

# 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

## Development 3D measurement and FEM analysis system for membrane and shell structures

松田 浩<sup>\*1</sup>                      小嶋 悟<sup>\*2</sup>                      和田眞禎<sup>\*3</sup>  
Hiroshi MATSUDA,              Satoru KOJIMA,              Masayoshi WADA,  
古賀 掲維<sup>\*4</sup>                      仲村政彦<sup>\*5</sup>  
Aoi KOGA                      Masahiko NAKAMURA

**ABSTRACT** In order to measure the surface of membrane and shell structures three-dimensionally, noncontact and portable 3D measuring system is developed. This system is composed of the two CCD cameras and laser beam, and is based on three types measure method, i.e. stereo-photogrammetry, spot-laser and slit-laser photogrammetry. As the applications of 3D measurement, the problem of free vibration analysis for twisted thin cylindrical shell panels are investigated.

### Keywords:

可搬・非接触型 3D 計測装置, 膜・シェル構造, 有限要素解析, レーザ光線, CCD カメラ  
portable and noncontact 3D measuring device, membrane and shell structures,  
finite element analysis, laser beam, CCD camera

## 1 はじめに

ケーブルネットやサスペンション膜などのテンション構造物,あるいは複雑な曲面形状をもつシェル構造物を対象として,三次元計測を行い,得られた三次元座標データを用いて FEM メッシュを作成し,汎用 FEM コードによる応力・変形および振動特性の解析を行うことを目的として,三次元計測装置を試作開発した<sup>1)~5)</sup>。

従来の三次元計測器には,接触式と非接触式があり,接触式は比較的安価であるが長い計測時間を要し,非接触式は高価で大規模な装置を必要とする。また,両計測法とも,定位置に設置されており,計測対象物をその場所に搬入・据え付けて計測が行われている。本開発装置(以後,レーザ光式 3D 計測装置と称す)は,通常普及している CCD カメラ 1 ~ 2 台とレーザスキャナを組み合わせ,簡易な計測理論<sup>6)</sup>を用いて,計測精度と計測速度を向上させ,さらに,可搬性および簡易操作性を追求したものである。

本論文は,本研究の第 1 ステップとして,試作したレーザ光式 3D 計測装置の精度について検討するとともに,レーザ光式 3D 計測装置および触針式 3D 計測器を用いて,曲がりかつねじれた曲面を対象として三次元計測を行い,三次元計測によって得られた座標データ情報を用いて有限要素メッシュを作成し,汎用 FEM コードにデータ入力して固有振動解析を行い,築地ら<sup>7)~9)</sup>の既往研究との比較を行った結果について述べたものである。

---

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

\*2 長崎大学 大学院生産科学研究科博士前期課程 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)

\*3 長崎大学 大学院工学研究科修士課程 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)

\*4 長崎大学 工学部構造工学科 (〒 852-8521 長崎市文教町 1-14)

\*5 日本構研情報(株)福岡テクノセンター (〒 812-8601 福岡市博多区博多駅前 1-7-22)

本論文の一部は,土木学会年次学術講演会概要集,VI 部門,pp.820-821,1999,土木学会西部支部研究発表会,pp.560-561,2000 に発表。

## 2 可搬・非接触型三次元計測装置

本計測装置に用いた計測理論は、対象物(測定点)をカメラやレーザで見たときの透視変換理論に基づくものである<sup>6)</sup>。指定座標系から既知点を抽出し、透視変換行列によりカメラやレーザの位置関係パラメータを算出することにより、ステレオ画像法、スポットレーザ投光法、スリットレーザ投影法で三次元計測を行なうことができる(詳細については既発表論文<sup>1)~5)</sup>を参照されたい)。

各カメラの画像座標値は差画像と光重心法で求められる。差画像とは、レーザ光照射前の画像とレーザ光照射後の画像の輝度(白黒画像の場合 256 階調表示)の差をとり、カメラ画像上でのレーザ光位置を特定するものである。光重心法とは、カメラ画像上でのスポット光の全ての座標(以後、ラスタ座標と表記)と、その点の輝度を抽出し、輝度を重みとして重心を求める方法である。スリットの場合は、カメラ画素 1 ラインでのスリット光の全てのラスタ座標、輝度を抽出し、光重心を取っている。

