

構造物の三次元デジタル写真計測とそれを用いた三次元有限要素自由振動解析

3-D digital photogrammetric measurement of the structure and 3-D finite element free vibration analysis

松田浩*, 本郷真樹**, 鶴田聡**, 山下務***, 黄美****, 西村正三*****, 出水亨*****

Hiroshi MATSUDA, Masaki HONGO, Satoshi TSURUTA, Tsutomu YAMASHITA,
Mei HUANG, Shouzo NISHIMURA and Akira DEMIZU

*工博 長崎大学教授 工学部構造工学科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

**長崎大学大学院 生産科学研究科環境システム工学専攻 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

*** 長崎大学工学部技術職員 工学部構造工学科 (〒582-8521 長崎市文教町 1-14)

****博士 (工学) 長崎大学助手 工学部構造工学科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

*****工修 (株)計測リサーチコンサルタント クリエイティブ事業部 (〒732-0029 広島市東区福田 1 丁目 665-1)

*****工修 (株)計測リサーチコンサルタント 九州事業部 (〒812-0007 福岡市博多区東比恵 2-2-25 SK ビル)

Different from Point by Point measurement technique, 3-D photogrammetry technique enables to monitor the shape and dimension measured-objects in non-contact, remotely and globally. In order to provide a rational maintenance strategy, it is important to assess current structural properties of existing structures due to long-term structural degradation, static and dynamic loads. In this paper, the applications of 3-D photogrammetry in capturing 3-D spatial coordinate of shape-complicated existing historical structures such as the Nagasaki Peace Praying Statue etc. are reported. Then, captured spatial data were converted into surface data and solid data to perform 3-D finite elements for dynamic structural analyses. The structural strengthening efficiency was verified through free vibration characteristics evaluation.

Keywords: 3-D photogrammetry, FE mesh generation, 3-D free vibration analysis, existing historical structures

キーワード: 三次元写真計測, FE メッシュ作成, 自由振動解析, 歴史的構造物

1. はじめに

近年, マスコミ等で世界遺産に関する話題が頻繁に報道される中, 農・林・鉱・工・商業などの産業遺産も干拓, 運河, 鉄道, 橋梁などの土木・建設技術遺産もユネスコ世界遺産の産業・技術関連遺産として注目されるようになり, それらの保存と活用についての調査研究が行われるようになった¹⁾. このような産業・技術関連遺産を保存し活用していくためには, 現況を調査し, 安全性を診断する必要があるが, 適確な調査法や試験法・診断法は確立されていないのが現状であり, また, 近年頻発している大規模地震に対する耐震性能を評価すると, 補修・補強を講じなければならない場合がほとんどである.

筆者らは, ここ数年来, 三次元形状計測データを直接 FE (finite element) 解析に取り込み, 構造物の構造特性を把握するための研究を行っている. まず, レーザ光を用いた三次元画像計測システム²⁾³⁾を開発するとともに,

大規模構造物に対するカメラ校正法の開発⁴⁾を行ってきた. この三次元画像計測装置を改良して, より簡便に取扱える装置を製作し⁵⁾, コンクリートの表面計測, コンクリート打継部の表面粗度と付着力の関係, 曲面板の振動解析, 膜構造のリンクル解析などに応用してきた^{6)~8)}. また, 曲面板の振動解析においては, 振動実験により得られる固有振動数とホログラフィ干渉計による振動モードとを比較することにより, 三次元形状計測データを用いて FE 解析結果の有効性を明らかにするとともに, 切欠きや円孔を有するアルミニウム合金板に対する非破壊検査への適用可能性についても確認してきた⁹⁾¹⁰⁾.

一方, 実構造物を対象とした三次元計測器として長距離型レーザスキャナが開発され, 簡便にかつ短時間で計測することができるようになった. 筆者らも長距離型レーザスキャナを用いて, 長崎平和祈念像の三次元計測を実施し, 曲面板の場合と同様な手法で固有振動解析を実施した^{11) 12)}. その結果, レーザスキャナによる計測は簡

便にかつ短時間で行うことができること、また、これまでFEモデル化には膨大な時間と労力が必要であったが、三次元計測データから直接FEメッシュを作成する手法を用いることにより構造物のFEモデル化が簡易化されることなどを確認した。しかし、レーザスキャナ計測システムはハードとソフトを合わせると極めて高価なため、多くの構造物の三次元形状を計測するには、たとえレンタルで使用したとしても高額な経費が必要となる。一方では、最近特に高密度化したデジタルカメラの普及とパーソナルコンピュータの高速化・低価格化により、写真計測が身近なものになってきた。

以上に鑑み、本論文では、安価な市販のデジタルカメラと三次元写真計測システムを用いた三次元計測手法により三次元デジタルデータを取得し、そのデータをもとにFEモデルを作成し、構造物の固有振動数を取得する手法を提示し、同様の操作でレーザスキャナにより得られた解析結果とほとんど一致することを示す。また、解析で得られる固有振動特性により構造物の補強の有効性を確認する方法について述べる。最後に、長崎市山王神社の片足鳥居を計測するとともに、充実構造物のメッシュ分割法について報告する。

