

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 15 日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760117

研究課題名(和文) 数値解析・実実験・最適設計融合手法の開発と羽ばたき翼による実証

研究課題名(英文) Development of design optimization approach with the fusion of experiment, numerical simulation and optimization methods

研究代表者

山崎 渉 (yamazaki, wataru)

長岡技術科学大学・産学融合トップランナー養成センター・講師

研究者番号：50598696

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、実験・数値解析・最適設計技術を融合させる手法を開発する事を主題とし、実験データと数値解析データを融合し高精度な性能予測モデルを構築する手法や、欠落を含む大規模実験データからその主要な構造を数値解析的な手法で抽出し、それを基に欠落データを再構築する手法の開発などを行った。開発した手法を用いる事で、実験と数値解析とを融合させた上での設計が可能となり、環境適合性の高い効率的な流体機械の形状をロバストに設計する技術を構築する事ができた。

研究成果の概要(英文)：In this research subject, the fusion of experiment, numerical simulation and optimization methods has been investigated. An experimental/numerical data fusion approach has been developed which can provide more accurate estimation model of the performance parameters of fluid machinery. A data reconstruction approach has also been developed which enables the reconstruction of gappy experimental data numerically by using the dominant structures of the gappy experimental data itself. Utilizing the developed approaches, design optimizations of fluid machineries with the fusion of experiment/numerical simulation are available, and then optimal configurations of fluid machineries can be designed efficiently/robustly.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：応答曲面法 Kriging 固有直交分解 粒子画像流速測定法 羽ばたき翼

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年の計算機性能の目覚ましい進展を基に、数値流体力学 (CFD) を用いた流体機械の最適設計技術は目覚ましい進歩を遂げた。この計算機上での流体機械設計は数値流体解析及び最適化手法や他分野 (構造・音響など) シミュレーションまでも含む高度な学際的研究領域であり、その工学的応用範囲も広い。この技術には、産業的な見地からは設計の自動化・設計コストの削減などが、学術的な見地からは工学的設計知見が効率的に蓄積できるといった特長がある。その一方で数値最適設計の難点としては、多大な計算コストが必要になる事があげられる。設計期間と計算負荷のバランスを考慮すると、計算格子解像度に制約を加えたり、計算負荷の低い簡易な物理モデルを用いて性能評価を行わざるを得ない事になりうる。

(2) 例として顕著な乱流現象を含む流れ場での設計問題を考えると、工学的に意味のある最適設計を実現する上では、高精度物理 (乱流) モデルや高密度計算格子といった計算負荷の高い手段を性能評価に使用する必要がある。しかしながら、ある1つの形状での性能を評価するのに数日単位を要する規模の計算負荷となると、最適化手法の改良による性能評価回数の低減を目指すだけでは設計コストを現実的な範囲に抑える事は難しく、別の観点から最適化結果の有用性を保証できる技術の開発を目指す必要があると考えられる。

2. 研究の目的

(1) 実験データを数値解析及び最適化手法にフィードバックさせる要素技術を開発する事により上記の問題を解決する事ができると考えられる。実験データと数値解析データの融合により応答曲面近似モデルを構築する手法や部分的な流体実験データを基に数値流体解析データを再構築するような手法を開発する事で、数値解析単独ではその精度が不確かな条件においても高効率かつ高信頼性の最適設計が実現できるようになると考えられる。

(2) 本研究において開発する手法は任意の流体機械の設計に適用できるように高い自由度・汎用性を持たせる。ただし、本研究における主たる検討対象の1つとして羽ばたき翼による小型飛翔体を考える。羽ばたき翼小型飛翔体においては、その飛翔メカニズムや非定常流れ場構造など十分に解明されていない部分も多い。そこで本研究では独自の羽ばたき翼小型飛翔体を開発し、その周囲の流れ場の流体計測技術開発についても検討する。

3. 研究の方法

(1) 実験装置としては、独自の羽ばたき翼実験装置系を開発・拡張し、流体力により受動的に羽ばたき翼のフェザリング運動を実現する羽ばたき翼機構を構築した。フェザリング運動を加えた羽ばたき翼周りの非定常流れ場を粒子画像流速測定法 (PIV) により計測し、かつ固有直交分解 (POD) 手法に基づく数値解析的な PIV データの再構築技術を開発しフェザリング運動による非定常流れ場への影響を詳細に検討した。

