

ドローンを用いた空撮画像と画像処理による 水圧鉄管点検業務の効率化

福岡 知隆¹・南 貴大²・藤生 慎³・高山 純一⁴・塩崎 由人⁵

¹正会員 金沢大学博士研究員 理工研究域地球社会基盤学系（〒920-1192 金沢市角間町）
E-mail:tfukuoka@se.kanazawa-u.ac.jp

²学生会員 金沢大学大学院 環境デザイン学専攻（〒920-1192 金沢市角間町）
E-mail:taketaka0503@stu.kanazawa-u.ac.jp

³正会員 金沢大学准教授 理工研究域地球社会基盤学系（〒920-1192 石川県金沢市角間町）
E-mail:fujju@se.kanazawa-u.ac.jp

⁴フェロー会員 金沢大学名誉教授 理工研究域地球社会基盤学系（〒920-1192 石川県金沢市角間町）
E-mail:takayama@se.kanazawa-u.ac.jp

⁵正会員 金沢大学特任助教 理工研究域地球社会基盤学系（〒920-1192 石川県金沢市角間町）
E-mail:yuto@se.kanazawa-u.ac.jp

水力発電には発電施設よりも高い位置にある水源の水が用いられる。水は水圧鉄管を通して水源から発電施設に運ばれるが、この水圧鉄管は直径が数十cmから数m、長さは数十mから数kmにも及ぶ場合がある。これらの水圧鉄管に対して定期的な点検が行われているが、現在の点検手法は作業員が直接現地に赴き水圧鉄管全体の損傷具合を確認しており、時間と労力を要する。

我々はこの問題に対してドローンと画像処理技術による損傷確認の自動化手法を提案する。提案手法では水圧鉄管をドローンで撮影し、撮影した画像を深層学習による画像処理で損傷箇所を検出する。本稿では提案システムの概要について述べるとともに、損傷検出評価実験、手法の実現における課題について述べる。

Key Words : Penstock maintenance, Drone, Semantic segmentation

1. はじめに

水力発電は水が高い所から低い所へ流れる時の運動エネルギーを利用し、発電用の水車を回して発電を行う。発電に用いられる水は水圧鉄管を通して発電施設に運ばれるが、水源地と発電施設の位置関係によって、水圧鉄管は直径が数十cmから数mになり、長さは数十mから数kmにも及ぶ場合がある。

これらの水圧鉄管に対しても点検が行われているが、現在の点検手法は作業員が直接現地に赴き、水圧鉄管全体の損傷具合を確認する。点検作業で確認するのは主に水圧鉄管の錆の有無であり、水圧鉄管表面にどの程度錆が発生しているかを記録する。水圧鉄管全体の損傷の確認のためには、作業員が水圧鉄管長とほぼ同じ距離を歩く必要がある。また、水圧鉄管は山間部に設置されることが多く、勾配も大きく、点検には時間と労力を要し、作業員にとって大きな負担となっている（図1）。



図-1 山間部の水圧鉄管

我々はこの問題に対してドローンによる水圧鉄管画像の撮影と画像処理技術による損傷確認の自動化手法を提案する。提案手法では水圧鉄管の表面の状態をドローン

による空撮画像として取得することで作業員の移動の負担を軽減する。また、作業員による点検は目視により行われているため、画像処理により損傷確認作業の自動化が可能であると考えられる。提案手法では深層学習による物体検出処理を併用することで、損傷箇所を自動検出し、さらなる省力化を図る。画像内の水圧鉄管の領域を自動検出することにより、表面積の内、損傷している面積の割合を算出することが可能となる

本稿では提案手法の概要について述べるとともに、錆領域の抽出評価実験を行い、現時点で判明して手法実現における問題点について述べる。

2. 関連研究

提案手法では入力された撮影画像から水圧鉄管領域、錆領域を自動で検出する。深層学習を用いた物体検出手法として、既にYOLO¹⁾やSSD²⁾が提案されている。これらの手法は高速な検出処理が可能であり、リアルタイムでの物体検出が行える。しかし、これらの手法は矩形で対象となる物体の領域を区切るため、本研究で対象とする錆のような非線形領域の正確な抽出し、面積を算出するのには適していない。そこで、本研究ではピクセル単位での領域抽出が可能なセマンティックセグメンテーション手法を用いる。

Fully Convolutional Networksを用いたセマンティックセグメンテーション³⁾やSegNet⁴⁾は深層学習を画像分割に応用した初期の手法である。これらの手法では人、動物、乗り物、家具などの物体の検出で評価されている。我々はこれら既存のセマンティックセグメンテーション手法を水圧鉄管と錆の領域検出に応用する。

