

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04230

研究課題名（和文）FEM解析と高密度点群モデルの融合による実構造物の構造性能評価

研究課題名（英文）Structural performance evaluation of real civil infrastructure by merging dense point cloud data into FE analysis

研究代表者

宮森 保紀（Miyamori, Yasunori）

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：00363383

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）： 構造物の維持管理に活用可能な3次元データであるSfM(Structure from Motion)によって取得した点群データから、部材の変位や応力分布を確認できる有限要素モデルを構築する手法を開発した。具体的には、点群モデルの座標データをボックスセル単位で節点とした。さらに、点群データを部材軸方向の一定間隔で2次元断面形状に変換し、各断面に2次元デローニー分割を行い、隣接断面と最近傍点を繋ぎ合わせることでソリッド要素を作成した。この手法で構築された点群FEモデルによって局部的に板厚が減少している部材の線形静的解析を行うことができ、既存構造物の応力状態を定量的に把握できる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、構造物の維持管理に3次元データが活用されている。SfM(Structure from Motion)は通常のデジタルカメラで撮影した静止画や動画から3次元点群データを構築することができて、経済性や汎用性に優れている。一方、現状では点群データは構造物の外面の変状を確認し、健全性を定性的に評価することが主な用途である。本研究は、構造物の維持管理をさらに効率化するため、点群データから構造解析可能な数値モデルを作成して、健全性を定量的に把握する方法であり、表面的には劣化が進行していても、実際の保有耐力を適切に評価し、構造物の長寿命化につながる技術で、有用性があり社会的意義を有する。

研究成果の概要（英文）： We developed a method to construct a finite element model that can calculate the displacement and stress distribution of a structural member from point cloud data acquired by SfM (Structure from Motion), which is 3D data that can be used to manage civil infrastructures. The coordinate data of the point cloud model is used as nodal points in units of a voxel. The point cloud data was converted into 2D cross sections at regular intervals in the axial direction of the member, each section was divided into 2D Delaunay sections, and solid elements were created by connecting adjacent sections and nearest neighbor points. The point cloud FE model constructed with this method enables linear static analysis of structures with locally reduced thickness and shows the possibility of quantitatively understanding the stress state of existing structures.

研究分野：土木工学，構造工学

キーワード：点群データ SfM 構造解析 FEM

### 1. 研究開始当初の背景

1995年の阪神淡路大震災以降、橋梁の構造解析技術は有限要素法 ( Finite Element Method ) を中心として急速に発展し、いまや FEM ソフトウェアを用いて橋梁の構造設計を行うことは当然となった。2012年の笹子トンネル天井板崩落事故は、インフラ点検における ICT の導入を促し、ロボット技術や画像処理技術の実務への応用も急速に進んでいる。具体的には撮影した多数の画像を 2 次元オルソフォト画像に再構成したり、SfM (Structure from Motion) 技術により 3 次元点群モデルに変換したりして、部材表面のひび割れなど変状の点検を画像解析技術によって、コンピュータ上で行おうとするものである。設計における FEM モデルと、点検における点群モデルは、コンピュータ上の 3 次元モデルとしては同じように見えるかもしれないが、両者は本質的に異なる。FEM モデルは、あらかじめ与えられた材料の構成則と形状の情報から、構造の力と変形の関係を可視化するものである。一方、点群モデルは写真測量の原理を応用し、撮影した実構造物の表面に分布する特徴点の 3 次元座標を推定するものである。すなわち、FEM モデルでは、損傷などが発生した実構造物を評価することはできず、点群モデルは構造物内部の情報をそもそも持たない。このように、2000 年代の数値計算技術の進歩、2010 年代の画像処理技術の発展により、情報技術は土木工学の実務の各段階で一般に用いられるようになったが、構造物の計画、設計、維持管理のライフサイクルに一貫して適用可能な数値モデルは未だ確立していないため、世代と対象の異なる情報処理技術を構造工学分野で融合させることが求められる。

### 2. 研究の目的

本研究では鋼構造物を対象として、図-1 のように設計図書などにに基づき構築された FEM モデルに、供用中の実構造物の損傷部分を撮影して得られた点群モデルを融合させ、損傷を受けた実構造物の FEM モデルを構築し、実構造物の性能評価が高精度に可能な方法を創出する。