(2) POD を活用した PIV 実験データと CFD 解析データの融合技術を開発した。CFD データから POD モードと呼ばれる流れ場の主要な構造を抽出し、かつ得られた PIV データに適した POD 係数を推定する事で、部分的な流れ場データである PIV データから流れ場全体のデータを再構築する事のできる手法を開発した。

(3) Kriging 応答曲面法に拡張を施し、複数精度性能値を援用する応答曲面最適化技術を開発した。開発した手法では、高次精度性能値の絶対値を参照しつつ、比較的 low コストで得られると想定できる低次精度性能値の変化傾向も参照した応答曲面モデルを構築する事が可能となる。高次性能値に実験データを、低次性能値に数値解析データを用いる事で実験及び数値解析により得られた性能値の融合近似モデルの構築が可能となった。また、この応答曲面モデルを利用して、設計条件の不確実な揺らぎを考慮しつつロバストな最適設計を効率的に実現する手法などについても提案を行った。

4. 研究成果

(1) 開発した羽ばたき翼実験装置の概略図を図1に示した。翼のセミスパン長及び翼弦長はそれぞれ 210[mm]、60[mm]である。DC モーターの出力を用いて、5[Hz]での羽ばたき運動を実現している。また、主翼の付け根部を回転自由に固定する事で、翼に加わる流体力により受動的に所定のフェザリング運動を行う羽ばたき翼装置に拡張した。一様流の無いホバリング状態において、異なるフェザリング運動の条件における非定常流れ場の PIV 計測を行い、羽ばたき翼周りの流れ場構造の解明を行った。図2は図1に示した 60% セミスパン位置での羽ばたき翼周囲の時間平均誘起速度を可視化したものである。フェザリング運動を導入する事で、鉛直下方及び羽ばたき翼後方への平均誘起速度の発生が観察でき、フェザリング運動の導入による揚力及び推進力の生成が間接的に確認された。

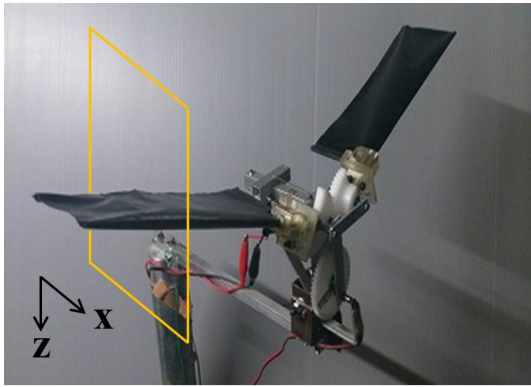


図1 羽ばたき翼実験装置

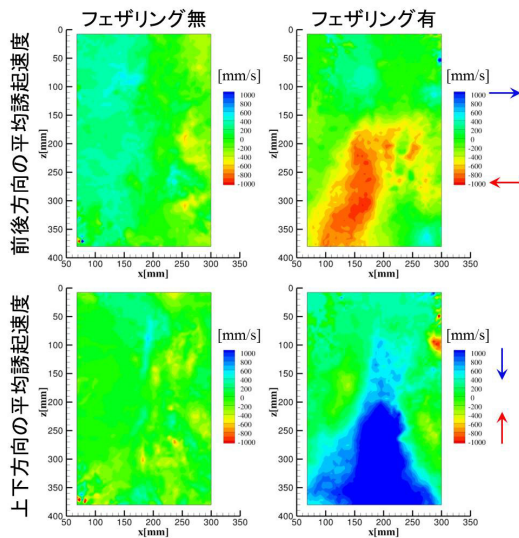


図2 PIV 計測により得られた
羽ばたき翼周囲の平均誘起速度分布

(2) 前項で示した PIV 計測においては、POD による数値解析的な再構築技術を併せて開発する事で、欠落を含む非定常 PIV データから計測領域全体のデータ再構築を実現した。ホバリング状態での非定常 PIV 計測においては空間中に粒子を均一に拡散する事は非常に難しいため、開発した手法は非定常流れ場計測をロバストに行う上で非常に有用である。この際に主要な設定パラメータとなる POD モード個数については交差検定手法を開発し解析する事で、再構築誤差が最小となる POD モード個数を決定できる事を示した。擬似的に欠落を追加した PIV データからの再構築についても結果を検討した所、全体の 90%以上の PIV データが欠落している場合においても、羽ばたき翼周りの非定常渦構造を定性的に正しく再構築できる事が示された。図3は羽ばたき翼が下死点にある時の瞬時渦度分布を示したものであり、羽ばたき翼上面側に発生する前縁渦（青色）・後縁渦（赤色）が定性的に正しく再構築されている事が確認できる。

