

膜の動的変形を対象とした画像計測システムの構築

東京大学大学院	学生員	熊野史朗
東京大学大学院	正会員	阿部雅人
東京大学大学院	フェロー会員	藤野陽三
山梨大学	正会員	吉田純司

1. はじめに

膜構造は軽量で収納性が高いため、ドーム型構造物や宇宙空間におけるソーラーセイルなどの大規模構造物に広く利用されている。そのため以前から、数値計算により膜の挙動を予測する試みがなされている^{1),2)}。しかし、これまで大変形する膜の変形場を計測する手段がなく実験データが希少である。このことから、これらのモデルは定量的に検証されておらず、解析のみで設計を行うほどの十分な精度を有していない²⁾。そこで本研究では、膜の動的な挙動を定量的に把握するための画像計測システムを構築することを目的とする。

2. 画像計測システム

本研究では、膜を1辺あるいは2辺で固定し、風力を与えることによって変形させ、それを3次元的に計測する実験を行った。風力はファンによって発生させ、膜に作用する平均風速を簡易風速計によって測定している。膜には、膜上の点を互いに区別するためにスプレーによってランダムな模様を付けている。画像は高解像度 CCD カメラにより撮影し、レイドシステムを採用したハードディスクに直接記録している。照明用の電源には直流電源を使用している。これは、交流電源での照明の点滅による膜の輝度の変化を生じさせないためである。本画像計測システムの精度に関しては、レーザー変位計により膜のある一点の変位を計測し、これを画像解析によって算出された変位と比較することにより検証している。また、得られた3次元座標を元に、有限要素法を用いたハイブリッド解析により内力を算出している。その精度については、膜の変形により境界部に作用する荷重を治具に取り付けたロードセルにより測定することで検証している。

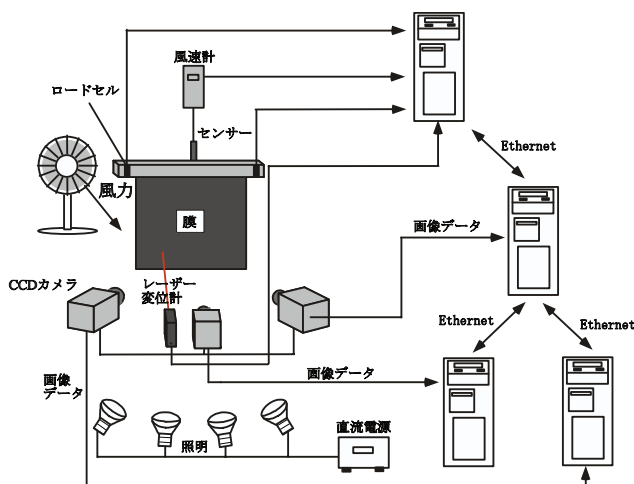


図-1 本計測システムの全体図

図-1 に本計測システムの全体図を示す。

3. 画像計測およびハイブリッド解析手法

1) 画像計測手法

膜の3次元画像計測は下記の①～④の手順によって行う。

①膜の変形計測

風力を当てたなびかせた膜を、正面および左右に設置した3台のCCDカメラにより撮影する。以下、各カメラによる画像を、正面画像、左画像および右画像と呼ぶ。

②カメラ標定³⁾

各カメラの位置と方向を同定するためにカメラ標定を行う。標定は、黒色の鋼板に白色点を描き、板を面外方向に移動させ3次元的に分布させたものを使用した。

③3次元回転マッチング

変形前の膜のある正面画像をテンプレートとし、各時刻の左右画像それぞれに対してマッチングを行うことで、左右画像の対応点を探索する。ただし、通常のマッチングは2次元で行われる⁴⁾が、これでは動的かつ大変形する膜は正しくマッチングされない。そこで、本研究では、通常のマッチングに3次元回転を加えた3次元回転マッチングを開発し、それを適用している。図-3に3次元回転マッチングの概要を示す。また、マッチングにおける評価手段には相関法を用いている。