本計測装置のハードウェア構成を以下に示す。

写真 1 に示すように、CCD カメラ 2 台とスポットレーザ投光器を同一定盤上に一体化させている。CCD カメラは 1/3 インチ CCD アナログカメラ(有効画素数:768(H)×494(V))を使用しており、PC に内蔵した画像処理ボードによって、31 万画素のデジタルデータとして画像を取り込んでいる。カメラレンズは標準レンズ(焦点距離 9mm)を使用している。

スポットレーザ投光器は、2 軸に 12 ビット分解能のガルバノメータスキャナ(先端にレーザ光反射用ミラーを取付)を搭載している。各軸のスキャナが  $u$  軸、 $v$  軸に対応しており、各スキャナを制御することにより、発射させた直径約 5mm の半導体レーザ光(波長 633 nm, 強さ 0.9 mW)を前方任意方向へ自由に照射できる。また、1 つの軸を高速に振ることにより、スリットレーザの照射も可能なマルチレーザ投光システムである。

レーザ光式 3D 計測装置の制御は、CCD カメラからの画像データ取得や、計測操作プログラムの操作、レーザ照射方向操作などをパソコンとスポットレーザ投光器コントローラから行なう。パソコンは、CPU 233 MHz, HDD 8GB, メインメモリ 256MB の性能を持つ。計測は大量の画像データや計測データを一度に演算処理するので、パソコンの性能が計測速度につながる。また画像を取り込むため、NTSC 方式で送られる画像データをデジタルデータに変換し、パソコンのメモリに取り込む画像処理ボードやレーザスキャナを操作するためアナログデータの DA 変換ボードを内蔵している。なお、画像処理ボードの標準分解能は  $640 \times 480 \times 8$  bit である。スポットレーザ投光器コントローラは、スポットレーザ光照射制御、スリット光周波数調整、スキャナ振幅調整などを操作するものである。写真 2 はキャリブレーションを行う際に用いるキャリブレーションボード(C.B.)である。

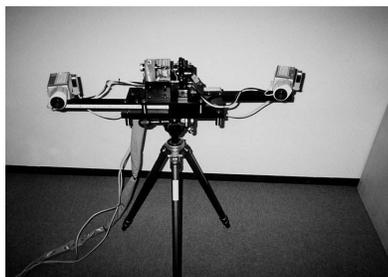


写真 1 三次元計測装置

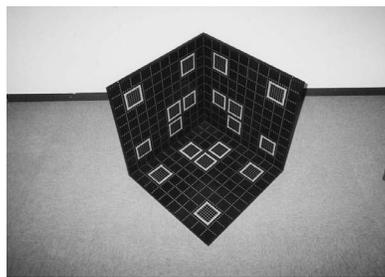


写真 2 キャリブレーションボード(C.B.)

## 3 三次元計測装置の計測性能

### 3.1 レンズの歪補正

カメラレンズには必ず歪が存在する。このレンズ歪が精度に大きく影響しているものと考え、精度の向上を図るため実際のカメララスタ座標と歪のない理想的なラスタ座標とを比較し、ラスタ座標

補正量を抽出した．抽出された補正量は，補正パラメータとして，計測システム内に組み込まれている．計測して得られたラスタ座標に補正量を乗じ，三次元座標を計算する．補正パラメータを検証するため，平板上の点を 10cm 間隔で計測し（図 1 参照），補正前と補正後の精度を両方算出して，比較検討を行った．表 1 に計測結果を示す．カメラレンズの歪は，画面外側になるほど大きくなる．計測結果を見ると，補正前はレンズ歪の影響のため，平板の外側付近の精度が悪くなっており，補正することにより精度が改善されていることがわかる．