実務上のニーズを検討すると、既存橋梁の自然災害による被災や、経年劣化による変状が生じた場合に、通行止めの可否、対応の緊急性などの判断が求められる。このような時に損傷を実測して FEM モデルを構築する余裕はなく、現状では構造力学の梁として計算し判断を行っていることが多い。今後の老朽化の進展や維持管理費の不足を考慮すれば、より精度の高い判断により最小限の対応を可能にする枠組みが求められる。一方、画像撮影技術の構造点検への適用は、大量の撮影画像を 2 次元オルソ画像に展開して従来の点検調書をデジタル化しただけで、現状の構造解析技術や技術者の判断を本質的に変革するものではない。撮影画像から SfM によって 3 次元高密度点群モデルを構築する技術はおおむね確立しつつあるが、これによって構造解析ができるわけではない。そこで、本研究では、損傷を受けた構造物の保有性能を評価するため、損傷部分の撮影画像から高密度点群モデルを構築し損傷部分の節点座標を得る。この損傷部分の節点座標から応力状態を評価可能な FEM モデルを構築する。

### 3. 研究の方法

これまでに室内や屋外で照明・撮影姿勢を適切に設定できる環境で、1mm 以下の精度で鋼構造部材の 3 次元点群モデルを構築することができるようになった。この先行研究により、写真撮影とモデル化のノウハウが蓄積された。本研究では、実橋梁における撮影角度や被写体の照度に制約があるため、具体的な撮影方法を検討する。

次に、複数の交差する部材を有する実橋梁に対して、自動的に点群を FEM モデルに変換できるプログラムを構築する。FEM 解析自体は、実務でも十分に実績のある汎用 FEM プログラムを用いることで、高度な解析機能を活用するとともに、研究終了後の実務への展開を容易にするよう工夫する。具体的には以下の手順で FEM モデルを構築する。

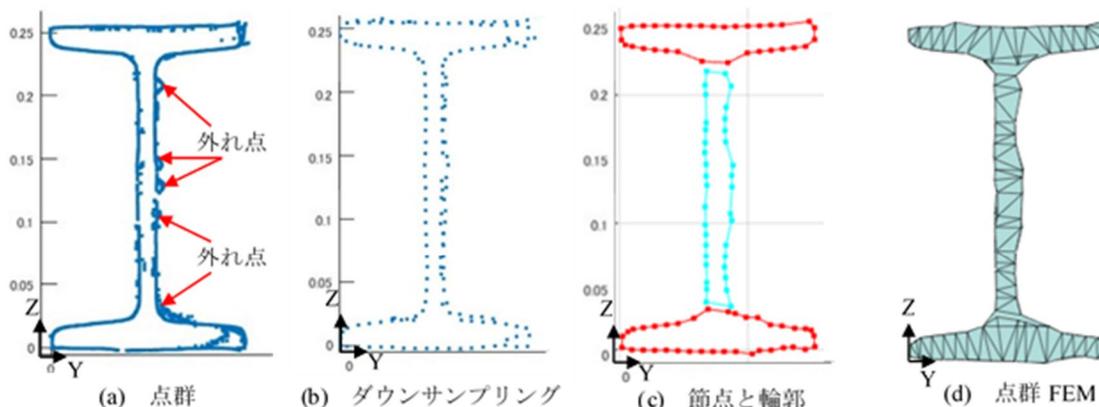


図-1 断面の形状(G2桁中央, X=1,215mm)

- A) ボックスセルダウンサンプリングによって点群(図-1(a))から節点を作成する(図-1(b))。
- B) 構造全体にセグメンテーションを行い、材片に分割する。
- C) 材片ごとに部材軸で等間隔に断面を設定し、断面と断面輪郭を作成する(図-1(c))。
- D) 断面輪郭に対して2次元デローニー分割を適用する(図-1(d))。
- E) ソリッド要素を作成する。
- F) 材片を連結する。
- G) 節点と要素を構造解析ソフトに対応するファイルに出力する。
- H) FEMソフトウェアでファイルを読み込み、荷重条件と境界条件を与える。

実証試験として、損傷を与えた実橋梁に本研究の手法を適用する。また、構造物全体はこれまでと同様の方法でFEMモデルを構築し、損傷部分だけ点群モデルの座標値を組み込む手法について手法を検討する。

#### 4. 研究成果

本研究で開発した手法を用い、図-2のような実際に鉄道橋として使われていた鋼2主桁橋に損傷を与え、点群FEMモデルで鋼構造の部分的な腐食による構造健全性を定量的に評価する可能性を検討した。

点群取得方法としては多数の静止画像から点群モデルを構築するSfMに加え、地上設置型レーザースキャナによる点群取得も行った。両者の比較では、点群モデル構築に要する時間は、レーザースキャナの方が短かったが、ノイズの性状が両社で異なり、点群モデルの寸法精度は現状ではSfMの方が良好な結果となった。

