

非接触型 3D 計測装置を用いた膜形状の計測

松田 浩*¹
仲村 政彦*²
山本 晃*²
和田 眞禎*³
川口 健一*⁴
呂 品崎*⁵

梗概

膜構造物の主構成材料である膜材は、圧縮はもちろん曲げや面外せん断に対しても全く抵抗できないので、膜構造物においては膜面にしわが発生しないような膜面の最適形状、最適張力が重要となる。本研究では、膜構造物の膜面やしわの形状を計測するために、レーザー光線と CCD カメラとパソコンを用いて、可搬・非接触型の三次元計測器を開発するとともに、計測データの有用性について検討した結果を報告する。

1. まえがき

サスペンション膜構造などのような張力構造物は、軽量であり、大空間を確保できるとともに、デザイン性が高い構造物として近年数多く建設されている。しかし、主構成材料である膜材は、引張力のみを負担し、圧縮はもちろん曲げや面外のせん断に対して全く抵抗できない¹⁾。したがって、形状を安定させ、膜構造としての構造が成り立つためには、張力が必要となる。また、リラクゼーションやクリープも考慮しなければならない。

膜構造物においては膜面にしわが発生しないような膜面の最適形状、最適張力が重要となる。これまで、最適な形状決定のために石けん膜などの模型実験による研究²⁾やコンピュータを用いて最適形状を解析的な研究³⁾が行われてきた。

膜構造は荷重作用により初期張力が消失する部分にしわや弛みが生じる。しわや弛みは美観を損ねるだけでなく、しわや弛みが発生した部分の繰り返し変形による膜材の破断の原因になったり、雨水や雪がその箇所たまるボンディングという現象の原因になるなど、膜材の維持管理上好ましくない諸々の事柄を引き起こし、膜構造物に多大な影響と与えてしまう。

呂・川口⁴⁾⁵⁾らは、張力膜のしわ発生メカニズムを張力場理論と分岐座屈解析の両理論を統合した方法で解析的に解明するとともに、平面矩形張力膜に一方引張力下で発生するしわの発生メカニズムおよび特性を検討するために実験的な研究を行っている。実験では、しわ発生時の応力状態および変形状態の解析を行うため

膜材に格子を描き、その格子点をレーザー変位計により1点1点計測することにより、しわ形状を測定している。レーザー変位計は手動で動かしているため、計測には3～5時間の時間を必要とする。

筆者らは、膜構造物の形状および膜面に発生するしわを計測を目的として、可搬・非接触型の三次元計測装置を試作開発した。従来の三次元計測装置には、接触型と非接触型があり、接触型は比較的安価であるが、長い計測時間を要し、また膜面のような柔構造の形状を計測することには適さない。非接触型は高価で大規模な装置が多く、図1に示すように種々の計測方法がある。これらの装置は、定位置に設置されており、計測対象物を特定の場所に搬入・据え付けて計測が行われる場合が多く、汎用性に欠けている。

本計測装置は、現場計測ができるように、可搬型の計測装置の開発を目標とした。そのため、通常普及している CCD カメラ1～2台とパソコンとスポットレーザー投光器、および簡易な三次元計測理論⁶⁾を用いて試作開発を行った。また、試作した本計測装置による計測精度を検討し、計測の高精度化、操作性の向上を追求するとともに、さらに本計測装置の利用可能性について検討を行っている^{7)～9)}。

これまでに、三次元計測例として、① コンクリートの表面計測¹⁰⁾¹¹⁾、② 薄肉シェル¹²⁾の三次元計測と自由振動解析¹²⁾、③ サスペンション膜構造、④ 大規模建設構造物、⑤ 張力膜のしわ計測、

*1 長崎大学工学部構造工学科 助教授 工学博士

*2 日本構研情報(株) 福岡テクノセンタ

*3 長崎大学大学院工学研究科構造工学専攻

*4 東京大学生産技術研究所 助教授 工学博士

*5 東京大学大学院工学系研究科

を行ってきた。②では、薄肉シェルを三次元計測し、そのデータを用いてFEMメッシュを作成し、汎用有限要素コードを用いて自由振動解析を行い、既往実験結果や解析結果と比較することにより、本計測システムの有用性について検討している¹²⁾。

本論文は、⑤張力膜のしわ計測への適用し、計測結果の有用性について検討したものである。連続的に変化するサスペンション膜の面形状は滑らかな曲面であるので、しわの三次元計測よりもはるかに精度よく計測することができる。また、その三次元座標データを用いてFEMメッシュを作成することにより、膜構造の応力・変形、振動解析へ応用することができる。さらに、キャリブレーション法を工夫すれば、長崎市の平和祈念像などの大型建造物も計測可能である。したがって、本三次元計測装置と計測データの利用法は、膜構造の研究・開発に有用なものと考えられる。