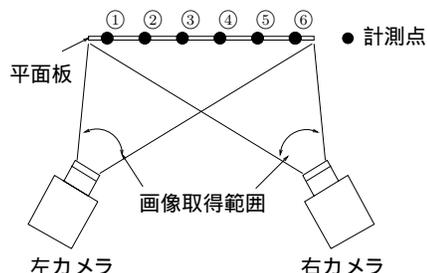


図 1 歪補正検証計測

表 1 歪補正計測結果

計測点	精度 (%)	
	補正前	補正後
①-②間	1.02	0.22
②-③間	0.07	0.12
③-④間	0.62	0.31
④-⑤間	0.25	0.07
⑤-⑥間	0.94	0.48
①-⑥間	0.35	0.15

### 3.2 奥行き方向精度

本計測システムの奥行き方向精度を検証するため，平板上の 2 点 (400mm 間隔) を計測し，計測距離と実距離との誤差を算出して検証した．ここでは，図 2 のように，計測器と平板を垂直に設置した状態での精度と，平板を傾けて設置した精度をスポット投光法およびスリット投影法についてそれぞれ算出した．レンズは標準レンズ (焦点距離 9mm) を使用している．また，計測精度の向上のために，前述のカメラレンズ歪補正を行うとともに，キャリブレーション時の個人差による誤差を小さくするため，キャリブレーションを数回繰り返すことによりカメラ・レーザパラメータの平均化を行っている．以上のことを考慮して計測した結果を図 3 に示す．カメラ間距離 (カメラ-レーザ間距離) は 50cm，計測器と平板の距離は 120cm である．

2つのカメラの各ラスタ座標を取得し，合計 4 個の座標パラメータ ( $u_1, v_1, u_2, v_2$ ) から 3 次元座標を算出するスポット計測に比べ，スリット計測の場合は，カメラのラスタ座標とレーザの  $u$  座標を取得し，合計 3 個の座標パラメータ ( $u_1, v_1, u_2$ ) から三次元座標を算出するため，計測精度が悪くなっているものと考えられる．また，平板の角度が大きくなると，照射されたレーザ光の形状が楕円形状となり計測点を正確に照射することができなくなり，またカメラ画像上でもスポットレーザ光中心位置を特定することが困難になるので，奥行き方向の精度が低下するものと考えられる．

このようなことはキャリブレーション時にも生じる．現段階では， $50 \times 50 \text{cm}^2$  の板を 3 枚用いて直交に組み合わせたキャリブレーションボードを使用しており，キャリブレーションボード上の各平面に照射されたスポットレーザ光を CCD カメラで撮影したときに，できるだけゆがみが生じないようにカメラ間距離 (カメラ-レーザ間距離) を 50cm に固定して計測を行った．

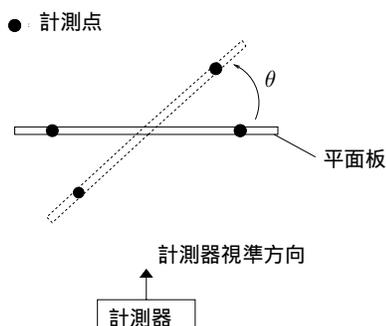


図 2 奥行き方向精度検証計測

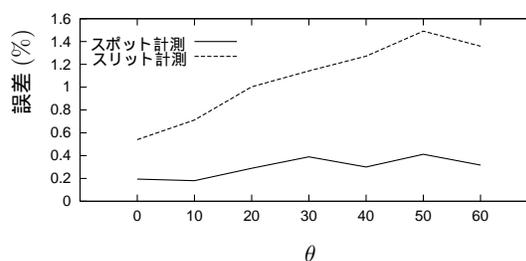


図 3 奥行き方向を考慮した精度

どのカメラ位置からでも、スポットレーザ光と正対するようにキャリブレーションボード上に回転ターゲットを設け、カメラ間距離(カメラ-レーザ間距離)を大きくすると、カメラ-レーザパラメータの精度が向上し、計測精度も改善できるものと考えられる。