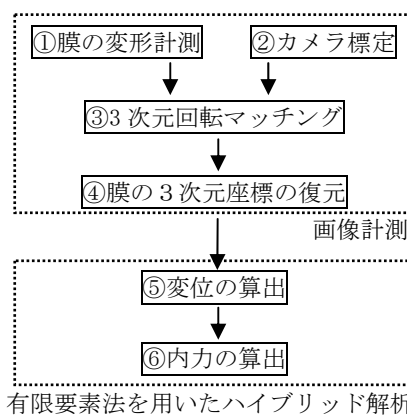


図-2 画像解析およびハイブリッド解析の手順

④膜の3次元座標の復元

得られた対応点の画像座標を用いて射影方程式を解き、3次元座標を算出する。

2) ハイブリッド解析手法

⑤変位の算出

画像解析により得られた膜の3次元座標を変位に変換する。

⑥内力の算出

変位を初期値とし、有限要素法⁵⁾を用いて、ひずみ場、応力場および内力を順次算出する。ここでは、膜モデルとしてアイソパラメトリックシェル要素を用いることとした。

以上の手法の手順を図-2 にまとめて示す。

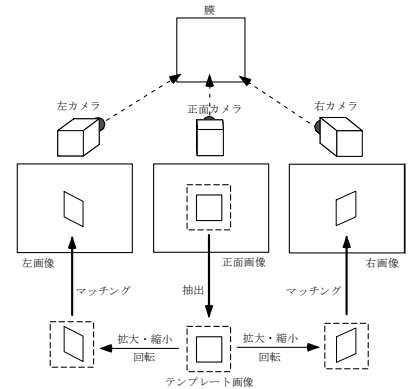


図-3 3次元回転マッチングの概要

4. 計測結果と考察

矩形の膜を一边固定の境界条件により支持し、ファンによる風力を作用させて大变形させ、その変形を本文2節で示した計測システムにより計測した。図-3にある時刻における膜左画像を、図-4にその3次元座標を復元した結果を示す。また、この3次元座標をもとに有限要素法に用いたハイブリッド解析により算出した内力分布を図-5に示す。次いで、ある1点における画像計測における変位とレーザー変位計による変位を比較した結果を図-6に示す。ここでの誤差は数%であり、3次元座標復元に関しては良好な精度であると言える。一方、内力に関しては、治具との境界部に作用する力を比較したところ、図-7に示すように解析値が測定値の5倍程度となった。これは、画像計測における数%という誤差が、ひずみのオーダーよりも大きく、ひずみが過大に算出されたためであると考えられる。内力および外力の算出には、画像計測の精度をより向上させる必要がある。

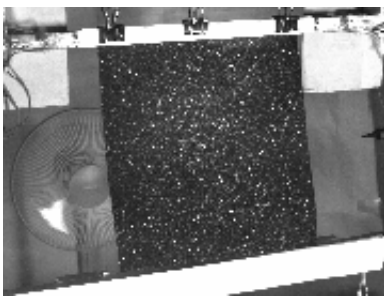


図-3 膜左画像

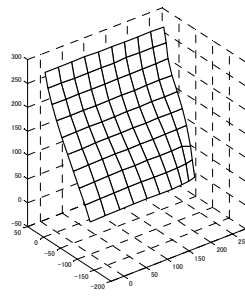


図-4 復元した膜の3次元座標

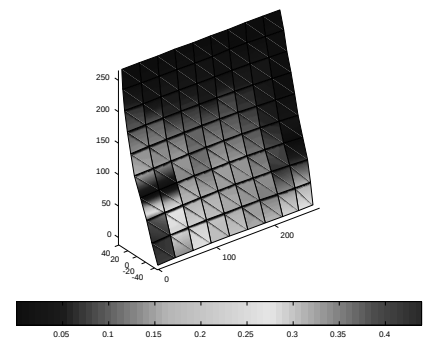


図-5 膜の内力分布

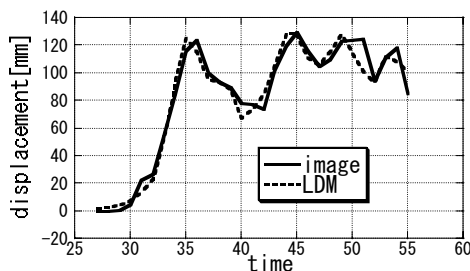


図-6 画像解析およびレーザー変位計による変位

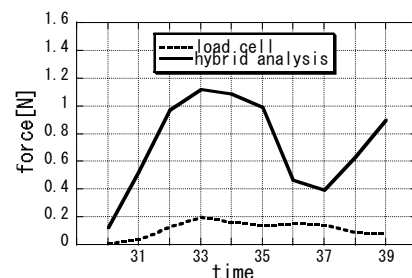


図-7 ハイブリッド解析およびロードセルによる境界部に作用する力

5. まとめ

本研究では、膜の動的な変形を計測するための3次元画像計測システムを構築することを目的とした。具体定には、風力により振動する膜の計測実験を行い、その動的挙動を精緻に復元するための計測システムおよび解析手法を構築した。また、それによって得られた膜の3次元座標をもとに、膜の内力分布を得るためのハイブリッド解析手法を提案した。現在のところ、膜の3次元座標は精度よく復元可能であるものの、ハイブリッド解析による内力復元の精度については十分とは言えず、このような解析に適用するためにはシステムの改善および画像機器の性能の向上が必要である。

参考文献： 1) 張衛紅：膜構造の座屈後解析に関する研究，博士論文，東京大学大学院工学系研究科機械情報工学専攻，2001。 2) 成澤泰貴：膜の挙動解析のための要素モデルに関する研究，修士論文，東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻，1998。 3) 西野耕一：PIVハンドブック，森北出版。 4) 徐剛，辻三郎：3次元ビジョン，共立出版，1998。 5) 久田俊明，野口裕久：非線形有限要素法の基礎と応用，丸善，1996。