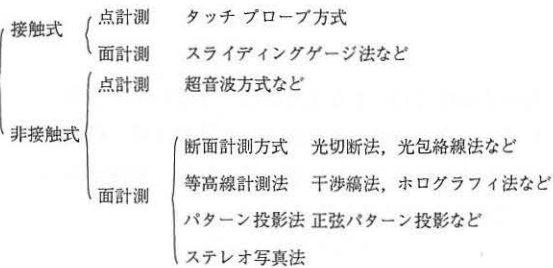


図1 三次元計測手法の分類

2. 可搬・非接触型三次元計測装置の概要

2.1 計測システムの概要

本計測装置に用いた計測理論⁶⁾は、計測対象物(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。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の3種類の計測法で三次元計測を行うことができる。ステレオ画像法は、2台のCCDカメラに撮影された特徴点を画面上より手で指定し、抽出した画像座標値より三次元座標を求めるものである。スポットレーザ投光法は、スポット光が照射された点を2台のCCDカメラによって撮影し、取得した画像座標値から三次元座標を求めるものである。スリットレーザ投影法は、光切断法とも呼ばれており、照射されたスリットレーザラインをカメラで撮影し、スリットラインが対象物に投影している部分の画像座標値を取得し、三次元座標を求めるものである。したがって、1枚の画像からただ1点の三次元座標を求めるスポットレーザ投光法に比較して、スリットレーザ投影法は、1回の撮影で1本のスリットレーザライン上の三次元座標を全て求めることができるので、膨大な三次元座標点群を短時間で計測することができる。

各カメラの画像座標値は差画像と光重心法を用いて求められる。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。

2.2 ハードウェア構成

本計測装置のハードウェア構成を以下に示す。

(1) 本計測装置は写真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アナログカメラを使用しており、PC(制御用コンピュータ)に内蔵させた画像処理ボードによって、32万画素のデジタルデータとして画像を取り込んでいる。また、カメラレンズは標準レンズ(焦点距離9mm)と広角レンズ(焦点距離4.5mm)が使用可能である。定盤は200(W)×350(D)×200(H)mmでアルミニウム製である。カメラ間距離やカメラ-スポットレーザ投光器間距離、計測器と計測対象物との距離、および、それらの距離関係と計測精度との関係を調べるために、カメラ間距離とカメラ視準角度が手で調整できるように製作した。計測器全体重量は10kgであり、写真1に示すように、三脚に搭載することができる。

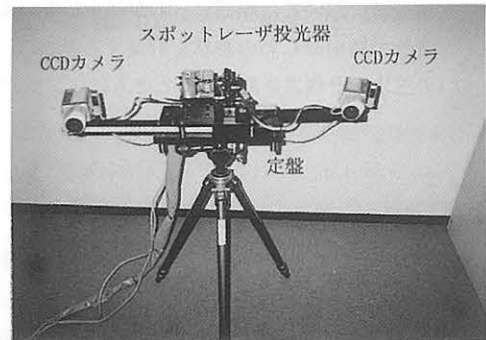


写真1 三次元計測装置

(2) 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設置)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5mmの半導体レーザ光(波長633nm、強さ0.9mW)を前方任意方向へ自由に照射することができる。また、1つの軸を高速に振動させることにより、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。

(3) 本計測システムの制御は、

- ① CCDカメラから画像データ取得
- ② 計測操作プログラムの操作
- ③ 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う。パソコンは、CPU 233MHz、HDD 8GB、メインメモリ 256MBの性能を有する。三次元面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っている。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(現在は640×480の解像度でしか取り込めない)や、レーザスキャナを操作するためアナログデータのDA変換ボードをパソコンに内蔵している。カラーディスプレイには、12インチTFTタッチパネルを採用した。スポットレーザ投光器コントローラは、レー

ザ光照射制御, スリット光周波数調整, スキャナ振れ幅調整などを操作するものである(写真2参照)。



写真2 本計測装置の制御システム

(4) 写真3は, キャリブレーションボード(C.B.)である。カメラパラメータを求めるための基準座標を決定するために用いるものである。直角に配置された3枚の板に5cm間隔で線を引き, その交点を基準点としている。

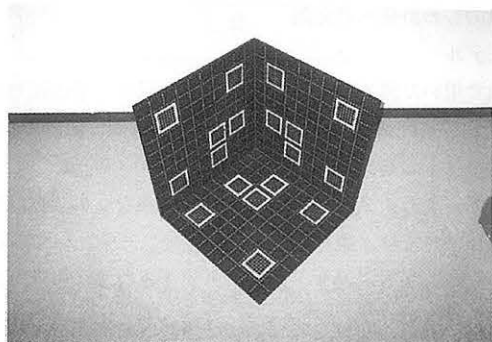


写真3 キャリブレーションボード

2.3 ソフトウェア構成

計測作業を円滑かつ簡便に行うため, ユーザフレンドリーな計測操作プログラムを開発した。OSはWindows NT, プログラム開発言語はC++を使用し, データベースソフトはACCESSを使用した。計測用プログラムとして,

- ① 計測前処理プログラム
- ② キャリブレーション操作プログラム
- ③ 自動計測操作プログラム
- ④ 計測データ表示プログラム

を作成した。①はレンズによるラスタ座標の歪み補正プログラムである。②は既知点(C.B.上の9点)の画像から, ラスタ座標を取得する機能, およびレーザ光照射角を取得する機能とにより, カメラレーザ位置関係パラメータ算出するプログラムである。③は計測操作プログラムで, 差画像抽出しきい値, スポットレーザ光移動ピッチ(スポット計測の場合は縦と横, スリット計測の場合は縦もしくは横), 照射範囲(スポット計測の場合は縦と横, スリット計測の場合は縦もしくは横)を設定し, レーザ光の画像座標値抽出から三次元座標算出までを自動的に行うものである。④は計測データ三次元DXF変換, サーフェイス表示, 表示画面からの指定2点間距離算出, および計測データのデータベースへの格納を行うものである。

