

愛知工業大学教育・研究特別助成
AIT Special Grant for Education and Research
令和 4 年度実績報告書

種 目	研究 分野横断型 研究期間：3 年
課 題 名	深層学習を用いた電柱の劣化診断
研究代表者	津田 紀生（工学部 電気学科 教授）
研究分担者	小塚 晃透（工学部 電気学科 教授） 岩月 栄治（工学部 土木工学科 教授）
助 成 額	2,861,000 円（3 年総額）

費目別決算

(単位：円)

区 分	合 計	設備備品費	消耗品費	旅 費	その他
経費内訳	2,861,000	275,000	2,586,000	0	0

専門分野：計測

キーワード：深層学習、劣化診断、電柱

1. 研究開始当初の背景

コンクリートポール（電柱）は、工場において遠心成形製造するので、現場でコンクリートを打設する土木構造物と比較すると品質が高く、製品ごとのばらつきが少ない。この為、設置後の電柱は、中性化や塩化物イオンの浸透が遅くなると従来は考えられていた。しかし、近年温暖化の影響により日本近海で台風が大型化し、勢力を保ったまま上陸する台風が増加した。その結果、強風により電柱が曲がった際、空隙やひび割れなどの欠損が電柱表面に発生する。しかし、電柱が元の状態に戻ると、これらのひびは閉じてしまい外観からは確認するのが難しい。これは、電柱が高強度の鋼材で圧縮応力（プレストレス）を与えることにより補強したコンクリートで構成された構造物（プレストレスコンクリート構造物）の為である。しかし、この空隙やひび割れから塩化物イオンが浸透した場合や、二酸化炭素などの影響によりコンクリートの中性化が進行した場合、電柱内の鋼材を腐食させる。

電柱表面に生じた欠陥の検査方法としては、空隙やひび割れの長さや大きさの目視による検査や、ハンマーを用いた打音検査が一般的である。打音検査の場合、音を聞き分ける能力が作業者に求められる為、作業者を急に増

やす事は難しい。

近年、深層学習を利用した劣化判断に関する研究が様々な分野で進んでおり、深層学習を利用する事により、電柱の劣化判断ができれば、作業者の熟練度に依存せず誰でも現場で判別する事が可能となる。

2. 研究の目的

電柱は、全国に約 3,592 万本設置されており、年間 7 万本のペースで増え続けている。さらに今後は、電柱に様々なセンサを取り付ける事で自動運転を補助する役割として活躍することなどが期待されている。

コンクリートのひび割れは、コンクリート構造物の劣化と密接に関係しているとし、適切な維持管理によって長寿命化を図ることが求められている。しかし、少子高齢化、地球温暖化、社会基盤の老朽化等の問題によって適切な維持管理が困難になりつつある。

日本にこれほど電柱が増加した要因として、高度経済成長期に電力需要が急増し、低コストで建てられる電柱が多く設置された。しかし、平成 28 年に防災や景観景美の観点から無電柱化に関する法律が成立した。しかし、コストの問題や無電柱化の工事に伴う様々な問題から、現在まで無電柱化は進んでおらず、2019 年度末における国土交通省の調査では、

一方で電柱は、運転支援や自動運転に貢献することが期待されており、最近では、路車間通信に関する実証実験が行われ、既存の電柱が安全運転や自動運転に貢献することが実証された。その為、既存の電柱は耐用年数を超えても大きな劣化がない限り取り壊されることがなく今後も活用されることが予想されるため、電柱や ITS スマートポールの補修・保全に対する重要性は今後益々増加すると考えられる。

現在、電柱に対する点検は、近くからの外観目視と、遠くからの目視が行われている。外観目視は、電柱から 10cm から 30cm の距離からひび割れがあるか確認し、他にも、コンクリートの欠けや剥離等の有無を確認する。遠くからの目視は、電柱がくの字や反って変形がないことを確認する。

研究の目的は、コンクリート内を伝搬する超音波を深層学習で学習し、電柱の劣化判断が技術者の習熟度や周囲の環境に影響されず、誰でも現場で劣化を判別できる学習モデルを作成し、検査の為の安価な IoT エッジ装置を作成し、電柱の劣化を定期的に自動で判別する装置の開発である。