3. 提案手法概要

図-2に提案手法の流れを示す。ドローンにより水圧鉄管を撮影し、撮影画像を入力とした画像処理により水圧鉄管、錆の領域を検出する。検出結果は水圧鉄管領域を黒、背景を白、その他の色を錆領域とした画像である。

(1) 水圧鉄管の撮影

ドローンを用いて図-3のように一定間隔ごとに水圧鉄管を撮影し、水圧鉄管全体の画像を取得する。なお、ドローンの操作には自動操縦機能を利用する。あらかじめドローンの飛行経路を設定して撮影を行うことでパイロットによる操縦が不要となり、作業員の労力を軽減できると考えられる。また人手の操作による揺れなどがなくなるため、ドローンの飛行が安定し、水圧鉄管の画像も一定間隔で揺れも少なく撮影が可能であると考えられる。



図-2 提案手法の処理の流れ



図-3 連続した空撮画像の例

(2) 画像処理による錆検出

提案手法ではドローンによって撮影された画像を入力として、深層学習を用いたセマンティックセグメンテーション処理によって水圧鉄管の領域、水圧鉄管表面の錆を検出した画像を出力する。水圧鉄管の点検業務では水

圧鉄管の表面積に対して錆が占める割合を記録する必要があるため、水圧鉄管と錆の二種類の領域を検出する。

提案手法では水圧鉄管の検出と錆の検出のモデルは別々に学習を行う。これは錆が進行の程度によって錆びていない箇所の水圧鉄管表面と類似した状態になっているため、二つの領域を識別させるモデルを学習すると錆の領域が単なる水圧鉄管の領域に引きずられ、誤検出を起しやすいと考えられるためである。提案手法では水圧鉄管領域のみを検出し、出力するモデルと錆領域のみを検出し、出力するモデルの二種類を学習する。

それぞれのモデルで検出した結果を用いて、検出した水圧鉄管領域上に存在する検出した錆領域のピクセル数から最終的な水圧鉄管表面の錆の割合を出力する。

4. 錆検出結果の評価

実際にドローンで撮影した水圧鉄管の画像を用いて、提案手法による錆検出の性能について評価を行った。なお、本評価実験では検出する錆は二種類である。錆領域検出モデルはそれぞれの錆ごとに学習を行うものとし、評価は二つのモデルが出力した画像を合成した結果に対して行う。

(1) データセット

本評価実験にはドローンを用いて撮影した3か所の発電所の水圧鉄管の画像57枚を用いる。撮影した画像の大きさは高さ2160、幅3840ピクセルである。それぞれの画像に対して、水圧鉄管領域と錆領域それぞれをアノテーションした画像データを作成する(図-4)。二種類の錆の領域はそれぞれ赤と青でアノテーションされている。赤いアノテーションがされた錆は表面の塗装が完全に剥がれ、水圧鉄管に直接発生している錆、青いアノテーションがされた錆は表面の錆である。用意した57枚の画像は評価用データとして9枚、モデルの学習用データとして48枚にランダムに分ける。

学習用データ48枚はモデルの学習のためにそれぞれ高さ256、幅256ピクセルの画像に分割する。分割された画像の内、錆のアノテーション領域が含まれている画像のみを学習に用いる。青のアノテーションがされた錆領域の検出モデルの学習用データとして388枚が抽出され、赤のアノテーションがされた錆領域の検出モデルの学習用のデータとして843枚が抽出された。なお、二つのアノテーションが混在する画像については、片方の錆領域のアノテーション結果を白色化し、背景とする処理を行った二つのアノテーション結果に対して行い、二つの画像としてそれぞれの学習用データセットに含める。