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。キャリブレーションにより算出されたパラメータは, 理論的にはレンズ歪も考慮されているが, このレンズ歪は精度に大きく影響してしまう。そこで, レンズ歪を補正すると, 精度向上が期待できるものと考え, レンズ歪補正パラメータを作成した。

10mm間隔に正確に線が引かれた方眼紙をカメラで撮影すると, 方眼紙が歪んで写る。カメラで撮影された方眼紙の格子点のラスタ座標を全て取得し, これと歪のない理想的なラスタ座標とを比較し, 補正量を抽出する。この際, 格子点のラスタ座標は計測により取得されている(個人差による誤差を含む)ため, 鉛直化補正と正規化を行っている。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2参照), 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。なお, ここでの計測精度は次式で算出している。

$$\text{誤差(\%)} = \frac{(\text{計測距離} - \text{実距離})}{\text{計測距離}} \times 100 \quad (1)$$

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。

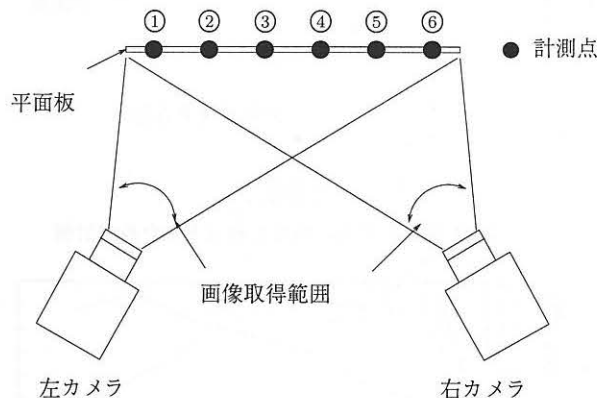


図2 歪補正検証のための計測

表1 歪補正計測結果

計測点	精度 (%)		計測点	精度 (%)	
	補正前	補正後		補正前	補正後
①-②	1.02	0.22	④-⑤	0.25	0.07
②-③	0.07	0.12	⑤-⑥	0.94	0.48
③-④	0.62	0.31	①-⑥	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。レンズは標準レンズ(焦点距離9mm)を使用し, スポット計測とスリット計測での精度を算出した。ここでは, 奥行き方向

の精度を検証するために、図3のように、計測器と平面板を垂直に設置した状態での精度と、平面板を傾けて設置した精度を算出した。

また、計測精度の向上のために、前述したカメラレンズの歪補正を行い、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平均化を行っている。キャリブレーションは、C.B.上の既知座標点を任意抽出しなければならないが、画面上で十字マーカによるマウスクリックでの既知点計測が必要となり、どうしても個人差による誤差が含まれるからである。

これらのことを考慮して計測を行った結果を図4に示す。カメラ間距離(カメラ-レーザー間距離)は50cm、計測器と平面板の距離は120cmである。

2つのカメラの各ラスタ座標を取得し、合計4個の座標データ(u_1, v_1, u_2, v_2)から三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ーの u 座標を取得し、合計3個の座標データ(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、平面板の角度が大きくなると、照射されたレーザー光の形状が楕円形状となるため、計測点を正確に照射することが難しくなり、カメラ画像上でもレーザー光位置を特定することが難しくなることも奥行き方向の精度に影響が出るものと考えられる。

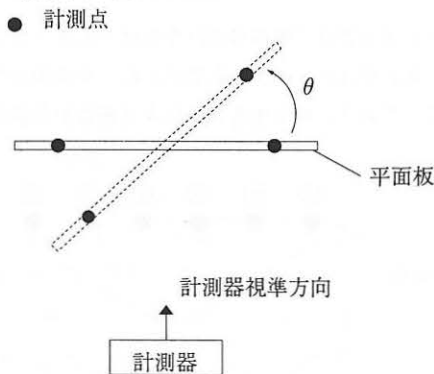


図3 奥行き方向の精度を検証するための計測

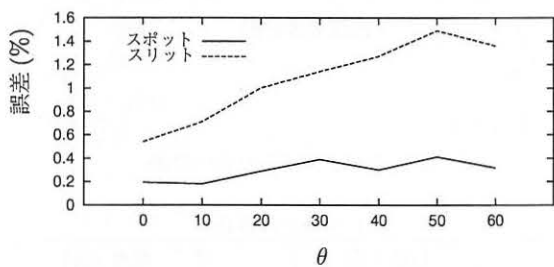


図4 計測精度に及ぼす奥行きの影響

3.3 計測環境と計測時間

本実験及び計測は、東京大学生産技術研究所にて行った。計測環境は、CCDカメラでレーザー光を見えやすくするため、部屋を暗くして計測を行った。計測時間は、スリットレーザー投影法は約3分、スポットレーザー投光法は約20分である。ちなみに、呂・川口らはレーザー変位計を用いた計測を行ったが、計測時間は約3~5時間程度費やしている。

3.4 CCDカメラと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-レーザー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の理論値

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

4 張力膜のしわ計測への応用

4.1 膜モデル

本実験で用いた膜モデルの形状を図5に示す。平面矩形膜ABCDのAB端及びCD端を固定し、CD端の x 方向に面内引張力を与える。荷重を与える端部では、引張方向のみローラーとして、 y 方向には完全固定する。AC及びBD端部は拘束なしの自由状態である。

