

PS-8 画像解析法を用いた高揚力複合帆の計測と空力弾性評価

構造安全評価系 * 高見 朋希
 構造基盤技術系 藤本 修平
 流体性能評価系 田原 裕介

1. 緒言

近年、環境負荷の低減、とりわけ地球温暖化ガス排出量の削減を目的として、次世代型帆装船が注目されている。これに伴い、著者らは優れた推進性能を可能とするため硬帆及び軟帆を有する高揚力複合帆を提案し、また軟帆部の大変形（空力弾性）を考慮した性能予測が可能な流体構造連成（FSI）ツールを開発している。一方で、実用化に向けては大変形の正確な予測に基づいた FSI ツールの整備と計測技術の確立が重要となる。

本研究では、Structure from Motion (SFM) 法及び Patch-based Multi View Stereo (PMVS) 法を用いた画像解析を適用した、高揚力複合帆軟帆部の大変形に対する計測法を提案し、風洞試験によってその検証を行った。また得られた結果と FSI ツールを用いたシミュレーション結果を基に、高揚力複合帆の空力弾性影響についての考察を行った。

2. 高揚力複合帆の変形計測

2.1 画像解析法

本研究では、風洞試験時に風圧を受けて変形する軟帆の変位計測法として、複数枚の画像群から 3 次元復元を行う画像解析法を適用した。本手法により、従来の 3D スキャナやレーザー計測法と比較して計測に要する工数及び必要機器の調達コストの削減が見込まれる。手法としては、画像群からカメラ位置の逆推定を行って特徴点の抽出を行う Structure from Motion (SFM) 法¹⁾、及び得られたカメラ位置等のパラメータから高密度の点群を生成する手法である Patch-based Multi View Stereo (PMVS) 法²⁾を用いた。SFM/PMVS の実行はフリーソフトウェアである VisualSFM を使用し、点群データを取得後はポスト処理として不要な点群データを削除し、軟帆部だけの点群データを抽出した。図-1 に全体フローを示す。

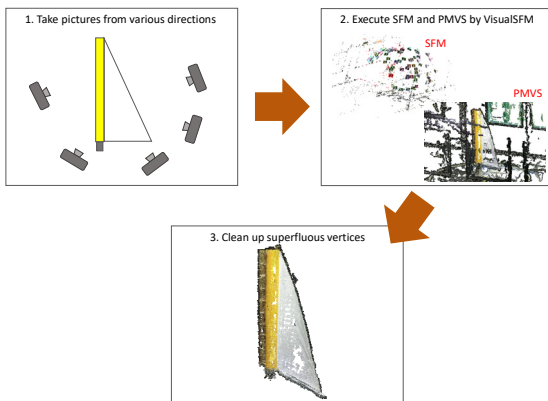


図-1 画像解析法ワークフロー

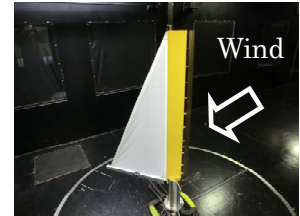
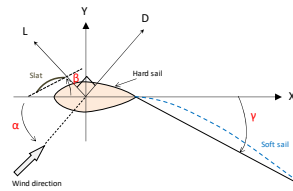