当初電柱を作成している東海コンクリートさんに伺って研究を進める予定であったが、今回の研究期間がコロナの期間と重なった為、長さ約 2m のコンクリート柱を東海コンクリートさんで作成し、学内で研究を行った。図 1 に 2m 柱の外観を、図 2 に 2m 柱表面の横ひびの様子を、図 3 に塩水噴霧の様子を、図 4 に実験装置の配置図を、図 5 に実験に使用した P 波探触子を示す。超音波は、小さな傷でも反射する為、超音波の指向性により傷の位置を特定する事ができる。そこで今回の研究でも、超音波を P 波探触子に印加して実験を行った。

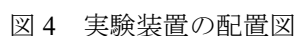
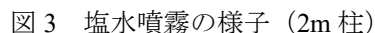
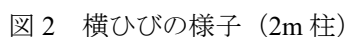
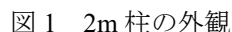




図5 P波探触子

超音波の伝搬を利用した欠陥検出の研究では、単一の周波数を探触子に入力し、その周波数の伝搬波形を測定し、欠陥検出に利用していたが、今回の研究では、単一の周波数を探触子に入力した時に発生する複数の周波数を使って深層学習し、欠陥検出の研究を行った。

今回の研究では、欠陥検出に異常検知を利用した。異常検知は、「データのなかから「ほかと違うもの」を見つけだす技術」や外れ値の検出、変化点検出、異常行動検出を行う技術として認識されている。異常検知では、この「ほかと違うもの」を機械が判定・判断することを目的としているため、操作を行う人による影響はないことがメリットとして考えられる。

異常検出を実現するためには、機械が情報に対して判断・解析を行う必要がある。そこで、人間の脳を模倣した深層学習や統計解析が必要となる。今回は、異常検知として、深層学習の1つであるGANによる異常検知と、統計解析のマハラノビス距離を用いた異常検知について研究を行った。

GANによる異常検知の手法としてAnoGAN (Anomaly Detection with Generative Adversarial Networks)がある。AnoGANは、学習後の損失関数から異常度を求める方法であり、学習に用いたデータを再現することができるかによって異常度が決まり、再現できるものが正常であり再現できないものを異常と判断する。

AnoGANによる異常検知の模式図を図6に示す。異常検知は、図6の下側の「推論工程」で行う。「学習工程」は通常のGANによる学習と同一である。「推論工程」で用いる生成器・識別器は、学習工程と同一のモデルを使用し学習工程における重みを継承する。

テスト画像を生成器・識別器に入力する。生成器では、テスト画像に最も近い画像を生成し、入力画像(テスト画像)とピクセル単位の差分を求める。識別器では、本物の画像と生成された画像の中間層における特徴量を求める。生成器・識別器により算出した差分と特徴量から異常度のスコア計算を行う。

次に、マハラノビス距離による異常検知には、多次元データが中心からどの程度離れているかを示す距離尺度を利用する。変数間の

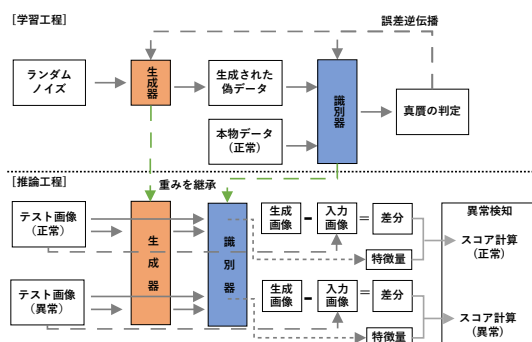


図6 AnoGANによる異常検知の流れ

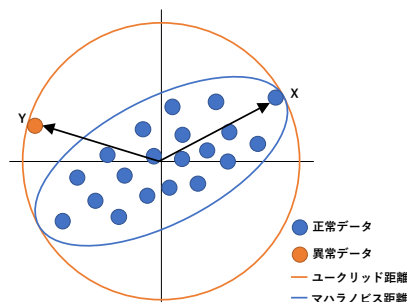


図7 マハラノビス距離とユークリッド距離

相関関係を計算し、データとの関係を明らかにする。距離を示す尺度として有名なものに2点間の直線距離を示すユークリッド距離がある。

マハラノビス距離とユークリッド距離の違いを図7に示す。図7では、橙線がユークリッド距離、青線がマハラノビス距離、青丸が正常データ、橙丸が異常データを示す。図7におけるX(正常データ)とY(異常データ)における原点からのユークリッド距離は中心から一定の距離であるため、異常検知に用いることができないが、マハラノビス距離では、後述する分散・共分散行列により相関関係を考慮した楕円を描くので異常と検知することが可能となる。

