

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01417

研究課題名（和文）高精度な損傷検知CNNと専門知を融合させる橋梁点検診断のための新しいAI手法

研究課題名（英文）A New AI Method for Bridge Inspection and Diagnosis that Combines CNN with Highly Accurate Damage Detection and Expertises

研究代表者

全 邦 釘（Chun, Pang-jo）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・特任准教授

研究者番号：60605955

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は橋梁点検診断の高精度AI手法の開発を目的としている。橋梁の老朽化が進む中、技術者不足が課題である。CNNを用いた損傷自動検出と、専門知識を結びつけた損傷要因解明や評価を行うAIを目指している。Self-Trainingアプローチとベイズニューラルネットワークを組み合わせたドメイン適応型CNNモデルにより、高精度な損傷検出を実現した。さらに、Image Captioningモデルを開発し、損傷状況を説明する文章を生成手法の構築も実現し、大変高精度な説明文を出力できるようになった。本研究は、橋梁点検診断の自動化と効率化を実現し、今後の維持管理業務の効率化につながるものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、自己訓練アプローチとベイズニューラルネットワークを組み合わせたドメイン適応型CNNモデルを開発し、異なる環境に対応可能な高精度な橋梁損傷検出手法を実現した点にある。これにより、従来の学習データとの乖離を克服し、検出精度を大幅に向上させた。

社会的意義としては、技術者不足の課題に対処しつつ、非技術者にも理解しやすい損傷説明文を生成するImage Captioningモデルを開発した点が挙げられる。これにより、維持管理業務の効率化が図られ、インフラの安全性向上に寄与する。本研究は、橋梁点検診断の自動化と効率化を促進し、将来的なインフラ維持管理の革新に繋が

研究成果の概要（英文）：This research aims to develop a high-precision AI method for bridge inspection and diagnosis. With aging bridges and a shortage of skilled engineers, an AI that uses Convolutional Neural Networks (CNN) to detect damage and integrate expert knowledge is essential. The research developed a domain-adaptive CNN model combining Self-Training approaches with Bayesian Neural Networks, achieving precise damage detection despite varied bridge environments. Additionally, an Image Captioning model was created to generate texts explaining detected damage, making results understandable for both engineers and non-specialists. The study shows significant improvements in detection accuracy and explanation clarity, enhancing decision-making in maintenance. This AI-based approach automates and improves bridge inspection efficiency, addressing engineer shortages and contributing to better infrastructure maintenance.

研究分野：維持管理工学

キーワード：橋梁点検診断 損傷検知 CNN Deep learning 維持管理 Image captioning VQA 画像処理

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、橋梁の老朽化が社会問題となっている。橋梁の損傷状態の把握を目的として定期的に点検・診断が行われているが、その膨大な作業量に対する技術者不足が課題となっている。そこで、橋梁の撮影画像から損傷を自動検出し、そしてその検出結果を専門知と結びつけることで、損傷発生要因の解明や深刻性評価を行える AI の実現が期待されている。

橋梁の損傷はひび割れ、腐食など多岐に渡り、そして CNN(Convolutional Neural Network)モデルによるそれぞれの損傷検出手法の研究は近年活発に国内外で行われている。ただし橋梁は基本的に一品生産で、周辺環境も多様という特徴を持つため、解析対象橋梁の撮影画像の性質が、他の橋梁で蓄積された学習データ画像と乖離していることが、損傷検出 CNN の精度向上のための共通の課題となっている。実務への適用のために、この課題を解決する手法の開発が求められている。また同時に、得られた損傷検出結果を、技術者以外にも理解可能なように言語化する手法についても求められている。

本研究は、橋梁点検診断 AI の実現における重要課題である、多様な環境への対応と言語化を一気通貫させ取り組むものである。また、橋梁全自動点検診断への道筋を拓くものとしても位置づけられ、維持管理サイクルの枠組みを大きく変える。

2. 研究の目的

本研究では、高精度な損傷検出 CNN と専門知を融合させる橋梁点検診断のための新しい AI 手法の構築を目的とし、以下の研究に取り組む。

(1) ドメイン適応型 CNN モデルによる高精度な損傷検出手法の構築

「1. 研究開始当初の背景」で述べたように、橋梁は基本的に一品生産で、周辺環境も多様という特徴を持つため、解析対象橋梁の撮影画像の性質が、他の橋梁で蓄積された学習データ画像と乖離していることが、損傷検出 CNN の精度向上のための共通の課題となっている。つまり、具体的な個々の損傷を検出するための CNN に、画像内の損傷特徴を残しながら、解析対象画像と学習データ画像の性質を揃える「ドメイン適応型 CNN」を開発することを目的とする。これにより、対象橋梁と同一の性質を持たないデータでも効率的に学習に活用できるようになり、ひび割れ検出精度の大幅向上、適用範囲拡大が期待できる。特に本研究では Self-Training approach とベイズニューラルネットワークの組み合わせにより本項目を達成した。