### 3.3 CCDカメラの解像度と計測精度の検討

計測器から被計測物までの距離を100cm(取得画像範囲54×40cm)とし、カメラ間距離を50cmとして、標準レンズ(焦点距離9mm, 1/3インチCCDカメラ)を使用した場合の1画素の大きさと、そのときの理論上の精度(400mm幅の距離を計測したときの誤差(%))を表2に示す。本計測では、31万画素のCCDカメラを使用している。前項に示すように、光重心法による座標算出、カメラ-レーザパラメータの相加平均、取得画像の歪補正等により精度を向上させることができるので、解像度の異なる他のCCDカメラでも同様の精度向上が期待できるものと考えられる。

表2 カメラ解像度の違いによる精度誤差理論値

解像度	1画素の大きさ(mm)	精度(%)
31万画素(640×480)	0.83×0.83	0.42%
80万画素(1024×780)	0.51×0.51	0.26%
145万画素(1392×1040)	0.38×0.38	0.19%

### 3.4 計測環境および計測時間

本計測システムの性能を評価するため、触針式3D計測器を使用して比較している。触針式3D計測器は、計測対象物に直接接触し計測を行なうため、高精度な三次元座標を取得できるのが特徴であるが、1万点の計測に3時間程度かかり、計測対象物を持ち込み計測を行なうので、対象物の大きさ・重量に制限がある。それに対して、レーザ光式3D計測装置は、1万点をスポット計測で80分、スリット計測で20秒で計測することができ、また、計測器を移動して計測を行うことができ、対象物のサイズ・重量に制限なく計測することができる。

## 4 曲面板の自由振動解析への応用

筆者らが開発した可搬・非接触型であるレーザ光式3D計測装置の有効性・有用性の検証と、三次元計測によって得られる三次元座標情報の有効活用技術を検討することを目的として、築地ら<sup>9)</sup>による曲面板の自由振動実験・解析結果と比較検討を行った。

### 4.1 築地らの曲面板の振動解析・実験の概要

築地らは軸流回転機翼の振動解析法の一つとして、翼をねじれた薄板または曲板にモデル化し、薄肉シェル理論から導かれた厳密なひずみ-変位関係を用いたRayleigh-Ritz法による解析法を提案するとともに、ねじれた変厚円筒曲面板や薄肉円すい曲板に対して振動数パラメータに及ぼす曲率半径や初期ねじれ角の影響について検討している<sup>7)~9)</sup>。

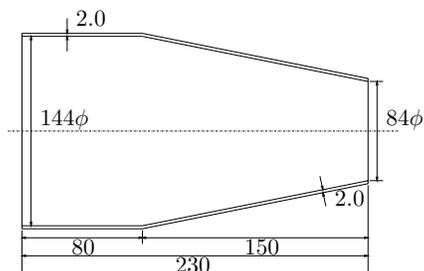


図4 アルミニウム合金製の円錐殻

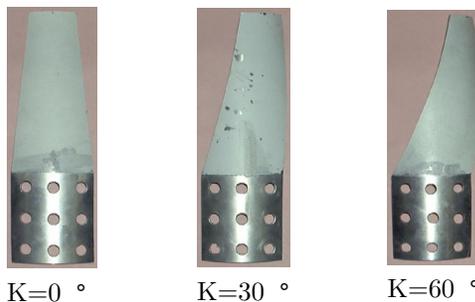


写真3 円錐殻から切り出した試験片

試験片は図4に示すアルミニウム合金製の円錐殻(ヤング率71 GPa, ポアソン比0.33, 密度2.7 g/cm<sup>3</sup>)より, 中心角60°の曲面板に対し円錐断面の中心をねじれ中心とする初期ねじれ角 $K=0, 30, 60^\circ$ を切り出し製作した(写真3)。