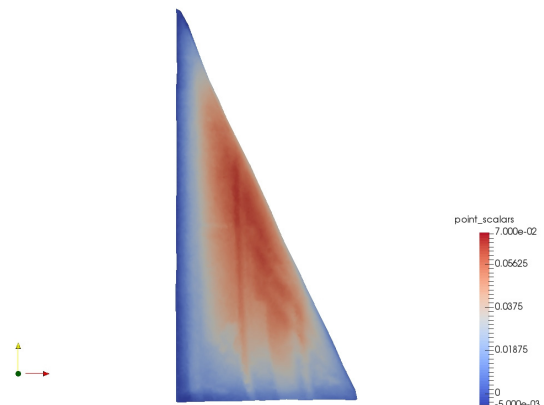
図-2 高揚力複合帆模型概要

2.2 風洞試験

2.1 に示した SFM/PMVS を用いた変形計測法の検証として、高揚力複合帆（三角帆）模型の風洞試験を実施した。高揚力複合帆模型の概要図を図-2 に示す。図-2 左図は模型の上断面図と各パラメータを示し、風向きを α 、スラット角を β 、ブーム角を γ とする。 β 及び γ の設定角については、過去の実測値³⁾を参照し高揚力値を記録した設定条件として、それぞれ $\beta=30\text{deg}$ 、 $\gamma=20\text{deg}$ とした。風洞試験は海上・港湾・航空技術研究所の所有する変動風水洞で実施し、風速は 8m/s ($Rn=5.3 \times 10^5$) の一定速として軟帆の変形が定常状態となった時点での軟帆の変形を計測した。

2.3 検証結果

SFM/PMVS 法の検証のため、3D スキャナを用いた計測結果との比較を実施した。3D スキャナは、FARO Laser Scanner Focus3D（範囲誤差： $\pm 2\text{mm}$ ）を使用した。図-3 には軟帆部の SFM/PMVS と 3D スキャナについて、風向き $\alpha=30\text{deg}$ における変形量の計測結果の比較を示す。図-3 中のコンター図は変形量（図中奥行き方向）を示している。図-3 より、SFM/PMVS による計測結果は 3D スキャナによる計測結果と比較してほぼ同程度の計測精度を有しており、変形計測手法としての実用性が確認できた。



(a) 3D scanner

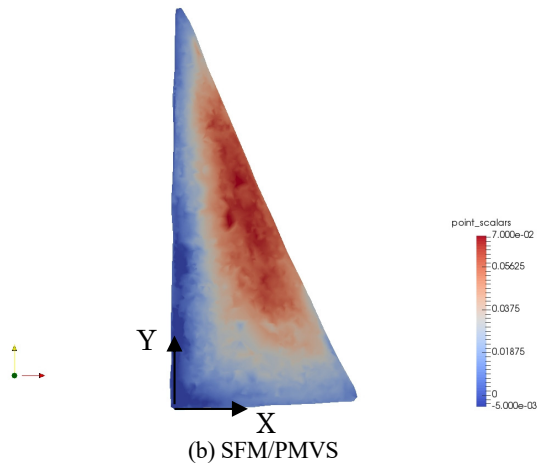


図-3 3D スキャナと SFM/PMVS 法による変形計測結果の比較

3. 空力弾性評価

著者らは、高揚力複合帆の流体性能評価法として、CFD (NAGISA V.2) と FEM を連成させたシミュレーションシステムを開発している⁴⁾。本システムでは CFD による流体力計算と FEM による変形計算を双方向に連成させることにより、軟帆部が大変形した状態における流体力変化を評価することができる。

3.1 SFM/PMVS 計測結果の CFD へのフィードバック

シミュレーションシステムの検証及び軟帆部の大変形による流体力変化(空力弾性影響)を実施するため、2.で検証を実施した SFM/PMVS による軟帆変形の計測結果を用いて変形帆の CFD モデルを作成した。軟帆部の CFD メッシュの作成には、SFM/PMVS 結果の軟帆部の点群データを抽出し、逐次 2 次計画法 (SQP 法) を適用して変形形状の関数近似を行った。軟帆部の近似関数は帆の境界条件を考慮し、以下の式とした。

$$fc(x, y) = a_1x + a_2xy + a_3x^2 + a_4x^2y + a_5xy^2 + a_6x^3 + a_7x^3y + a_8x^2y^2 + a_9xy^3 + a_{10}x^4 \quad (1)$$