2. 三次元形状計測法

2.1 概要

産業や学術のあらゆる分野において、三次元形状の計測技術が求められている。三次元計測法には接触式と非接触方式があり、図-1はその分類を示したものである¹³⁾。光を用いた計測法は、非破壊・非接触・高速など、多くの利点を有している。

本研究で用いたデジタルカメラによる三次元写真計測システムは、受動的計測法のステレオ法を基本原理とするものであり、デジタルカメラから取り入れた2枚以上の画像データをもとに、さまざまな対象物を三次元デジタル化できる¹³⁾。一方、三次元レーザスキャナは計測対象物とセンサ間をレーザパルスが往復する時間を計測することで距離を計測し、同時にレーザビームを照査した方向を計測することで角度を算出し計測対象点の三次元位置情報を取得するものである。

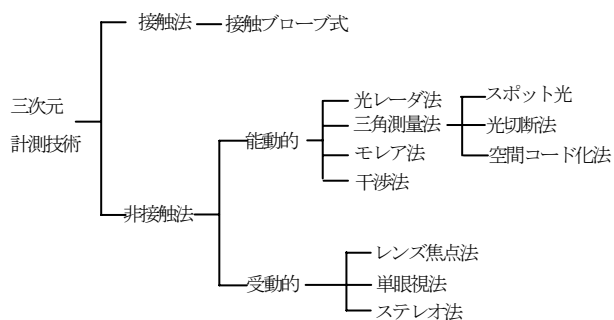


図-1 三次元計測技術の分類

2.2 三次元写真計測

三次元写真計測システムは、計測専用カメラが不要、計測点不要、ユーザーフレンドリー、ビジュアル化、などの特徴を有している。三次元写真計測からFEモデル作成までのフローは、①写真撮影、②同一点（対応点）の決定、③スケール等の設定、④点群の配置、対応、⑤三次元データの出力、⑥FEモデル作成、の手順で行うことができる。なお、計測範囲は写真撮影において画像内に写っている部分である。構造物が撮影範囲を超えるような場合には、撮影位置や方向を変えて計測を行い、それぞれの画像をつなぎ合わせるにより構造物全体のモデルを作成することが可能となる。

2.3 レンズひずみ補正

通常、市販されているデジタルカメラにはレンズひずみが存在する。そのため図-2のように画像の周辺および外側になるほどそのひずみが顕著に現れる。そこで、レンズひずみ補正用紙を用いてカメラのレンズひずみ補正を行い、カメラパラメータとして計算に取り入れることによって計測精度を向上させた。

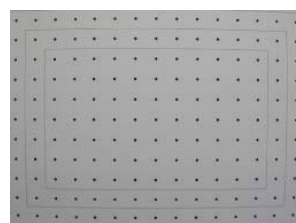


図-2 レンズひずみ

2.4 計測データ処理

形状計測によって得られるデータは点群のデータである。必要に応じてコンピュータで処理を行うことにより、下記のように各種の三次元幾何モデルへと変換できる。以下に本研究で用いるモデルの種類と特徴を示す¹³⁾。

(1) 点群モデル

形状計測を行い、直接得られるモデルである(図-3(a))。データ構造としては、一定間隔で切り出した二次元的配列を(x,y,z)座標データとして表現される。

(2) ワイヤフレームモデル

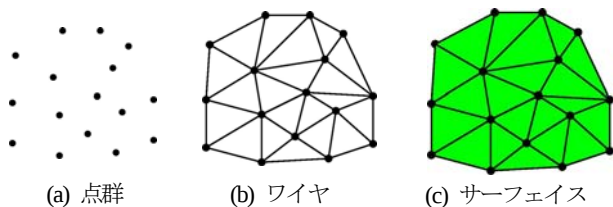
近接する三点の三次元データを二次元平面に写像し、それらの点を直線で結んで表示される(図-3(b))。

(3) サーフェイスモデル

物体を面の集合体として表現するモデルである(図-3(c))。面とその境界を形成する線や点の情報の集合である。本論文におけるサーフェイスモデルは3節点で構成される。

(4) ソリッドモデル

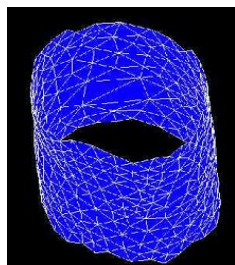
物体の表面(サーフェイス)データのみならず、充実の円筒や直方体など、基本的な立体要素の集合体で表現するモデルである(図-3(d))。充実断面のFEモデルを作成する場合には構造形式、材料に応じて、サーフェイスモ