本実験においては、膜材に直交異方性のコーティングされたC種膜材料を用い、図5に示すアスペクト比1:3の寸法の膜を用いた。材料特性を表3に示す。

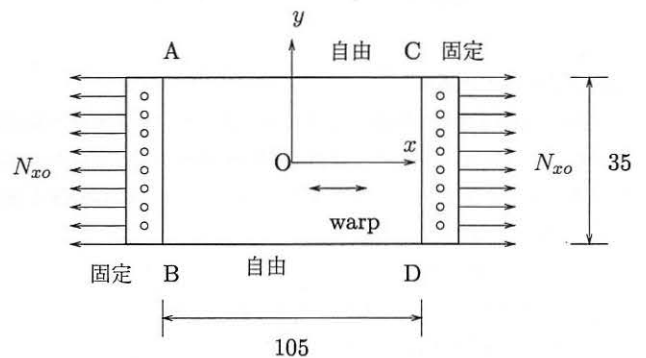


図5 膜モデル(単位:cm)

表3 膜材の材料特性

材料名称	C種膜材料
厚さ(cm)	0.061
E_1t (Kgf/m)	24300
ν_{12}	0.55
E_2t (Kgf/m)	22700
ν_{21}	0.51
G_t (Kgf/m)	2419

4.2 実験装置及び計測風景

東京大学生産技術研究所でのしわ計測に用いられている載荷装置⁵⁾の平面図および側面図を図6に示す。実験装置は、長さ3.0m、幅0.83m、高さ0.95mである。膜材料の一方の固定端部を2つの小型引張型ロードセルと接合し、膜材料の張力を計る。反射側の固定端部分にはワイヤーロープを通じて、ラチェットウィンチにより面内引張荷重を載荷する。試験体は最大2tまで載荷可能である。載荷方向にはローラー支持とし、側境界は拘束しない。本実験では、試験体の初期引張状態が、しわの発生に大きな影響を与える。初期固定時にしわが発生すること及び引張時に試験体の両端部が滑ることを避けるため、初期のセッティングは慎重に行わなくてはならない。本計測装置を用いた張力膜のしわ計測風景を写真4に示す。

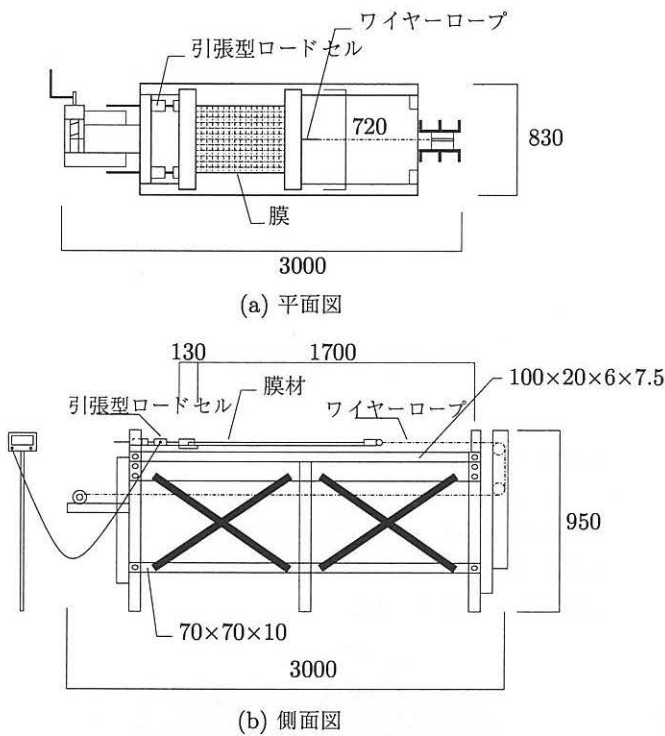


図6 実験装置の概要図 (単位:mm)

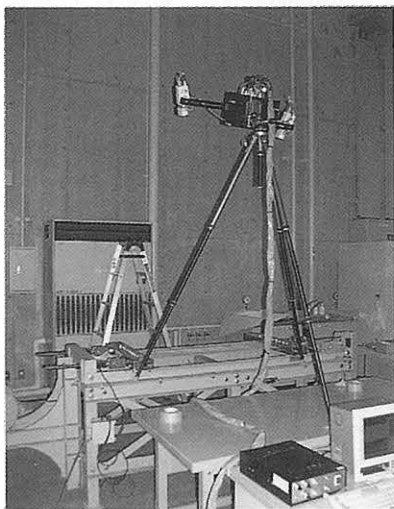


写真4 計測風景

4.3 膜の三次元計測

本計測では、スリットレーザ投影法およびスポットレーザ投光法の2種類の計測法を用いて膜のしわの計測を行った。計測範囲は、C.L.(Center Line)から左側に350mmの位置を始点とし、右側に350mmの位置を終点として、350×700mmを計測範囲としている(図7参照)。三次元計測器は、図8に示すように設置した。