上述した手法に基づいて構築した点群FEMモデルでは、図-3のように点群の外れ点の影響を受け隅角部にリップ状の要素が生成されるが、損傷の形状と板厚を概ね再現できた。点群FEMモデルと比較するため、実寸からなるFEMモデルも構築し、線形静的解析を行った。また、橋桁に鋼板を載荷した静的載荷試験も行った。その結果、点群FEMと従来型FEMの比較では、図-4のように応力の分布が求められ、従来の方法で構築したFEMモデルとも応力の分布性情や値が整合し、定量的に構造の健全性を把握できる結果が得られた。

また、構造全体を従来の方法でモデル化し、損傷部分の点群だけを全体モデルに組み込む方法について、点群のインポート機能が簡便に実行できるソフトウェアを用いて実現可能であることを確認した。



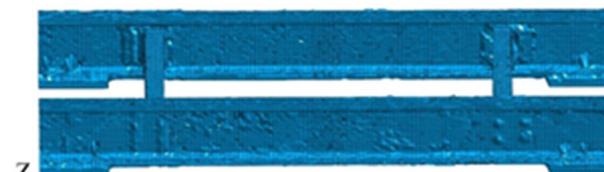
a) 全体



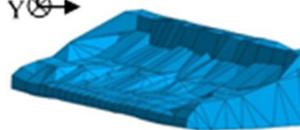
b) 損傷部(外側)

c) 損傷部(内側)

図-2 対象橋梁



a) 全体



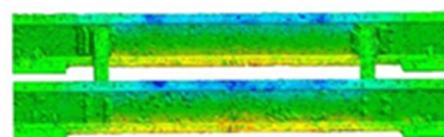
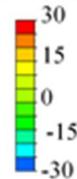
b) 損傷部(外側)



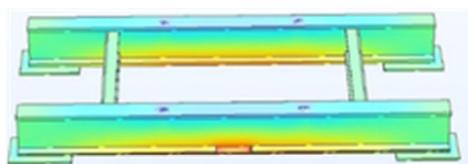
c) 損傷部(内側)

図-3 点群FEMモデル

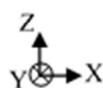
Solid Strs Normal, N/mm



a) 点群 FEM モデル

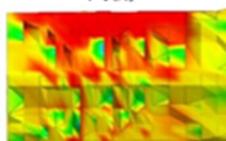


b) FEM モデル



内側

内側



外側



外側

c) 点群 FEM モデル(損傷部)

d) FEM モデル(損傷部)

図-4 軸方向応力(鋼板 10 枚)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 吉田 明燁、宮森 保紀、門田 峰典、齊藤 剛彦	4. 巻 70A
2. 論文標題 実構造の点群FEMモデルの構築と静的載荷実験による妥当性の検討	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 構造工学論文集 A	6. 最初と最後の頁 414 ~ 427
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/structcivil.70A.414	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 門田峰典, 宮森保紀	4. 巻 2巻, J2号
2. 論文標題 構造物の維持管理における点群処理技術に関する技術動向と今後の課題	5. 発行年 2021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 pp. 333-340
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/jsceiii.2.J2_333	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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小室翔、吉田明燁、宮森保紀、門田峰典、齊藤剛彦
2. 発表標題 小規模鋼橋における3次元点群データ取得方法の検討
3. 学会等名 令和5年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 吉田明燁、宮森保紀、齊藤剛彦、門田峰典、小室翔
2. 発表標題 損傷を受けた鋼桁の載荷実験および点群 FEMモデルによる応力解析
3. 学会等名 令和5年度土木学会北海道支部年次技術研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 吉田明燐、宮森保紀、齊藤剛彦、門田峰典
2. 発表標題 2主桁供試体の点群 FEMモデル構築アルゴリズムの開発
3. 学会等名 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉田明燐、宮森保紀、齊藤剛彦
2. 発表標題 鋼構造物の点群モデルからFEMモデルを構築するための要素生成方法の改良に関する検討
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田明燐、宮森保紀、齊藤剛彦、門田峰典
2. 発表標題 交差する部材を有する桁供試体の点群データからFEMデータへの変換に関する検討
3. 学会等名 土木学会北海道支部令和4年度年次技術研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉田明燐、宮森保紀、齊藤剛彦
2. 発表標題 鋼部材の点群データからFEMデータへの変換における部材隅角部の要素生成に関する検討
3. 学会等名 第47回土木情報学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮森保紀, 齊藤剛彦, 山崎智之, 佐藤瑛典, 吉田明燐
2. 発表標題 鋼桁供試体の3次元高密度点群モデルからFEMモデルへの自動変換手法の改良
3. 学会等名 第46回土木情報学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田明燐, 宮森保紀, 齊藤剛彦
2. 発表標題 立体的な構造物の3次元点群モデルを構築するための撮影手法に関する基礎的検討
3. 学会等名 土木学会北海道支部令和3年度年次技術研究発表会
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

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