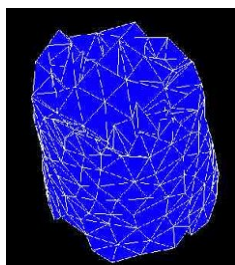
(a) 点群

(b) ワイヤ

(c) サーフェイス



サーフェイスモデル



ソリッドモデル

(d) ソリッドモデル作成手順

図-3 三次元幾何モデル

デルをソリッドモデルへ変換する必要がある。

図-3(d)にソリッドモデルへの変換手順を示す。変換手順としては、サーフェイスモデル内に自動メッシュ分割を用いて、テトラ要素(四面体要素)を適用することによってソリッドモデルを作成する。

2.5 FE メッシュ作成

三次元形状計測を行い、得られた点群モデルをサーフェイスモデルへと変換する。作成されたサーフェイスモデルを STL(Stereo Lithography)ファイルへ変換し、プリポストプロセッサへ入力することにより FE モデルを作成する。STL ファイルのファイル構造としては、三角形要素における各頂点の三次元座標 (x,y,z) と、それらの点を二次元平面に写像することで形成される平面に対する、法線ベクトルの情報を有している。STL ファイルの概略を図-4に示す。

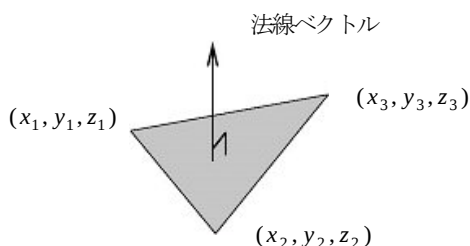


図-4 STL ファイル

3. 三次元写真計測法の有効性の検討

3.1 曲面板の固有振動解析

図-5 および表-1 に示す曲がりかつねじれた曲面板を用いて三次元写真計測の計測精度および固有振動解析に対する解析精度の照査を行った。まず、曲面板の三次元形状計測を行い、図-5 に示す a, b および c の 3 箇所の寸法を計測し、実測値との比較を行った。その結果、

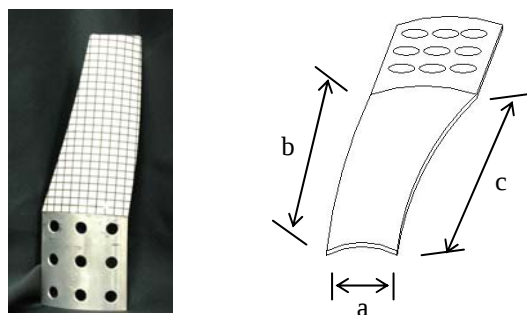


図-5 曲面板 (板厚: 1mm)

表-1 材料特性値

弾性係数	ポアソン比	密度
71GPa	0.33	2.7g/cm ²

表-2 寸法比較

	a	b	c
実測値 (mm)	43.8 (1.00)	155.5 (1.00)	155.5 (1.00)
計測値 (mm)	43.7 (0.99)	155.3 (0.99)	155.5 (1.00)

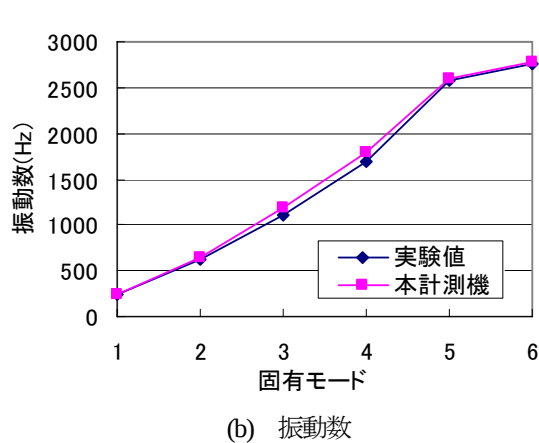
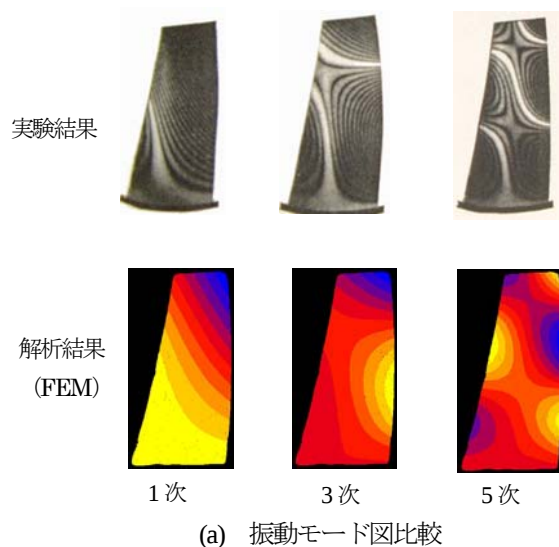


図-6 試験結果

表－2に示すように3箇所すべてにおいて、高い計測精度で計測が行われていることが確認できる。

また、計測データよりFEモデルを作成し、汎用FEMソフトを用いて固有振動解析を行った。FEモデルには3節点シェル要素を用いた。さらに、同じ試験片を用いて振動実験により固有振動数と、ホログラフィ干渉法により固有振動モードの計測を行った。その結果、各モードにおける固有振動数、振動モードはよく一致していることが確認できる（図－6）。