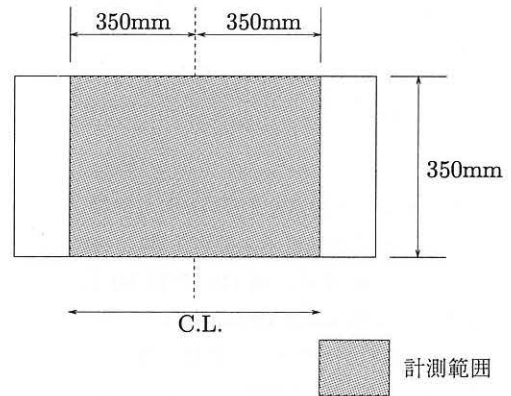
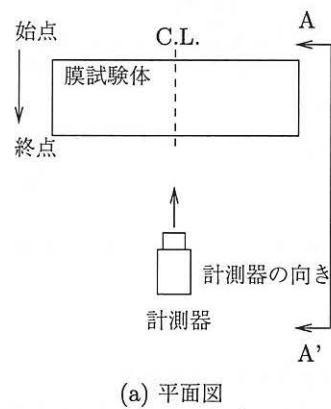
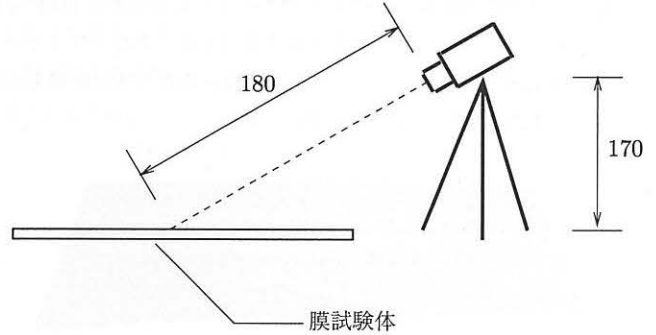


図7 計測範囲



(a) 平面図



(b) 側面図

図8 計測器設置状態 (単位:cm)

4.3.1 スリットレーザ投影法を用いたしわ計測

スリットレーザ投影法による計測では、計測取得点数77514点、計測ライン357ライン(1.96mm間隔)の三次元データが得られた。データ取得方法は、図9に示すように各ラインごとに始点から終点までの三次元データを取得し、スリットラインを左端(1)から右端(357)まで移動させて三次元データを取得した。

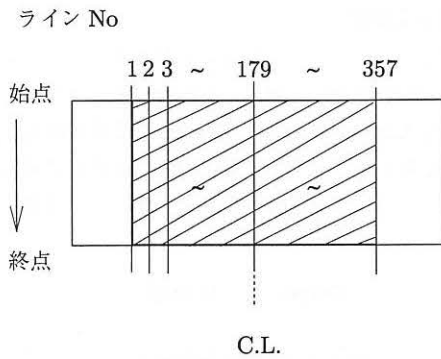


図9 スリットレーザ投影法の計測順序

4.3.2 スポットレーザ投光法を用いたしわ計測

スポットレーザ投光法による計測法では、計測取得総点数 2220 点、計測点列は、横 15 点、縦 148 点 (図 10 参照) の三次元データが得られた。取得順序は図 10 に示すように、横方向に計測し、最後の 15 点目まで計測すると、次の段に移る。これを順次繰り返して計測を行った。レーザ光移動ピッチは、照射角度によるが、計測対象面上で横方向約 50mm、縦方向約 2.38mm である。

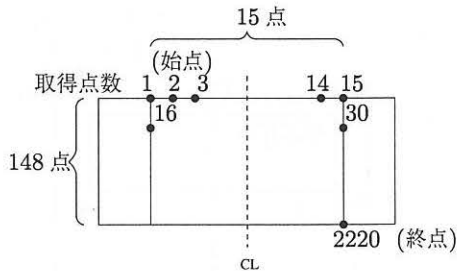


図 10 スポットレーザ投光法の計測順序

5. 計測結果

5.1 スリットレーザ投影法による結果

前述の 2 方法の計測方法により得られた三次元座標を DXF 変換して得られる、サーフェイス表示図を図 11 に、また、ワイヤーフレーム表示図を図 12 に示す。さらに、得られた三次元座標を点群として、凹凸面着色した図を図 13 に示す。

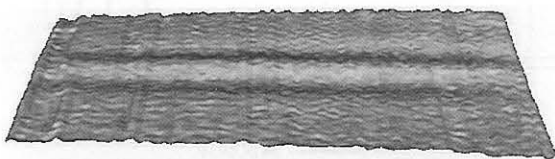


図 11 サーフェイス表示図

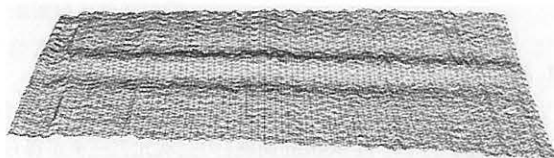


図 12 ワイヤーフレーム表示図

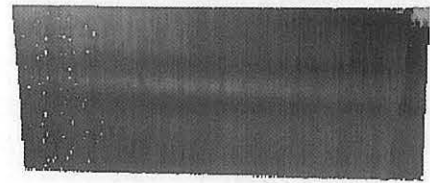


図 13 凹凸面着色表示図

5.2 スポットレーザ投光法による結果

スリットレーザ投影法の凹凸面着色図 (図 13) と同様、スポットレーザ投光法により得られた三次元座標を点群として、点群表示図を図 14 に示す。



図 14 点群表示図

5.3 膜しわの断面形状

呂・川口らがレーザ変位計を用いた結果を以下に示す。図 15 は、レーザ変位計を用いて求めた全点をワイヤーフレーム表示したものである。図 16 は、膜の中央部分のしわの三次元データからしわ断面図を作成したものである。