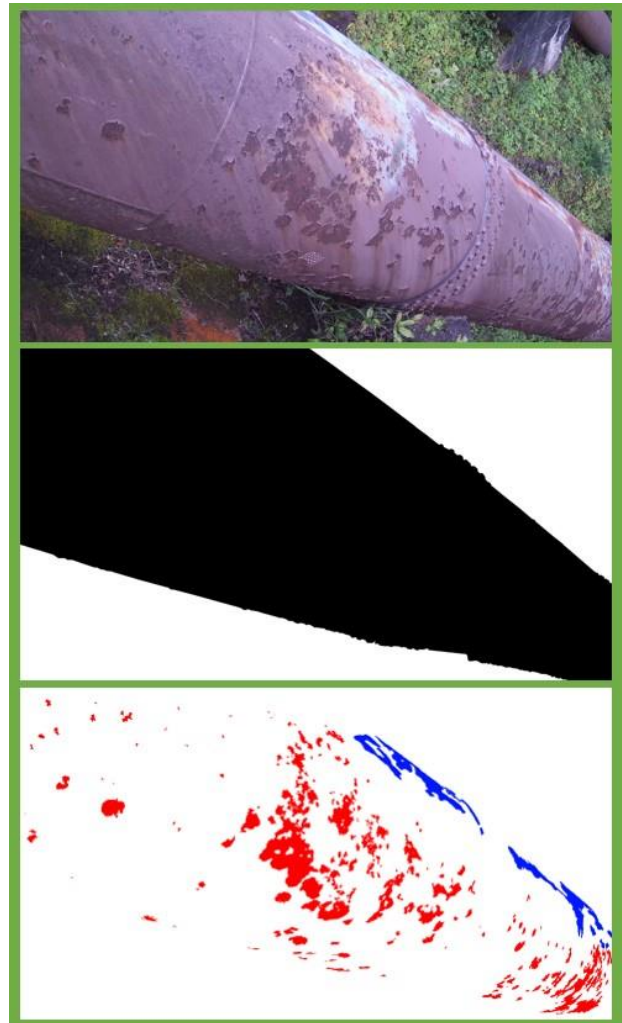


図-4 評価用画像データ (上: 撮影画像, 中: 水圧鉄管領域アノテーション画像, 下: 錆領域アノテーション画像)

(2) 錆領域検出手法

セマンティックセグメンテーションの手法としてDeepCrack[®]を利用する。元々はコンクリート面に生じたひび割れを検出することを目的としたモデルであるが、水圧鉄管における損傷の検出も損傷の検出という点では同様であるため、これを利用することとする。赤アノテーションされた錆だけを検出するモデルと、青アノテーションされた錆だけを検出するモデルをそれぞれ学習する。学習時の最適化アルゴリズムはadamとし、学習率を0.0001、 β_1 を0.9、 β_2 を0.999、1epochを4000 iterationとして、バッチサイズを16、100 epoch繰り返し学習を行った。

錆検出を行うため、入力画像は高さ256、幅256ピクセルの画像に分割し、それぞれの画像ごとに錆領域の検出を行う。それぞれの分割画像ごとの錆領域検出結果画像を結合し、入力画像を再構成したものを出力結果とする。なお、入力画像のピクセル数から分割時に端数が生じた場合、その領域は検出対象外とする。

本評価実験では独立したモデルでそれぞれの錆を検出

する。そのため二つのモデルの錆検出結果が重なるピクセルが存在する場合があるが、より深刻な錆である赤アノテーションを優先するものとする。ここでは同じ入力画像に対して同じ座標のピクセルに錆を検出した場合は赤アノテーションの錆の検出結果を優先して出力する。

(3) 評価方法

本評価実験では錆領域のピクセル単位の検出の成否を評価する。セマンティックセグメンテーションの出力画像において、錆領域として検出された領域の内、どの程度正しく錆領域のピクセルを検出したかを精度(Precision)、評価用データの錆領域のピクセルの内、どの程度正しく検出したかを再現率(Recall)、精度と再現率の調和平均をF値(F measure)として、それぞれ式(1)~(3)に基づき計算する。 $N_{correct}$ は検出モデルによりひび割れとして検出したピクセルのうち、正しくひび割れを検出できていたピクセル数、 N_{detect} は検出モデルがひび割れとして検出したピクセル数を示す。 N_{all} は検出モデルが評価した総ピクセル数である。

$$Precision = \frac{N_{correct}}{N_{detect}} \quad (1)$$

$$Recall = \frac{N_{correct}}{N_{all}} \quad (2)$$

$$F\ measure = 2 \frac{precision \cdot recall}{precision+recall} \quad (3)$$

精度が高いほど検出モデルが検出した結果は正しく錆領域のみを検出できているといえる。再現率が高いほど検出モデルの結果は錆領域検出の取りこぼしが少ないといえる。

(4) 評価結果

表-1に赤のアノテーション錆、青のアノテーション錆、それら二つの錆の検出をまとめた結果について、精度、再現率、F値をそれぞれ示す。なお、1枚の評価用データに対して検出結果が出力されるまでの平均時間は約17秒であった。