以上より、三次元写真計測は高精度の形状計測が行え、三次元形状計測結果より作成したFEモデルは、固有振動解析において高い解析精度を有していることが確認できる。このことより、形状計測からFEモデル作成、固有振動解析という一連のシステムの有用性を確認することができた。

3.2 平和祈念像の固有振動解析

（1）三次元レーザスキャナ計測

三次元レーザスキャナを用いて、平和祈念像の形状計測を行った。三次元レーザスキャナでは、計測位置から見えている部分しか計測できない。そのため、全体の三次元形状データを取得するために、8方向から計測を行い、それらをつなぎ合わせることで、全体の三次元形状データを取得した（図－7）。計測風景を図－8に示す。三次元レーザスキャナ計測は簡便にかつ短時間で計測が行うことができるが、やや専門的な操作とバッテリーなどの電源も必要である。表－3には計測に用いたレーザスキャナの性能を示す。

三次元レーザスキャナによって計測されるデータは点群のデータである。そこで、点群同士をつなぎワイヤフレームデータの作成を行った。そして、形成された三角メッシュに面を張ることでサーフェイスデータの作成を行った（図－9）。

（2）三次元写真計測

写真計測もレーザスキャナと同様に、計測位置より見えてない箇所の計測はできない。そのため図－7に示す4方向（計測点1～4）から計測し、各方向それぞれ、わずかにずらした2枚の画像をもとに点群データを計測した（図－10）。デジタル画像の撮影には6.1メガ画素のデジタルカメラを用い、カメラの焦点距離を一定にするため、ズームをwide端に固定し撮影した。また、写真計測においても三次元レーザスキャナと同様に、それぞれの計測箇所において計測した結果をつなぎ合わせることで、全体のモデルを作成した。合成に際しては、まず前面を合成し、次に後面を合成した。そして、図－11に示すように、前・後面を合成することで、全体のデータを作成した。

写真計測もレーザスキャナと同様に、データは点群のデータである。そこで、図－11に示すように、同様の処

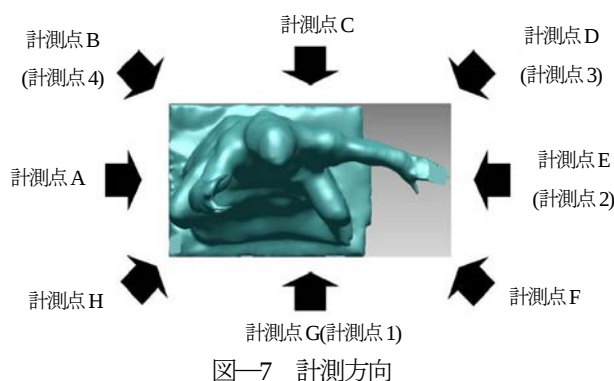
理を行ってワイヤフレームデータ、およびサーフェイスデータを作成した。

（3）計測結果比較

実際にトランシットを用い、平和祈念像の2点間の水平距離を計測し、三次元レーザスキャナおよび、三次元写真計測により計測した結果との比較を行った。比較に用いた箇所は図－13に示す3箇所である。計測し比較した結果、三次元レーザスキャナおよび、三次元写真計測の結果は実測値と非常に良く一致している。

（4）解析結果

作成したサーフェイスデータは表面のみのデータである。そこで、STLファイルへと変換することにより、有限要素汎用コードMARCのプリポストプロセッサであるMENTATを用いて容易に入力することができ、FEモデルを作成することができる。また、必要があれば内部にテトラ要素を構築することでソリッドデータを作成することも可能である。STLファイルは各点の座標と面における法線ベクトルの情報を有している。そのため、面の方向が確定し、点群の座標データをもち、形状データと等価な情報を有する。



図－7 計測方向



図－8 計測風景

表－3 三次元レーザスキャナの性能

測定範囲	10～350m（350mの反射率4%） ～800m（800mの反射率20%）
スキャンニング角	垂直±20°×水平±20°
スキャンニング速度	20000ポイント/秒
レーザ波長	1540nm（近赤外）
レーザ強度	クラス1
レーザ間隔	0.025°（最高0.0014°）
スポットサイズ	13mm（5mの時）
測定精度	標準±3mm（100mの時）

作成したFEモデルを図-14 に示す。また、平和祈念像は青銅で建造されているため、解析には青銅の材料特性（弾性係数： $1.1 \times 10^5 \text{MPa}$ 、ポアソン比：0.385、引張強度：130MPa）を用い、青銅厚は18mm¹⁴⁾とした。境界条件としては、台座部分を完全固定とした。

なお、三次元レーザスキャナで直接得られる計測点数は約 30 万点と膨大な点群データであるため、直接、計測データを解析に用いると膨大な容量と解析時間を要する。そこで、三次元写真計測データ数と同程度にまで