(2) 橋梁の損傷検出結果の言語化手法の開発

インフラの維持管理においては、維持管理方針の策定など様々な段階で人間による意思決定が行われる。損傷検出結果を言語化することができれば、維持管理業務における人間の補助というユースケースを考えた場合に有用である。よって本研究では、橋梁撮影画像を基に損傷状況を判断してそれを説明する文章を生成する Image Captioning モデルの構築を Deep learning ベースで行うことを目的とする。また同時に、言語による質疑応答ができればインタラクティブな理解が可能となるため優れている。本研究では、これを実現する Visual Question Answering (VQA) 手法についての研究についても進める。

3. 研究の方法

(1) ドメイン適応型 CNN モデルによる高精度な損傷検出手法の構築

本研究では、解析対象画像と学習データ画像の性質を揃えるドメイン適応手法として、Self-Training approach を採用する。この手法では、図-1 のようにターゲットデータに対して Pseudo Label を用意しその擬似ラベルを用いた自己訓練を行うことによって識別器を訓練しドメイン適応を行う。ソースデータから学習されターゲットデータに対し擬似ラベルを付与するモデルは Teacher モデル、その擬似ラベルから学習されるモデルは Student モデルと呼ばれる。この自己訓練によって、ターゲットデータについての学習を直接行うことができ、ターゲットへの適応性を高めることができる。

Self-Training のひび割れセグメンテーションでの適用に関しては、Mean Teacher という手法がよく用いられる。Mean Teacher では、同じネットワーク構造を持つ Teacher モデルと Student モデルが用意され、Teacher モデルがラベルなしデータに対して擬似ラベルを付与する。手法の特徴的な点としては Teacher モデルの学習方法であり、Student モデルはタスクの損失関数の勾配降下を介して重みを更新していくのに対し、Teacher モデルは Student モデルの重みの指数移動平均によって重みを更新していく。これにより、Teacher モデルは各時点での Student モデルの平均的な重みを保持することになり、よりロバストな擬似ラベルを生成することができる。

しかし、このような枠組みで Teacher model により導出された結果は、画素ごとに判定結果の

確実性が高い部分と低い部分が存在する。Mean Teacher ではこれらの確実性については評価できない。また、本論文で言えばひび割れのような、検出したい対象が持つべき性質に関する知識を利用して精度を上げるようなことも行われていなかった。例えば暗い画素が細長く繋がってればひび割れである可能性が高い、というような知識の活用は Teacher model による unlabeled data からの擬似ラベル高精度化に寄与すると考えられる。そこで本研究では、ベイズニューラルネットワークによる厳密な不確実性評価手法を組み合わせ、新たな Self-Training フレームワークの提示した。図-2 にベイズニューラルネットワークの概念を組み合わせ、Bayesian DeepLabv3+を提示する。さらにデータ拡充のために画像生成 AI もシステムに導入した。これにより、従来の AI モデル導入にかかっていたコストを大幅に削減することができた。

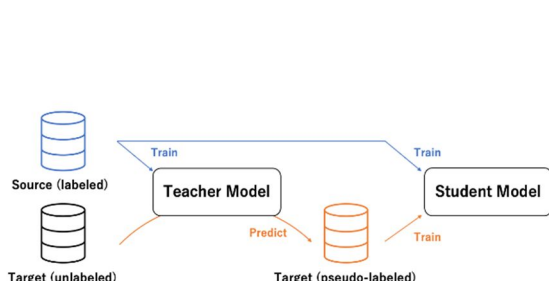


図-1 Self-Training モデルの概念図

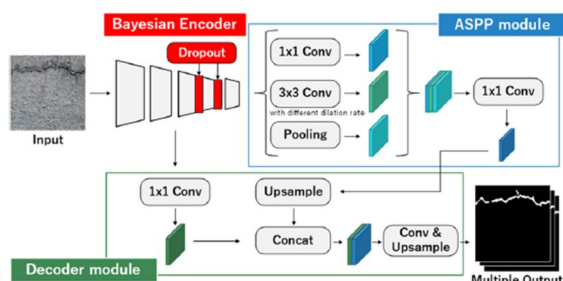


図-2 Bayesian DeepLabv3+の構造

(2) 橋梁の損傷検出結果の言語化手法の開発

本研究では、Image captioning という文章生成技術を活用する。初期の Image Captioning 技術は入力画像から既存の文章を検索するアプローチが採用されていたが、Deep learning を用いることによって、入力画像を認識して新たな文章を生成するアプローチが可能となる。Image Captioning 技術を橋梁に用いたのは世界的に事例がなく、本研究で開発を目指した。構築した文章生成モデルの概要を図-3 に示す。