今回の研究では、塩水噴霧処理を行っていない供試体を健全管とし、塩水噴霧を行った供試体を劣化管とした。

マハラノビス距離を用いた異常検知は、健全管・劣化管から得られたデータに対しSTFT(short-time Fourier transform)処理した画像から最大ピクセル値に対応する周波数と時間を抽出し、そのデータを2次元配列に格納した後、配列に対してマハラノビス距離を算出する。

パワースペクトルを縦軸、周波数を横軸とした図に、2次元配列とマハラノビス距離をプロットする。実験では、健全管のデータ1,900枚、劣化管のデータ25枚を用意した。画像データを7:3の割合で分割し、学習用データとテスト用データとして使用した。

STFT 画像の最大ピクセル値における周波数と時間から求めるマハラノビス距離は、探触子への入力信号の振幅電圧が 120Vpp、60Vpp では異常検知可能であるが、30Vpp、15Vpp の振幅では異常検知不可能である事が分かった。よって、マハラノビス距離を用いた異常検知は、入力信号波形の振幅が小さくなると、異常が検知できなくなるので、実験装置の小型軽量化には向いてないと判断した。

次に、GAN による異常検知は、健全管の STFT 画像 1,900 枚を学習用データとして用意し、学習後に健全管 25 枚、劣化管 25 枚でテストを行い、異常度を求めた。

学習後のテストにおいて、異常データとして使用した塩水噴霧処理を行なった健全管と横ひび管の STFT 画像を図 8 に示す。

GAN では、損失値を比較することで異常を検出できる。テスト画像と GAN により生成した画像、生成時の損失値を図 9 に示す。図 9 の損失値は、図 6 の AnoGAN の推論工程において求めたスコア計算値である。

損失値の平均は、健全管で 126、健全管（塩水噴霧）で 200、横ひび管（塩水噴霧）で 170 となった。健全管（塩水噴霧）が高い値となった原因として、表面に傷がないことから超音波が伝搬しやすく、コンクリート自体の劣化により異常値として高い値を算出したと考えられる。劣化管の中で横ひび管（塩水噴霧）が損失値 170 であるため、閾値を 150 程度にすることで検知可能であることが分かった。

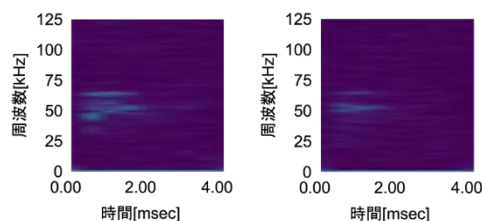


図 8 健全管（塩水）と横ひび管（塩水）の STFT 画像

ラベル	健全	健全 塩水	横ひび 塩水
テスト 画像			
生成 画像			
損失値	126	196	169

図 9 テスト画像と GAN により生成した画像、生成時の損失値

4. 主要な設備備品

- (1) P 波探触子（マルイ）
- (2) バイポーラ電源（NF 回路）
- (3) SWAN21（ジャパンプローブ）

5. 主な発表論文等

【学会発表】（計 5 件）

1. P 波と S 波スペクトログラム画像の深層学習を利用したヒューム管の劣化診断に関する研究, 令和 3 年 3 月 9 日, 令和 3 年電気学会全国大会, 3-046, 大阪大学 豊中キャンパス
2. 深層学習のパラメータ変化によるヒューム管の劣化判定における基礎研究, 令和 3 年 9 月 7 日, 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, F3-6, 愛知工業大学
3. 超音波によるコンクリート内鉄筋の劣化判定に関する研究, 令和 4 年 3 月 21 日, 令和 4 年電気学会全国大会, 1-043, 岡山大学 津島キャンパス
4. コンクリート構造物を対象としたエッジ波の発生と実用に向けた検証, 令和 4 年 8 月 30 日, 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, H5-1, 中部大学(日本音響学会東海支部学生発表奨励賞受賞)
5. 超音波を用いた電柱の劣化判定と異常検知, 令和 5 年 3 月 17 日, 令和 5 年度電気学会全国大会, 3-072, 名古屋大学 東山キャンパス