防振台上の固定金具に試験片を固定し, 試験片の裏面からスピーカーで加振する。なお, スピーカーの加振力が不足する場合には小型電動加振機(加振力1KgG)を用いる。試験片に貼付した圧電素子出力の極大点の加振周波数を測定し, 試験片の共振周波数とする。共振時の試験片の振動モードはレーザホログラフィ(He-Neレーザ, 出力30mW)の時間平均法によって測定する。

#### 4.2 三次元計測データから FEM メッシュの作成手順

触針式3D計測器より得られた三次元座標データはデータ間隔が均一で, メッシュ分割は比較的簡単に得られる。レーザ光式3D計測装置により得られた三次元座標データはデータ数が多く, ノイズもあり, またデータ間隔が不均一なため, 計測データをそのまま用いてメッシュ分割することは困難である。そのため, ここでは, 以下に示すようにメッシュ分割プログラムを作成した。

##### ① データ間隔の均一化

本計測装置により得られた三次元座標データを  $xy$  平面に投影し,  $2\text{mm} \times 2\text{mm}$  について  $z$  座標を平均化することにより新三次元座標データ(図5参照)を作成して, データの均一化を図る。

##### ② FEM メッシュ分割

均一化された三次元座標データを図6に示す方法で三角形要素を作り, より実物に近い形状となるようにメッシュ分割を作成する。

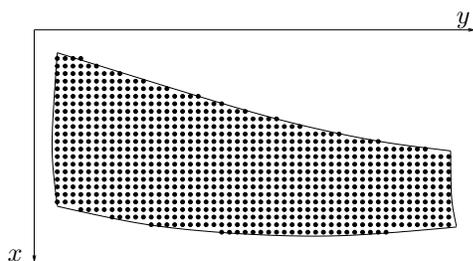


図5 均一化されたデータ

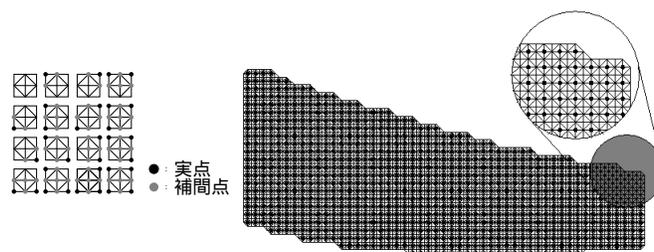


図6 FEM メッシュ分割法

#### 4.3 曲面板の振動解析・実験結果の比較

触針式3D計測器およびレーザ光式3D計測装置により計測されたデータを用いて有限要素解析による固有振動解析結果を, 築地らの結果とともに図7に示す。

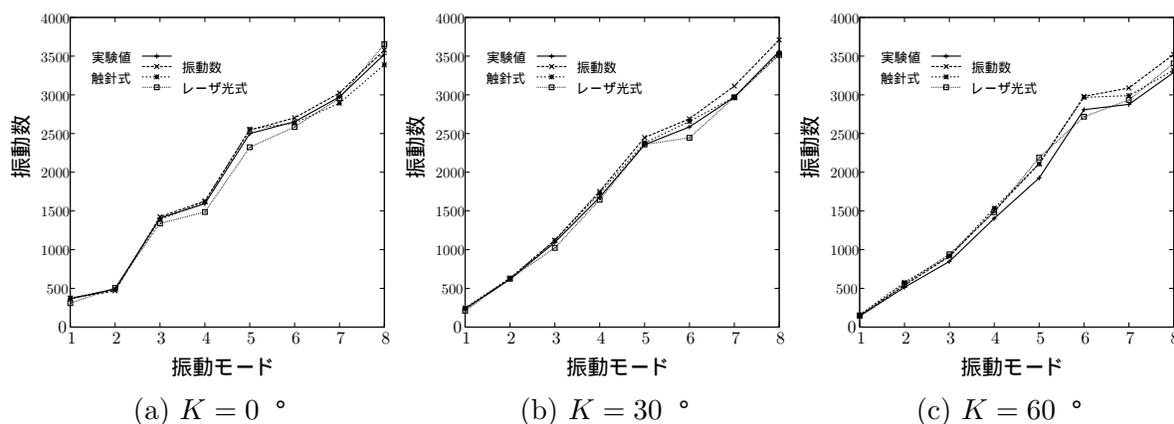
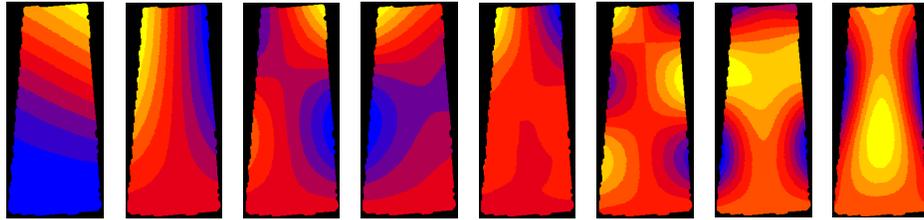
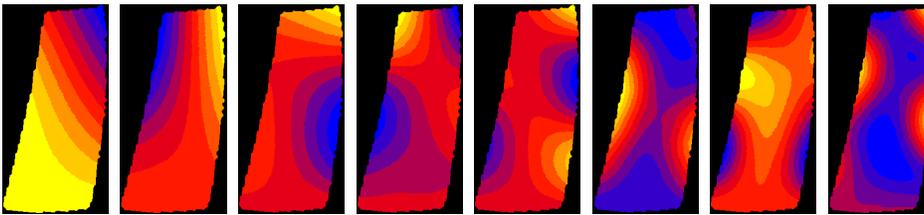