本モデルは、主に画像を認識するための CNN (Convolutional Neural Network) と、時系列データである文章を取り扱うための LSTM (Long short-term memory) で構成されている。本モデルでは、CNN に画像を入力するとともに、並行して LSTM を組み込んだネットワークにモデル自身が直前に出力した単語を入力する。これら 2 つのネットワークの出力を組み合わせる計算により、最終的な出力が得られる。このようにして、モデルの出力として直前に出力された単語に続く単語が出力される。モデルの CNN には、101 層の層構造を持つ、ResNet-101 を使用した。

入力された単語に対して、学習データに存在する語彙の中から、次に現れる確率が最も高い単語が出力される。最初の 2 単語に着目して図化したものが図-4 である。一文目の 1 つ目の単語として最も出現確率が高い単語 S_{11} を次の入力に用いることで、二単語目以降を生成する。なお、文章の最初の単語の出力時に入力に用いる単語としては、作成した学習データに含まれない単語を開始語として与えることで最初の単語を出力させる。また、ここで 2 番目に確率の高い単語を選択するなどすることで、複数の説明文を生成することができる。

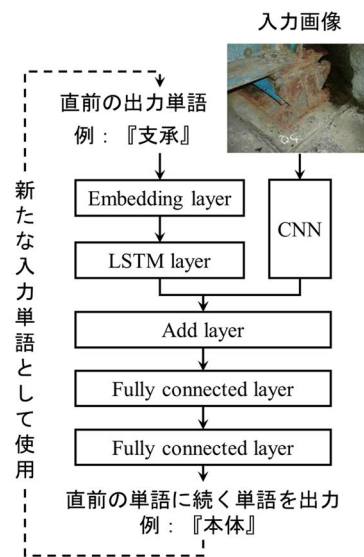


図-3 文章生成モデルの構造

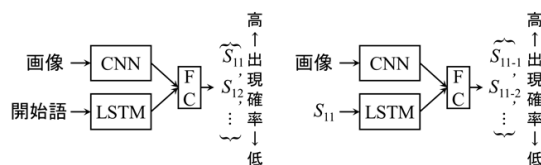


図-4 文章生成方法

4. 研究成果

(1) ドメイン適応型 CNN モデルによる高精度な損傷検出手法の構築

図-5 に、ドメイン適応をした場合としていない場合のひび割れ検出結果の比較を示す。

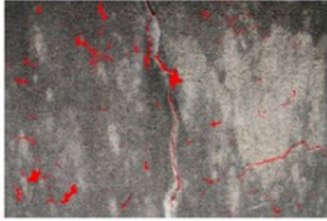
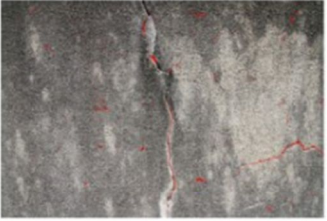
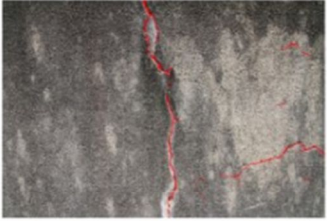
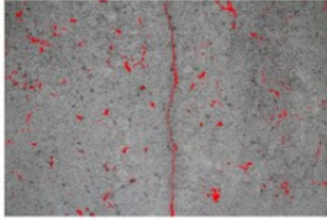
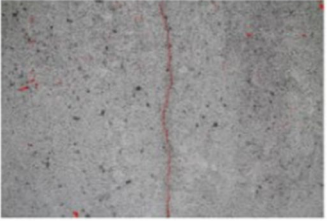
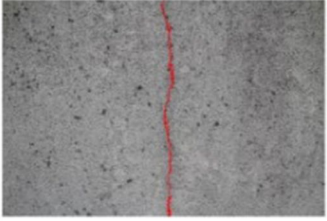
Results without adaptation	Adaptation results	Ground Truth
		
		

