

論文の内容の要旨

論文題目

Deep Sensing Approach to Media-Fusion

Analysis for Modeling Bridge Dynamics

(橋梁の動態モデル構築のための深層計測による媒体統合解析)

氏名 川勝 孝也

現代、計算機の最も主要な用途は、意思決定である。意思決定とは、観測系から得たデータを解析して情勢を把握し、その情勢を制御するために命令を発して、駆動系を管制する。このような意思決定系は、その適用範囲を独自の閉じた系に限定することによって、航空、金融、ロボット工学において実用に供されてきた。今日では、小型な計測機材やインターネット、小型で強力な計算機が普及し、従前の計算機システムはその概念やあり方を変容させている。Internet of Things (IoT)とCyber Physical System (CPS)はそのような例である。将来的には、現実世界から収集された多様なセンサデータを処理する人工知能により、高度に自動化された社会が実現するとも考えられる。しかし、現実の意思決定は、多くの専門家の存在、彼らの努力と経験に基づく諮問を経るものであり、また専門家の知見は必ずしも言語化が容易ではないという大きな課題がある。CPSを構築するには、言語やルールベースに依存することなく、専門性の高い知識を体系化する汎用的な仕組みを作る必要がある。

人工ニューラルネットワークは、しばしば機械学習の様々なタスクにおける優れた性能と汎用性によって社会の耳目を集めてきたが、その根源的な優位性は、意思決定の現場から経験則を排除することにある。現状、ニューラルネットワークの適用範囲は物体検知や分類、回帰などの簡単な問題に限定されているが、分野によっては既に専門家の仕事をある程度まで肩代わりすることができる。この状況に鑑み、著者を含む国立情報学研究所の研究グループは、深層ニューラルネットワークを活用して、社会を維持するという課題、特に道路橋の安全性を評価する方法を模索する仕事に3年以上取り組んできた。我々が仕事を開始した頃、その最大の障害は、実橋梁で計測を行う際の手段と目的の逆転だった。本来、センサ網は、その用途を慎重に検討して設置を計画する必要がある。しかし、我々の最初の仕事は、実際の橋から長期に亘り収集されたセンサデータの有望そうな用途を発掘する作業であった。この研究計画には、高度に自動化された社会基盤の健全性監視基盤を構築するという大戦略は存在したが、それを実現する具体的な計画が皆無であった。本研究の主題である深層計測の概念は、現実のデータマイニン

グが陥りがちな、何を目的として計測を行うかという問題を解消しうる技術として見出され、我々の研究を前進させた。

深層計測とは、データマイニング技術を駆使して、観測データが秘める潜在的情報の豊かさを活用する取り組みである。実橋梁において本論文が実証するように、構造物の些細な振動波形であっても、その上を通過する車両に関して、豊富な情報を含んでいる可能性がある。深層計測の努力は、橋梁に設置されたセンサが果たす役割を拡大させ、2つの恩恵を齎す。まず、特定の目的に特化したセンサを開発する際に、汎用性が高く、小型で安価なセンサをその用途に最適化することができる。次に、同じセンサを複数の目的に供用し、必要なセンサの総数を減らすことで、計測現場に配置する観測系の全体を単純化することができる。従来型のセンサ統合では、多数のセンサを正確に同期する必要があるために信頼性が低く、頻繁な点検と修理が必要になる。この点で、深層計測とセンサ統合は対照的な概念である。

我々は、深層計測の概念を応用することで、橋梁で観測される何らかの異常を検知するための2通りの方法論を開発した。第1に、橋梁に設置された監視カメラやひずみセンサを含む異種のセンサから各個に特徴量を抽出し、共通の特徴空間で直接比較する仕組みを開発した。第2に、橋の力学的モデルを構築し、複数のセンサからの特徴量を統合することで、車両通過時に特定の部材で観測されるであろう応答を予測する技術を開発した。また、これらの目的のために、私たちはスパイラル学習と媒体統合型敵対的ニューラルネットワークという2つの技術を開発した。

本稿第4章では、橋梁での深層計測モデルの訓練に供する正解データを収集するための映像解析を解説する。ここで紹介する交通監視システム(TSS)は、もともと橋梁の固有振動の解析の前処理として通過車両を検知することを目的に提案したものである。このため、固有振動を解析するための枠組みも併せて解説する。損傷した橋梁では、振動特性が変化することが知られている。振動応答を分析するには、車両の通過直後の振動波系を収集する必要がある。正確な特性を得るためには、1台の重い車両の通過に起因する振動だけを選択的に抽出する必要がある。そのため、監視カメラを活用するTSSを開発した。TSSは、畳込みニューラルネットワーク(CNN)に基づく物体検知器と移動体検知器を組み合わせることで監視カメラ映像から車両を検知し、橋梁の固有振動数及び減衰定数を自動的に推定する。推定した量は、橋梁の損傷を特徴付ける量として活用しうる。