低減させて固有振動解析を行い、三次元写真計測データによる解析精度について比較検討した。なお、要素数を減少させたことによる解析精度についても検討した。解析結果を表-5 に示す。レーザスキャナと写真計測による自由振動解析による固有振動数はよく一致していることが確認できる。三次元写真計測は、高精度の計測が可能である三次元レーザスキャナと同程度の解析精度を有していることを確認できた。また、要素数を減じても同程度の解析結果を得ることができた。



(a) 点群 (b) ワイヤフレーム (c) サーフェイス

図-9 三次元幾何モデル(三次元レーザスキャナ)



(a) 点群 (b) ワイヤフレーム (c) サーフェイス

図-12 三次元幾何モデル(三次元写真計測)

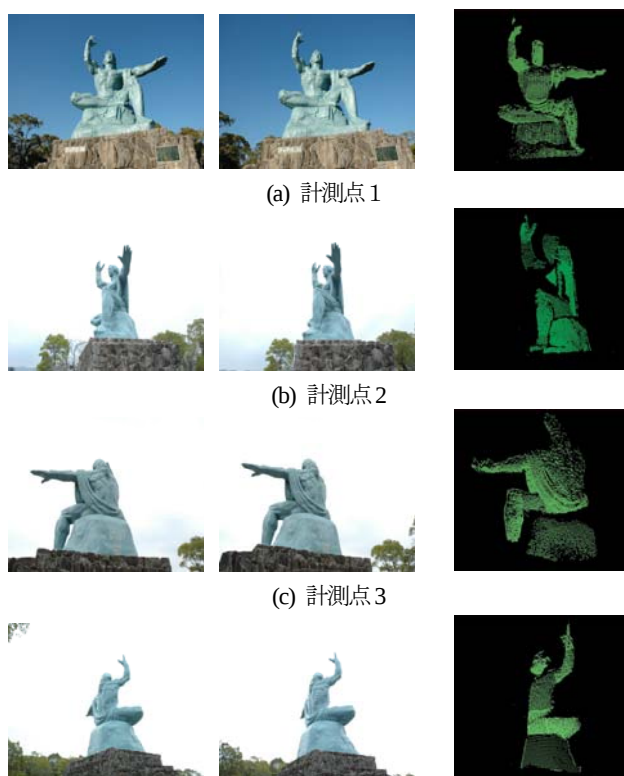


図-10 計測位置

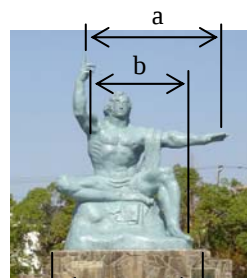
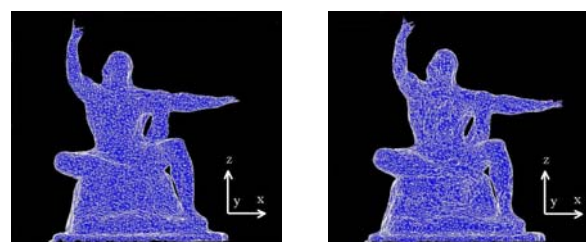


図-13 計測箇所

表-4 寸法比較 (単位: m)

	a	b	c
測量値	6.89 (1.00)	5.33 (1.00)	7.33 (1.00)
レーザスキャナ	6.80 (0.99)	5.27 (0.99)	7.21 (0.98)
写真計測	6.69 (0.97)	5.17 (0.97)	7.17 (0.98)



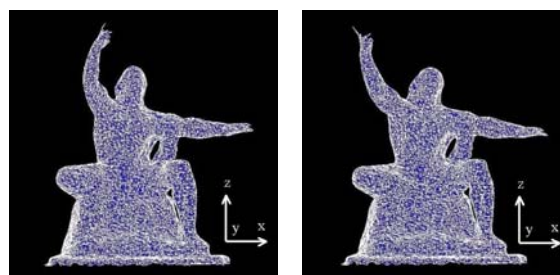
(a) 3D スキャナ (要素数: 17101) (b) 写真計測 (要素数: 18176)

図-14 FE モデル



(a) 前面の合成 (b) 後面の合成 (c) 全体

図-11 合成手順



1 次モード 3 次モード

図-15 振動モード図

表－5 固有振動数 (Hz)

	1次	2次	3次	4次
レーザスキャナ (要素数：610415)	3.60 (1.00)	5.10 (1.00)	9.02 (1.00)	9.36 (1.00)
レーザスキャナ (要素数：17101)	3.47 (0.96)	5.07 (0.99)	8.94 (0.99)	9.34 (0.99)
写真計測 (要素数：18176)	3.35 (0.93)	4.96 (0.97)	8.80 (0.98)	9.30 (0.99)

4. 耐震性能評価

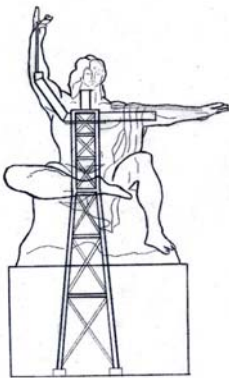
4.1 解析概要

昭和 30 年に完成した平和祈念像は、当初、左肩から腕部にかけてのみ山形鋼で補強されており、その他は空洞であった。その後、昭和 53 年にボルト取替えとステンレスパイプによる補強工事がなされている。