図-5 ドメイン適応の有無によるひび割れ検出精度の違い

図より明らかなように、ドメイン適応前は明らかにひび割れでない部分を拾ってしまっているのに対し、ドメイン適応後はそのような誤検出はほぼなくなっている。また、ドメイン適応前後で、例えば F1-Score は 0.58 から 0.65 に上昇するなど、大きな精度向上が実現できた。

(2) 橋梁の損傷検出結果の言語化手法の開発

図-6 に説明文を生成した結果を示す。図-6(b), (c)は主桁と支承部のどちらに生じている腐食であるか曖昧であり、人間でも判断が分かると考えられるが、どちらの部材名称としても出力されている。また、図-10(d)～図-10(f)の画像は、3つの文章が生成された例である。いずれの出力結果についても、正しく文章が生成されている。このような文章を生成することで、例えば経験の浅い技術者や非技術者にも状況がわかりやすく説明ができるようになった。

 <p>主桁において、腐食が発生している。 主桁において、防食機能が劣化している。</p>	 <p>支承本体において、腐食が発生している。 主桁において、腐食が発生している。</p>	 <p>主桁において、腐食が発生している。 支承本体において、腐食が発生している。</p>
 <p>主桁において、腐食が発生している。 床版において、腐食が発生している。 横桁において、腐食が発生している。</p>	 <p>縦壁において、ひび割れが発生している。 縦壁において、漏水および遊離石灰が発生している。 縦壁において、コンクリートが剥離している。</p>	 <p>床版において、コンクリート補強材にうきが発生している。 床版において、うきが発生している。 床版において、コンクリートが剥離している。</p>
(a)	(b)	(c)
(d)	(e)	(f)

図-6 複数説明文生成結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Kubo Shiori, Yamane Tatsuro, Chun Pang-jo	4. 巻 22
2. 論文標題 Study on Accuracy Improvement of Slope Failure Region Detection Using Mask R-CNN with Augmentation Method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 6412 ~ 6412
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s22176412	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yamane Tatsuro, Chun Pang jo, Dang Ji, Honda Riki	4. 巻 -
2. 論文標題 Recording of bridge damage areas by 3D integration of multiple images and reduction of the variability in detected results	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/mice.12971	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yamane Tatsuro, Chun Pang-jo, Honda Riki	4. 巻 -
2. 論文標題 Detecting and localising damage based on image recognition and structure from motion, and reflecting it in a 3D bridge model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Structure and Infrastructure Engineering	6. 最初と最後の頁 1 ~ 13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/15732479.2022.2131845	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 川野輪 壮太, 林 詳悟, 岡谷 貴之, Kang-Jun Liu, 全 邦釘	4. 巻 3
2. 論文標題 自己教師あり学習を用いた熱画像の解析によるコンクリートの浮き・剥離の自動検出	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AI・データサイエンス論文集	6. 最初と最後の頁 47 ~ 55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/jsceiii.3.J2_47	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 設楽 広太、全 邦釘	4. 巻 3
2. 論文標題 画像キャプション技術を活用した橋梁点検用 Web システムの開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AI・データサイエンス論文集	6. 最初と最後の頁 65～75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/jsceiii.3.J2_65	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 阿部 雅人、杉崎 光一、全 邦釘	4. 巻 3
2. 論文標題 インフラマネジメントのためのインフラOSに求められる基本機能に関する考察	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AI・データサイエンス論文集	6. 最初と最後の頁 608～620
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/jsceiii.3.J2_608	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Pang-jo Chun
2. 発表標題 Recent Application of AI & i-Constuction to Infrastructure Maintenance in Japan
3. 学会等名 One Day Workshop on Maintenance of Concrete Structures - Durability Assessment, Repair, New NDT Method Introduction, AI & i-Construction Application in Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 全 邦釘
2. 発表標題 建設分野におけるAI技術の役割と研究動向
3. 学会等名 JTS Tech Conference 2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 全 邦釘
2. 発表標題 AIとi-Constructionが切り拓く社会インフラの未来およびMoonshotプロジェクトの展望
3. 学会等名 第686回建設技術講習会（Society5.0に向けた公共事業における新技術の活用）（招待講演）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	宮本 崇 (Miyamoto Takashi) (30637989)	山梨大学・大学院総合研究部・准教授 (13501)	
研究分担者	浅本 晋吾 (Asamoto Shingo) (50436333)	埼玉大学・理工学研究科・准教授 (12401)	
研究分担者	党 紀 (Dang Ji) (60623535)	埼玉大学・理工学研究科・准教授 (12401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------