550_catalog_201001.pdf, (閲覧日 2024.05.08)
- 7) CG-ARTS(2020), “デジタル画像処理[改訂第二版]”, pp. 214-218
- 8) 同上, pp. 198-199
- 9) Nobuyuki Otsu: “A Threshold Selection Method From Gray-Level Histograms,” IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-9, no. 1, pp. 62-66, 1979.

(2024. ?? 受付)

DEVELOPMENT OF WIRE ROPE STRAND BREAKAGE DETECTION METHOD USING IMAGE PROCESSING

Yuichi FUJITA, Jun Younes LOUHI KASAHARA and Atsushi YAMASHITA

Most wire rope inspection work for construction machinery is performed manually at construction sites. Therefore, there are restrictions on the work environment, such as the equipment that can be used for inspection and the working time, and as a result, inspection results depend on the skill of the inspector. The purpose of this research is to develop a wire rope inspection system that is not affected by the work environment or worker skill. In this paper, we discuss a detection method using image processing technology for detecting strand breaks, which is one of the most serious damages to wire ropes.