第5章では、橋を渡る車両の軸重を計測する課題に対し、深層計測を応用する。ここでは、**Bridge Weigh-In-Motion (BWIM)**のシステムを紹介する。BWIMは、橋上の交通を制限することなく過積載車を検知する既存技術である。また、橋梁の構造上の健全性を見積もる上でも有用と考えられている。軸重の正確な計測を達成するには、車両の速度・軌跡・車軸の位置などの諸元を事前の情報として取得する必要がある。従来、これらの諸元は、橋上に設置された複数の付加的なセンサを利用して、映像解析や橋上の

2点でのピーク信号検知などの方法で、獲得されていた。これには相応の計算資源やセンサ間の高度な同期が必要であり、BWIM システムが複雑化するので、頻繁な故障を招く可能性がある。そこで、第5章では、深層ニューラルネットワークを活用することで、複数のセンサを必要としない BWIM システムを提案する。提案手法では、まず、1箇所のひずみセンサにより観測された橋のひずみ応答から特徴量を抽出し、車両の諸元を推定する。その後、同じひずみ応答を参照して軸重推定が実行される。車両の検知と諸元推定のためのニューラルネットワークのパラメータは、監視カメラ映像を通じて得られた正解データにより自動的に最適化される。この段階ではカメラが必要だが、ひとたび最適化が終われば、カメラは不要となる。この提案は、低価格で小規模な単一センサ型 BWIM の実現への道を開拓する。

第6章では、異常検知の技術に基づき橋梁の損傷を検知する仕組みを提案する。車両が橋梁を通過すると、橋はその負荷に応じて歪むが、橋梁が何らかの損傷を負った場合、応答特性が損傷以前と比べて変化する可能性がある。このような異常なひずみ応答の検知は、監視カメラとひずみセンサから得た観測に基づく。監視カメラ映像は、通過車両の諸元情報を橋梁の応答モデルの説明変数として扱うために活用される。映像とひずみ応答のデータは共通の特徴空間に写像され、その空間内での直接の比較が可能になる。この空間は、専用の深層畳込みニューラルネットワークに対し、我々が提案するスパイラル学習を適用することで獲得される。獲得した特徴空間で映像とひずみ応答とのユークリッド距離を計算し、これをひずみ応答の異常性を表す指標とする。また、気象条件による影響を映像特徴量から除去するための付加的な教師なし学習の仕組みも提案する。実際に橋にカメラとセンサを設置しての実験を通じ、我々は異常なひずみ応答の検知に成功し、それらはケーススタディの結果、3種類の事例に分類できた。実験結果は、必ずしも橋梁の損傷に結びつくものではなく、その点では成果を上げてはいないが、橋梁のひずみ応答解析における有効性を示唆している。

第7章では、第6章よりも進歩した異常検知技術を解説する。この方法では、橋梁の力学的特性を模倣し、通過車両に対する橋梁部材の異常なひずみ応答を検知することで橋梁の異常を見出す。現状、橋の力学的シミュレーションには、橋梁の模型の精緻な作り込みに加えて、機械、材料、構造に関する専門知識が不可欠である。更に、橋梁に加えられる外力の詳細な情報、例えば車速、軌跡、軸重などが必要である。第6章では、全くデータ駆動的な方法論により橋の力学的モデルを獲得するための、新たな媒体統合の仕組みを導入する。ここで提案する生成モデルは、橋上の監視カメラ映像とひずみセンサを参照することで、実際のひずみ応答を成功裏に模倣した。この生成モデルは、媒体統合分析のために開発された専用の敵対的学習アルゴリズムにより訓練できる。特筆すべき点として、異常なひずみ応答は、第6章で提案したような異常度を直に示すスカラー量によってではなく、物理量を根拠として検知できる。異常検知の判断の明快さという観点で、この手法は第6章よりも優れている。

以上の3通りの実証研究は、この論文の終わりに第8章で総括される。本論文は、主にデータマイニングの方法論に焦点を当てるものであるが、その貢献は情報学のみならず土木工学の研究分野にも及ぶ。その結果、この論文を構成する研究のひとつは、構造物の健全性監視を主題とする学術的な会議で発表されている。我々の仕事は、橋梁や建物などの社会基盤の保守のための自律的なシステムの広範囲な実現に貢献すると考える。