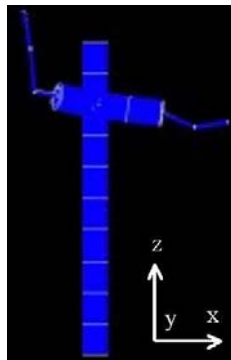
平和祈念像は、現在は図－16 に示すように、内部にステンレス鋼により補強が施されている。ステンレス鋼による補強効果を解析的に検討するために、補強された場合と、そうでない場合において固有振動解析を実施した。なお、ここでの固有振動解析法は、前記 3. と同様で、FEモデルは三次元写真計測結果より作成したFEモデルを用いて行った。また、内部のステンレス鋼は2 節点梁要素（弾性係数： $2.0 \times 10^5 \text{MPa}$ 、ポアソン比：0.3、引張強度：450MPa）を採用した。境界条件としては下端を完全固定とした。また、固有振動数、固有モードより有効質量比をそれぞれにおいて算出することとした。



(a) 平和祈念像内部



(b) 正面図



(c) 補強材の FE モデル

図－16 平和祈念像

4.2 解析結果

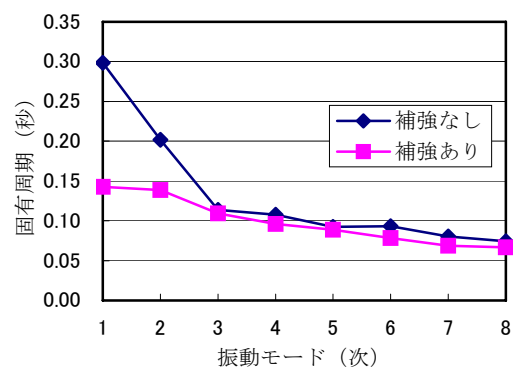
解析結果を図－17、図－18 および表－6、表－7 に示す。表－6、表－7 に固有周期および有効質量比、図－17 に補強の有無における固有周期の比較、図－18 に振動モード図を示す。有効質量比は、その構造物の振動モードに対する寄与率を示すものであり、この値の最大のモードがその構造物の卓越モードである。補強なしの場合も補強ありの場合も、X 方向で 2 次、Y 方向で 1 次、Z 方向で 3 次の値が高くなっている。したがって、補強なし、補強ありのいずれの場合でも、1 次および 2 次モードが卓越モードであると考えられる。また、図－17 より卓越モードであると考えられる 1 次および 2 次モードにおいて固有周期の値が、補強を施すことによって減少しており、耐震性能が増大することを確認できる。

表－6 固有周期および有効質量比（補強なし）

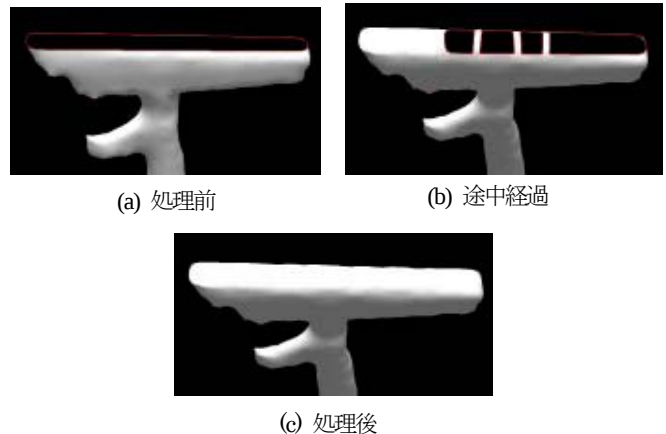
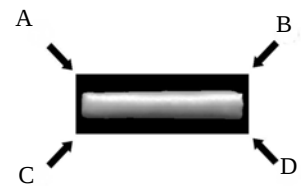
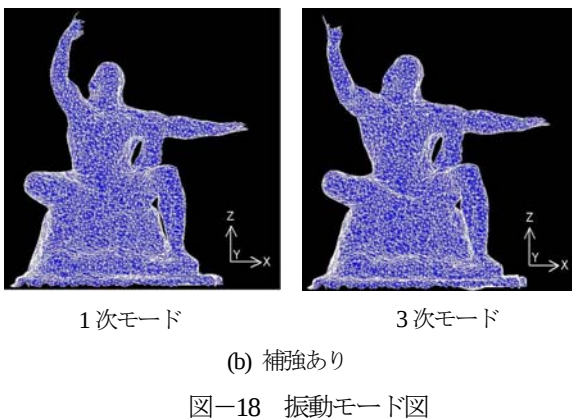
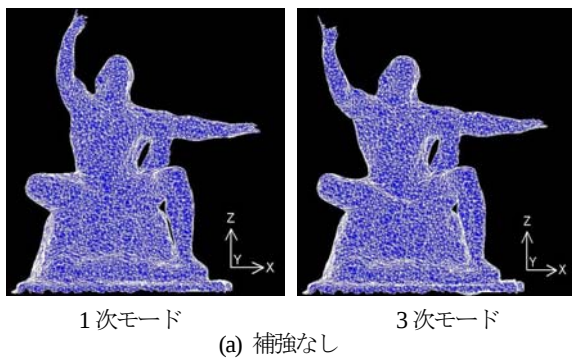
振動モード	固有周期(秒)	x	y	z
1次	0.2985	12.04%	25.03%	0.11%
2次	0.2016	25.45%	12.05%	1.89%
3次	0.1136	2.26%	9.93%	30.43%
4次	0.1075	1.37%	3.26%	2.34%
5次	0.0926	2.06%	1.09%	13.02%
6次	0.0934	0.14%	2.79%	25.19%
7次	0.0803	1.55%	4.32%	4.84%
8次	0.0745	4.16%	0.24%	2.83%
合計		49.03%	58.71%	80.65%