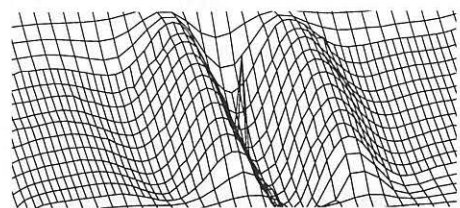


図 15 ワイヤーフレーム表示 (レーザ変位計)

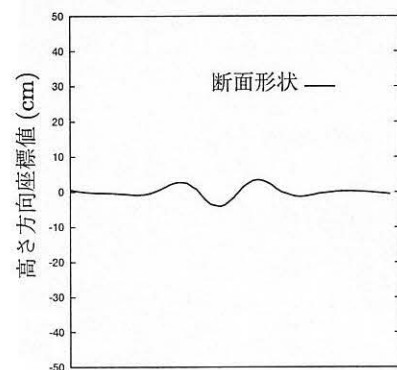


図 16 レーザ変位計によるしわ断面

スリットレーザ投影法による計測データは、各ライン平均約 217 点のデータ数である。全データから得られる平均平面から中央部分におけるラインの三次元データとの距離を算出して得られる横断面図を図 17 に示す。

スポットレーザ投光法による計測データは平均平面からの計測データの縦 1 列 (144 点) の距離を算出している。スポット計測データの縦 1 列の点数は 148 点だが、端部がノイズとして求められていたので、始点側 2 点と終点側 2 点の計 4 点を削除した。図 18 はスポットレーザ投光法による計測結果の中央部分におけるしわの横断面図である。

図 16 ~ 図 18 の各横断面図を重ね合わせて表示したものが図 19 である。いずれの計測方法もほぼ同じ結果を示していることがわかる。

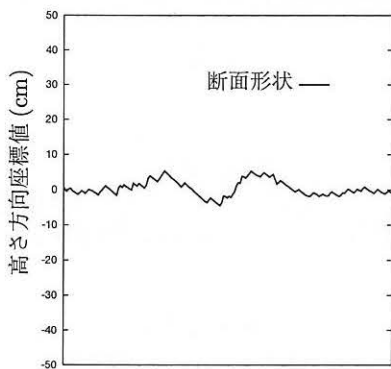


図 17 スリットレーザ投影法によるしわ断面図

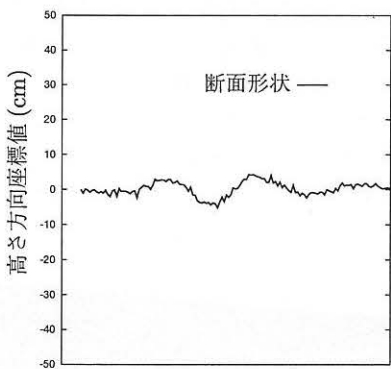


図 18 スポットレーザ投光法によるしわ断面図

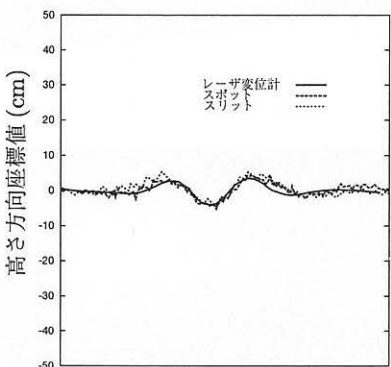


図 19 3 種の計測手法の中央部分におけるしわ断面図

6 計測結果の考察

本研究では、平面矩形膜材料が一方向の引張力を受けた時のしわの発生状態を、スリットレーザ投影法やスポットレーザ投光法を用いて計測し、レーザ変位計による計測データとの比較を行った。

本計測データを分析する際、スリットレーザ投影法によるしわ断面のデータを 1 ライン取り出し表示させたところ、図 20 のようにライン上の計測点の相対する奇数点と偶数点が、ほぼ鉛直方向に交互にずれるという問題が出ていることが分かった。

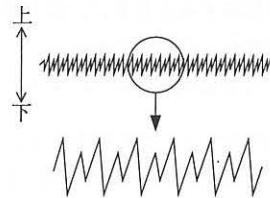


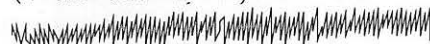
図 20 スリットレーザ投影法でのライン出力

本計測装置のスリットレーザ投影法では、カメラで見たときの画像上でのレーザ光の 2 次元座標とレーザ光照射角度から三次元座標を算出している。この際、カメラで見たときの画像上でのレーザ光の 2 次元座標は、カメラの解像度によるため、カメラ画像上でのレーザ光位置と実際のレーザ光位置とのずれにより誤差が生じる。この誤差は、カメラを用いた非接触型の計測器では必ず生じる問題である。

本計測装置ではカメラ画像上に映し出されたレーザ光の画素を全て取り出し、その重心をレーザ光位置とすることにより、カメラの解像度を仮想的に実数補間し誤差の発生を抑えている。しかし、計測器と対象物の距離間を大きくするほど、レーザ光が映し出される画素数が少なくなり、すなわち、重心をとるための画素数が十分にとれなくなるので、実際のレーザ光照射位置とカメラ画像上で特定したレーザ光位置の誤差が大きくなってしまふ。計測距離 180cm に対し、カメラレーザ間距離 50cm とした今回の計測データでは、そのような影響を大きく受けてしまったと考えられる。