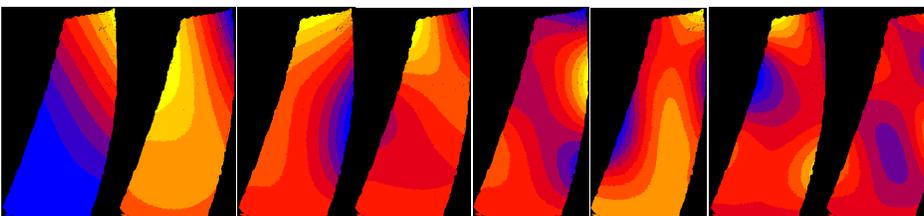
図7 曲がりかつねじれた曲面板の自由振動解析結果



1次 2次 3次 4次 5次 6次 7次 8次  
 (a)  $K=0^\circ$  (上段: 実験結果, 下段: 本解析結果 (レーザー光式))



1次 2次 3次 4次 5次 6次 7次 8次  
 (b)  $K=30^\circ$  (上段: 実験結果, 下段: 本解析結果 (レーザー光式))



1次 2次 3次 4次 5次 6次 7次 8次  
 (c)  $K=60^\circ$  (上段: 実験結果, 下段: 本解析結果 (レーザー光式))

図8 振動モード図

実験結果および3つの解析結果(Rayleigh - Ritz法, 触針式およびレーザー光式3D計測データを用いたFEM解析)は, レーザ光式3D計測データによる解析結果の精度が若干悪いもののほぼ一致した解が得られていることがわかる. Rayleigh - Ritz法による解析においては, 曲面形状等は関数表示されている. 一方, 本研究では, 曲面形状が未知なるものとして, 三次元計測を行い, FEMにより固有振動解析を行った. なお, FEM解析では, 3節点三角形シェル要素を用いており, 要素数14500~19000, 節点数7500~10000であった. 図8に, 1次から8次までの振動モード図について, レーザホログラフィ装置による実験結果とレーザー光式3D計測による解析結果とをそれぞれ示す. 実験結果とほぼ同じ振動モード図が得られている.

## 5 まとめと今後の展望

本研究では, 可搬・非接触型三次元計測装置を製作し, 計測精度および計測性能を検証するとともに, 曲がりかつねじれた曲面板の自由振動解析問題へ応用した. 以下に得られた結果をまとめ, 本計測システムの今後の展望について考察する.