表－7 固有周期および有効質量比（補強あり）

固有モード	固有周期(秒)	x	y	z
1次	0.1426	12.24%	25.06%	0.10%
2次	0.1386	26.25%	12.65%	2.00%
3次	0.1091	1.49%	11.32%	34.19%
4次	0.0962	0.68%	1.88%	4.57%
5次	0.0886	2.43%	0.63%	31.24%
6次	0.0782	1.26%	2.61%	1.89%
7次	0.0689	1.04%	4.76%	4.44%
8次	0.0666	4.30%	0.15%	2.28%
合計		49.68%	59.06%	80.71%



図－17 固有振動数の比較



5. その他の構造物の三次元形状計測

本研究では、平和祈念像のほかに長崎市山王神社の片足鳥居の三次元写真計測を行った。その結果を以下に示す。なお、撮影には平和祈念像の場合と同様の 6.1 メガ画素のデジタルカメラを用いた。

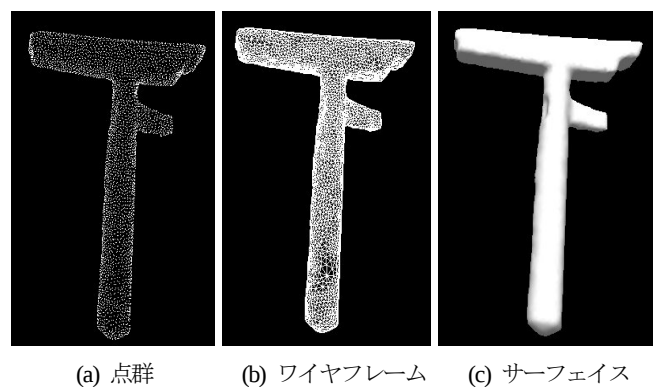
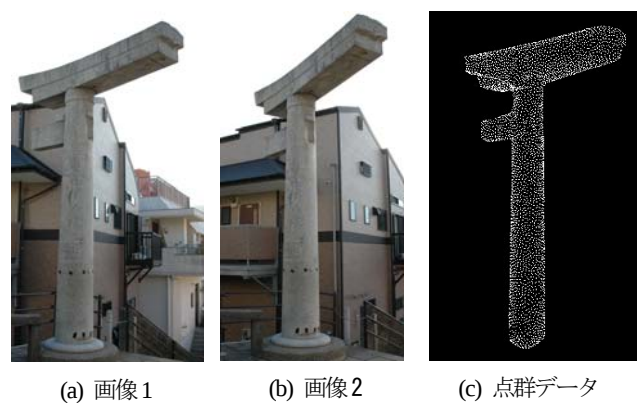
5.1 計測概要

三次元写真計測を用いて図-19 に示す長崎市山王神社の片足鳥居の計測を行った。三次元写真計測の計測範囲は、撮影位置から見えている範囲に限られるため、図-20 に示す 4 方向から計測を行い、それらをつなぎ合わせることで、全体の形状データを作成した。

片足鳥居の上面に関しては、上面を画像内に収めることができなかったため、図-21(a)のように上面のデータを得ることはできなかった。そのため、まず、境界同士を架橋し(b), 次に、その間の境界を接合することで、(c) に示すように上面のデータを作成した。

図-22 には計測点 C から作成した点群データと作成に使用した 2 枚の画像を示す。そして、4 方向から計測により得られた点群モデルから、ワイヤフレームモデルおよびサーフェスモデルに変換した幾何モデルを図-23 に示す。

なお、本例の場合の写真計測では、図-22(a)を基準にした座標系で作成しているが、任意の座標系を設定することができ、その座標系のまま FE メッシュ分割を行うことができる。