1 ラインの計測点はカメラの 1 画素単位で取得するため、誤差が奇数点と偶数点で膜奥行き方向に規則的に前後しているため、今回は相前後する奇数点の座標と偶数点の座標の平均をとり、仮想計測値として再度出力し評価した (図 21 参照)。

(平均前の実際のデータ)



(平均後のデータ)

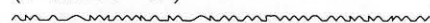


図 21 データ処理前後

レーザ変位計による計測は、計測精度が安定しており信頼性が高いが、計測点すべてを手作業により行うため、200 点程度の計測でも 2 時間以上かかってしまう。それに比べ本計測装置は、5000 点程度の点を 10 秒以下で計測でき、計測開始から終了までプログラム上で自動化しているため、非常に高速で簡易である。また両計測データより、しわの断面形状の凹凸を三次元 CG 表示することにより、本三次元計測装置でもレーザ変位計と同等の計測データが取得できることが確認できた。

また、カメラレーザー間距離を 50cm から 100cm 程度まで広げれば、奥行き方向の精度が改善され、前述した計測データの問題点が緩和できるものと考えられる。さらに、高解像度の CCD カメラ等を用いれば、重心を取るための画素数が十分に取れ、より高精度の信頼性の高い計測データが取得できるものとする。

7 まとめおよび今後の課題

本研究では、可搬・非接触型の三次元計測装置を試作開発し、精度や使用性について検討するとともに、張力膜のしわ計測への適用可能性について考察を行ったものである。

本研究で得られた結果は以下のようにまとめられる。

1. 本計測装置でのスポットおよびスリットレーザー計測法による張力膜のしわ計測は、レーザー変位計による結果と比べ、精度は劣るものの、格段に短い時間で計測することができ、計測装置として十分実用可能だと考えられる。
2. 本計測システムのスリット計測の特徴(データが規則的なばらつき)を発見でき、それにより、ソフトの面から処理することにより、しわ断面を算定することができた。
3. 本計測装置は、可搬・非接触型であるので、現場計測が可能である。
4. 本計測装置は、短時間で計測することができるので、クリープやリラクゼーションの測定にも利用可能であると考えられる。

今後の展望としては、三次元計測と FEM 要素分割アルゴリズムと FEM 解析を利用して、異方性膜を含めたしわ発生時に生じる応力・変形、振動解析を行なう予定である。

既に、東京大学で行われている実験装置に類似した張力膜載荷装置を製作した(写真 5)。生研の実験装置と異なるのは、鉛直面に膜を設置することである。これは、本計測装置は任意方向の計測が可能であるが、膜を水平面に設置すると、計測器を高位置に設置する必要があるため、鉛直面に設置にした。

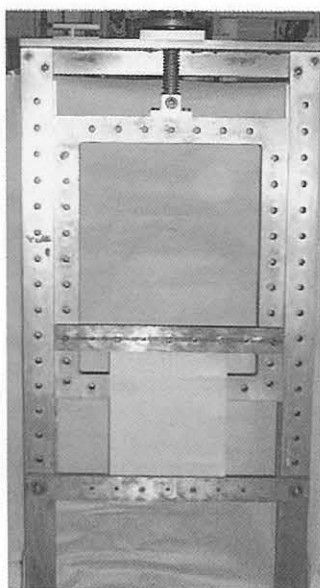
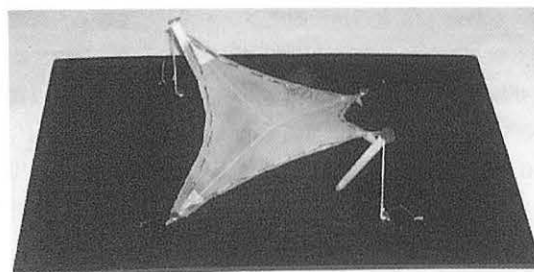
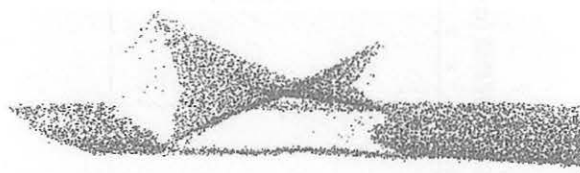


写真 5 載荷装置

さらに、張力矩形膜のみならず、一般的な膜構造の研究を行っていく予定である。図 22 はサスペンション膜模型とその計測結果の点群表示図である。連続的に変化するサスペンション膜の面形状は滑らかな曲面であるので、しわの三次元計測よりもはるかに精度よく計測することができる。