評価の結果、提案手法は70%以上の再現率で錆領域を検出することが可能であることが示された。一方で精度が低い結果となっており、これは錆領域の誤検出が多いことを意味している。点検作業の目的上、錆以外の領域を誤判定するよりも、錆領域の取りこぼしが多い方が問題であるため、この結果の傾向は望ましいものである。

提案手法が錆領域を取りこぼす原因の一つとして、錆領域の状態の多様性が考えられる。錆は進行の度合いにより色合いが変化しており、様々な色のパターンが存在している。そのため、評価実験に用いたデータセットでは十分な錆のパターンを学習できていない可能性があり、錆領域検出の取りこぼしの原因の一つと考えられる。

表-1 錆検出検出結果

対象錆	精度(%)	再現率(%)	F値(%)
赤	66.7	80.5	73.0
青	55.2	71.4	62.2
両方	57.5	73.3	64.4

次に精度が低い原因の一つとして、まず赤アノテーション錆は泥などの汚れと類似していること、水圧鉄管の連結部に発生する影が、同じく連結部に発生している錆と似ていることが考えられる。これらの錆以外の類似領域の誤検出が精度低下の一因であると考えられる。青アノテーション錆は状態が様々であり、色合いの変化のパターンも多かったことが再現率と同様に、精度が低い原因の一つと考えられる。

5. 手法実現へ向けた課題

(1) 水圧鉄管撮影

ドローンによる撮影の課題の一つとして、撮影時の水圧鉄管の飛行環境があげられる。水圧鉄管は多くの場合山間部にあるため、水圧鉄管の周りは森で囲まれている。そのため木の枝が水圧鉄管直上にまで伸び、ドローンの撮影の妨げとなる場合が考えられ、ドローンの飛行経路と撮影方法を検討する必要がある。また、点検作業を完全に代替するには、水圧鉄管の下部の状態まで確認できる画像を撮影できるように工夫する必要がある。

(2) 錆領域自動抽出

本稿で評価した手法では錆領域の誤検出が多い。この問題の解決手法として、錆領域検出モデルの学習データを増やし、より多くの錆のパターンに対応可能なモデルを作成することが考えられる。または赤外線画像を撮影することで錆領域とそれ以外の領域の温度変化を用いてこの解決を可能であると考えられる。

6. おわりに

本稿では水圧鉄管点検業務の省力化のため、ドローンと画像処理技術を組み合わせた手法の概要を述べた。また錆領域の検出手法に対する評価実験を行い、錆の領域検出における問題点を考察した。最後に提案手法の実現のために解決すべき課題とその解決策について述べた。

今後は手法の実現のため、残された課題の解決手法の提案、評価を行う。まずは錆領域検出の精度向上のため、学習データの作成と赤外線画像を用いた画像処理手法を考案する。

参考文献

- 1) Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A.: You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 779-788, 2016.
- 2) Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C.-Y., Berg, A.C.: SSD: Single shot multibox detector, European Conference on Computer Vision, pp. 21–37, 2016.
- 3) Long J., Shelhamer E. and Darrell T.: Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation, The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 3431-3440, 2015.
- 4) Badrinarayanan V., Kendall A. and Cipolla R.: SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 39(12), pp. 2481-2495, 2017.
- 5) Qin Z., Zheng Z., Qingquan L., Xianbiao Q., Qian W., Song W.: DeepCrack: Learning Hierarchical Convolutional Features for Crack Detection, IEEE Transactions on Image Processing, 28(3), pp.1498-1512, 2019.

(2020年3月8日受付)

A STUDY ON COMBINATION OF DRONE AND IMAGE PROCESSING METHOD FOR WORK EFFICIENCY OF PENSTOCK MAINTENANCE

Tomotaka FUKUOKA, Takahiro MINAMI, Makoto FUJIU, Junichi TAKAYAMA and
Yuto SHIOZAKI

A hydroelectric power generates an electricity with potential energy of water flow. The water is carried from fountainhead to hydroelectric plant path through a penstock. A penstock diameter is approximately tens of centimeters to several meters, length is approximately tens of meters to several kilometers. A regular maintenance method of penstock needs worker to approaching penstock and check its surface by their eye. Maintenance worker has to walk the distance from one end to the other of penstock to check the whole. This method needs much time and cost.

We propose an automatic maintenance method using a drone and image processing method. This method uses the penstock picture taken by drone to check the surface of the penstock. This picture is used as an input of a deep learning-based image processing method to extract the damaged area on the penstock. In this paper, we describe the overview of the proposed method, evaluate the damage extraction method, discuss the remaining problems to realize the proposed method.