6. まとめ

本研究で得られた結果は以下のようにまとめられる。

1. 三次元写真計測を用いて、さまざまな構造物の形状計測を行い各種三次元幾何モデルを作成することができ、構造物の三次元デジタル画像を構築することができた。
2. 形状計測により得られた形状データは STL ファイルへ変換することで、プリプロセッサへインポートでき、容易に FE モデルを作成し、固有振動解析を行えることを確認できた。
3. 曲面板の固有振動解析結果は、振動実験による固有振動数、固有振動モードとよく一致することが確認された。
4. 平和祈念像の固有振動解析の結果から、三次元写真計測は高精度計測が可能である三次元レーザスキャナ計測と同等の精度があることが確認できた。
5. 補強材の有無を考慮した固有振動解析では、発生頻度の高い振動モードを特定することができ、また補強することで、耐震性能が向上することを確認できた。
6. 三次元写真計測、そのデータを用いた FE メッシュ作成、固有振動解析、耐震性能評価という一連の計測・解析システムを構築することができた。

7. 今後の展望およびあとがき

本研究では、固有振動解析しか行っていないが、今後は、実構造に対しても振動試験を実施し、本法の有効性を確認する予定である。ただし、歴史的建造物は衝撃振動など直接加力することができない場合が多いので、非接触で固有振動数と固有振動モードを計測することが課題である。また、地震波を入力することにより動的応答解析も行っている¹²⁾。しかしながら、本手法により得られる固有周期と実構造物の固有周期との整合性を検討していないため、実構造物の固有周期を計測した上で改めて報告することとする。

なお、本研究は平成 17 年度前田記念工学振興財団、長崎大学高度化推進経費（萌芽的研究）、および平成 17～18 年度科学研究補助金、基礎研究（B）（1）（研究代表者：松田浩、課題番号：17360217）の一部により行われたことを付記し、ここに謝意を示します。

参考文献

- 1) 古田陽久, 古田真美：世界遺産ガイド 一産業・技術編一, シンクタンクせとうち総合研究機構, 2001
- 2) 杉原太郎, 森山雅雄, 松田浩：小規模三次元計測

システムの開発, 日本写真測量学会秋季学術講演会論文集, pp.59-62 (1998)

- 3) 和田眞禎, 森山雅雄, 松田浩, 杉原太郎：レーザ光を用いた三次元画像計測システムの開発, 日本写真測量学会平成 11 年度年次講演会発表論文集, P297-P298 (1999)
- 4) 杉原太郎, 森山雅雄, 松田浩, 山本晃, 和田眞禎：長さ基準における校正手法を導入した 3 次元画像計測システムの開発, 日本写真測量学会平成 11 年度年次講演会発表論文集, P299-P302 (1999)
- 5) 仲村政彦, 松田浩, 山本晃, 和田眞禎, 鶴田健：可搬・非接触型三次元計測装置を用いたコンクリート表面計測 (2400KB) 土木構造・材料論文集(九州橋梁構造工学研究会 KABSE), 第 16 号, pp.85-92, 2000
- 6) 松田浩, 和田眞禎, 小嶋悟, 崎山毅, 森田千尋ほか：3D 計測によるコンクリート打継部及び曲面板の振動解析に関する研究, (1538KB) 土木学会応用力学論文集, Vol.3, pp.115-124, 2000
- 7) 松田浩, 小嶋悟, 和田眞禎, 古賀掲維, 仲村政彦ほか：膜・シェル構造解析のための 3D 計測+FEM 解析システムの開発, (441KB) 鋼構造年次論文集, Vol.8, pp.595-602, 2000
- 8) H.Matsuda, T.Sakiyama, C.Morita, M.Nakamura and K.Kawaguchi：Development of finite element analysis system for membrane and shell structures by using 3D-optic system, TRENDS in Computational Structural Mechanics (CSM), pp.511-518, 2001
- 9) 松田浩, 大石裕介, 神原天鳴：ホログラフィ干渉計測及び三次元計測に基づく FEM 解析による薄肉板の振動解析 日本実験力学学会講演論文集, No.2, pp.217-222, 平成 14 年 8 月 (1.4M2B)
- 10) 松田浩, 大石裕介, 神原天鳴, 仲村政彦, 崎山毅：ホログラフィ干渉計測および 3 次元計測による薄肉構造部材の非破壊検査に関する研究 応用力学論文集, Vol.5, pp.847-854, 平成 14 年 9 月 (1.6MB)
- 11) 鶴田聡, 松田浩, 山下務, 出水享：歴史的建造物の三次元形状計測と地震応答解析への利用に関する研究, 建築・土木分野における歴史的建造物の診断・修復に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.113-120, 2006
- 12) 鶴田聡, 松田浩, 山下務, 松山直紀：歴史的建造物の三次元デジタル画像化とその地震応答解析への利用, コンクリート工学年次論文集, No.28, pp.1609-1614, 日本コンクリート工学協会, 2006
- 13) 井口征士, 佐藤宏介：三次元画像計測, 昭晃堂, pp.2 pp.14, 1990
- 14) 平和祈念像修復懇話会：平和祈念像の修復報告書, 長崎市, 2000

(2006 年 9 月 11 日受付)