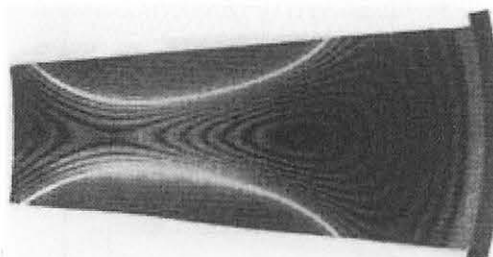
(a) 模型



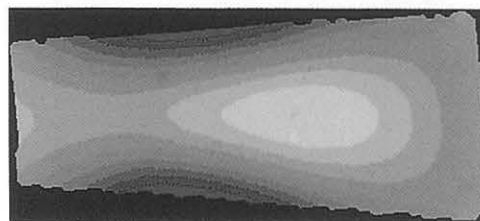
(b) 点群表示

図 22 サスペンション膜構造

図 23 は薄肉円すい曲面板の振動モード図(8次)を図示したものである。(a)はレーザーホログラフィの時間平均法により得られた振動モード、(b)は薄肉円すい曲面板を三次元計測し、計測データから FEM メッシュ分割し、汎用 FEM コードを用いて自由振動解析した結果から得られたものである。両モード図はよく一致していることがわかる。また、固有振動もよく一致している。この解析システムは、膜構造の応力・変形、振動解析へ応用することができる。

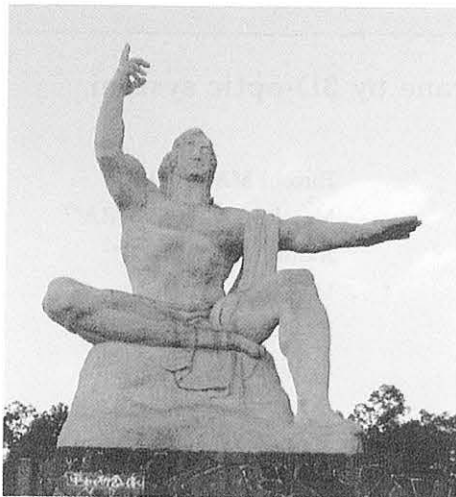


(a) 実験結果 (レーザーホログラフィ装置)

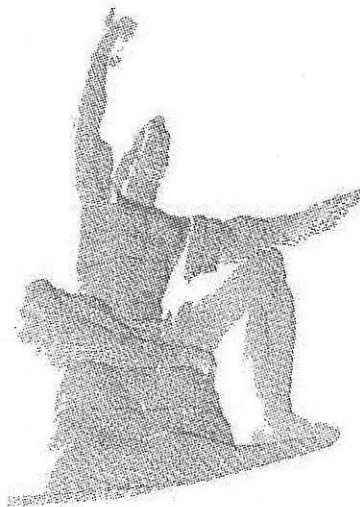


(b) 三次元計測 + FEM 解析結果

図 23 薄肉曲面板の振動モード図(8次モード)



(a) 平和祈念像の写真



(b) 計測データの回転表示

図 24 大型建造物の三次元計測例

さらに、キャリブレーション法を工夫すれば、大型建造物も計測可能である。図 24 は、長崎市の平和祈念像の計測結果である。

したがって、本三次元計測装置と計測データの利用法は、膜構造の研究・開発に有用なものと考えられる。今後は、さらに計測から解析まで、自動化できるようなシステムを構築していく予定である。

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助教授にご指導・ご助言を戴きました。また、大石裕介君、首藤かおり君(長崎大学工学部 4 年生)には、計測およびデータ整理にご協力戴きました。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: 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: 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) 呉 明児, 大森 博司, 岡田 章, 鈴木 俊男, 半谷 裕彦, 本間 俊雄, 真柄 栄毅, 八木 孝憲, 山本 千秋, 呂 品琦: 張力構造
- 2) Siegfried Gaß : Experimente, IL25, 1990
- 3) 例えば, 大森博司: 張力構造の解析, 第 9 回「シェル・空間構造」セミナー, pp.92-102, 2000. 膜材料の非線形性と異方性を考慮した膜構造物の応力・形状最適化, 膜構造研究論文集'98, No.12, pp.1-9, 1998.
- 4) 呂 品琦, 半谷裕彦, 川口 健一: 矩形張力膜のしわ解析, 膜構造研究論文集'98
- 5) 呂 品琦, 川口 健一: 平面矩形張力膜のしわ発生に関する実験的研究, 膜構造研究論文集'99
- 6) 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測, 昭晃堂,1990.
- 7) 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.
- 8) 和田真禎, 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.
- 9) 和田真禎, 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.
- 10) 松田浩, 和田真禎 ほか: 3D 計測によるコンクリート打継部及び曲面の振動解析に関する研究, 応用力学論文集(土木学会), Vol.3, pp.115-124, 2000.
- 11) 仲村政彦, 松田浩ほか: 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土木構造・材料論文集(九州橋梁構造工学研究会), 第 16 号 2000 (印刷中).
- 12) 松田浩, 小嶋悟ほか: 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, 鋼構造年次論文集, Vol.8, pp.595-602, 2000.

Measurement of wrinkling tensioned membrane by 3D-optic system

Hiroshi MATSUDA*¹
Masahiko NAKAMURA*²
Akira YAMAMOTO*²
Masayoshi WADA*³
Ken'ichi KAWAGUCHI*⁴
Pinqi Lu*⁵

SYNOPSIS

In order to measure the surface of membrane and shell structures three-dimensionally, noncontact and portable 3D-optic measuring system has been 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, we measured wrinkling tensioned membrane, and then examined about the accuracy of measurement results.

*1 Assoc.Prof.,Dr.-Eng.,Nagasaki University

*2 Bridge and Computer Engineering Co.,Ltd.

*3 Graduate Student,Nagasaki University

*4 Assoc.Prof.,Ph.Dr.-Eng.,Institute of Industrial Science, University of Tokyo

*5 Graduate School of Engineering, University of Tokyo