### 5.1 まとめ

1. 本計測装置は, 通常普及市販されているCCDカメラ2台と安価なレーザーを用いて三次元計測の精度を向上させるとともに, パソコンの計算機部分を小型化し, 低価格, 可搬性, 簡易操作性を有している.
2. 本計測装置は, 触針式3D計測器と比較して, 可搬性・移動性があり, 比較的大きい構造物も計測可能である. また, 非接触式なので, 天井, 壁, 床など任意方向の形状計測や, 膜のような構造物にも適用可能である.
3. 本計測装置を用いて, 曲がりかつねじれた曲面板を対象として三次元計測を行い, さらに得られた三次元座標情報から有限要素メッシュ分割プログラムを作成した. 有限要素解析の結果, ほぼ良好な自由振動解析結果が得られた. 本研究で用いた《三次元計測ならびに解析システム》は, 膜構造やシェル構造の計測・解析に適用可能であることがある程度検証された.

### 5.2 今後の展望

本研究で開発した三次元計測装置は, 上記のように精度と応用性について検討を行うことができたが, 今後以下のような点に注目して研究を続行していく予定である.

1. 計測時のノイズ処理, FEMメッシュ分割作成など改良すべき点も残されているので, さらなる改良を行なうとともに, レーザホログラフィによる振動モード測定装置を使用できる環境にもあるので, 今後, 異方性材料を含めて種々の材料からなる構造部材の応力・変形・振動解析へ適用していく予定である.
2. 本計測装置は, 非接触式なので, 膜構造のしわの発生の実験などの研究分野に適用可能であると考えられるので, その方面の研究にも適用していきたい.
3. 計測システムの精度は, CCDカメラの画素数と画像処理ボードの性能に依存している. CCDカメラや画像処理ボードの性能は急速に進歩しているので, さらなる高精度化も近い将来必ず実現できるものと考えられる. 本計測装置の精度がさらに向上すれば, 様々な分野への応用が可能となるものと考えられる. また, 高画素数のデジタルカメラを用いた計測法についても検討していく予定である.

4. 本論文では示さなかったが、キャリブレーションの方法を工夫することによって、平和祈念像（長崎市）などの大規模建造物の三次元計測も実証済みであるので、これについては別の機会に報告を予定している。

## 6 謝辞

本研究において、本計測装置の開発・製作には長崎大学情報システム工学科森山雅雄先生にご指導・ご助言を戴きました。また、日本構研情報(株)山本晃君(元長崎大学工学部)、奈良女子大大学院中山沙織さん(研究当時長崎大学工学部4年生)には、計測およびデータ整理を手伝って戴きました。ここに記して謝意を表します。

なお、本研究は、平成10年度能村膜構造振興財団(研究代表者:長崎大学松田 浩)、および平成11年度文部省科学研究費補助金(B)(2)(研究代表者:長崎大学松田 浩)の補助の一部で行ったものである。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 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, pp59-62, 1998.
- 2) 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, P299-302, 1999.
- 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, P297-298, 1999.
- 4) 和田眞禎, 松田浩, 森山雅雄, 樋野勝巳, 山本晃: レーザとCCDカメラを用いた三次元計測装置の開発とその適用例, 土木学会第54回年次学術講演会, P560-561, 1999.
- 5) 和田眞禎, 松田浩, 山本晃, 仲村政彦, 鶴田健: 三次元計測装置を用いたコンクリート表面粗度の定量化と付着強度特性, 平成11年度土木学会西部支部研究発表会, 第1分冊, P820-821, 1999.
- 6) 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.
- 7) 築地恒夫ほか: ねじれた変厚円筒曲板の自由振動, 第35回構造強度に関する講演会, 日本航空宇宙学会, pp150-153, 1996.
- 8) 築地恒夫ほか: ねじれた薄肉円筒曲板の振動実験結果, 第38回構造強度に関する講演会, 日本航空宇宙学会, pp101-104, 1996.
- 9) 築地恒夫ほか: ねじれた薄肉円すい曲板の自由振動, 日本機械学会論文集(C編), 65巻629号, pp44-52, 1999.