(1)式により軟帆曲面を抽出したモデルを用いて CFD 解析を行い、変形の実測値に基づく流体性能評価を実施した。

3.2 空力弾性影響についての考察

図-4 に揚力係数 CL 及び抗力係数 CD の風洞試験結果との比較を、変形前の CFD 計・算結果(図-4 中 _initial)、SFM/PMVS をフィードバックした CFD 計算結果(図-4 中 _SFM/PMVS)、及び CFD-FEM 連成シミュレーションによる計算結果(図-4 中 _FSI) について示す。CFD-FEM 連成シミュレーションは連成ループを 3 回実行した結果を示している。図-4 より、抗力係数 CD については、CD_FSI、CD_SFM/PMVS の値と CD_initial の値はほぼ変化しておらず、帆の空力弾性影響は少ないことが伺える。一方で、揚力係数 CL については、CD_FSI、CD_SFM/PMVS の値と CD_initial の値に変化が現れている。このことから、揚力係数 CL については、本研究で実施した設置条件の元で空力弾性影響が大きく現れていることが確認できる。また、変形を考慮していない場合の CFD 計算結果は風洞試験結果と比較して低い値を算出している一方で、SFM/PMVS 計測結果をフィードバックして軟帆変形を考慮した CFD 解析結果は実験値に近い値を示していると同時に、CFD-FEM 連成計算も SFM/PMVS の

フィードバック結果と同程度の値を算出できることが確認された。さらに、本研究で用いた三角形複合帆の場合、図-4 より、風向き α が 20deg~30deg 程度の場合に軟帆変形による揚力上昇率が最も高いことが確認できた。

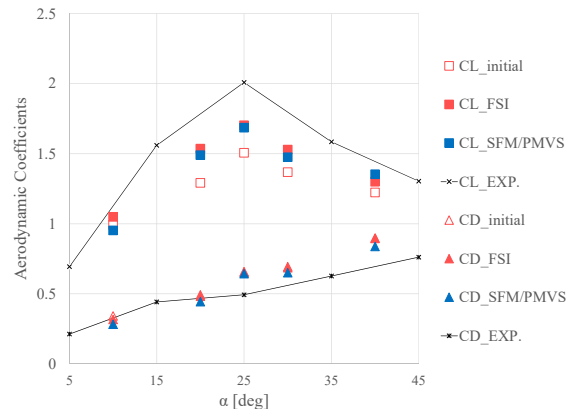


図-4 空力係数の実験値との比較

4. まとめ

本研究では高揚力複合帆の変形計測法として、画像解析法の一つである SFM/PMVS 法を適用し、風洞試験と 3D スキャナでの計測結果との比較によりその精度検証を行った。結果、SFM/PMVS 法は 3D スキャナと比較して同程度の計測結果を得ることが確認でき、画像群のみから測定可能な簡易な 3 次元形状計測法が有用であることを示した。また、SFM/PMVS 計測のフィードバック結果と著者らの開発した CFD-FEM 連成シミュレーションシステムを用いて、高揚力複合帆の流体性能を算出し、本研究で実施した実験状態において、軟帆の変形による揚力上昇を確認することができた。

今後は高揚力複合帆を構成する様々な主要パラメータを変化させた場合の各パラメータの感度検証や、実船状態を想定した複数帆問題に対しての SFM/PMVS 法を用いた形状計測法の適用及び空力弾性影響の調査が必要と考えられる。

参考文献

- 1) Johannes L. Schönberger, Jan-Michael Frahm : Structure-from-Motion Revisited, Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016.
- 2) Yasutaka Furukawa, Jean Ponce : Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence Volume: 32, Issue: 8, pp. 1362 – 1376, 2010.
- 3) 上野道雄, 藤原敏文, 二村正, 南佳成, 北村文俊, 辻本勝, 平田宏一, 宮崎英樹, 竹川正夫, 中山一夫, 一色洋, 藤田裕: 次世代型帆走船の基礎的研究, 海上技術安全研究所報告, 第 4 巻, 第 6 号, pp. 1-94, 2004.
- 4) 高見朋希, 瀧本忠教, 田中義照, 田原裕介, 川北千春, 武田信玄: 帆走システムに関する流体構造連成解析法の開発, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 17 号, 2013, pp.57-60.