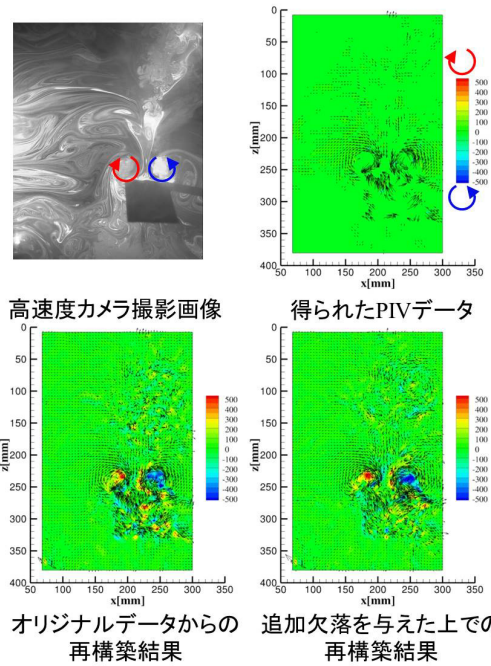


図3 非定常 PIV データの再構築結果

(3) 角柱後流の一部領域の非定常カルマン渦列を PIV 計測し、また同じレイノルズ数条件での 2 次元数値流体解析も実施した。POD により数値流体解析データから非定常流れ場の主要な構造を POD モードとして抽出し、かつ数値流体解析データと PIV データが近似的に合致するように POD 係数を決定した。POD モード個数の決定においては前項と同様の交差検定手法を開発し、再構築誤差が最小となる POD モード個数に設定した。これらの POD モードと POD 係数から流れ場全体を再構築する事ができ、実験データと数値流体解析データの融合による流れ場の再構築が実現された。実験データは流れ場の一部領域の速度データしかないが、POD モードを得る数値流体解析データには流れ場全体の速度データ及び圧力データが含まれる。そのため、本再構築手法では流れ場全体の速度分布及び圧力分布を推定する事が可能である。図4には得られた PIV データに基づいて流れ場全体の渦度場及び圧力場を再構築した結果の可視化図を示した。再構築により得られた圧力データから角柱に作用する非定常揚・抗力値を求めた所、他者の三次元非定常流体解析データと定性的に一致する妥当な結果を得ることができた。この結果は、二次元数値流体解析データに三次元流れの PIV データを融合する事で、三次元的な数値流体解析データを得ることができたと理解する事ができ、開発した融合技術の有用性を確認することができた。

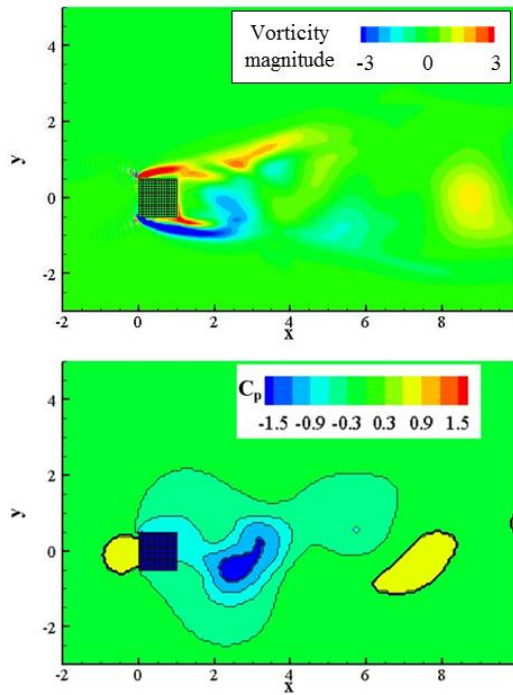


図4 PIV 実験データと数値流体解析データの融合による渦度場（上）及び圧力場（下）の再構築結果

(4) 開発した複数精度性能値を援用する応答曲面技術を用い、実験データと数値解析データを同時に参照した応答曲面モデルの構築を行った。ここでは実験データを高次精度性能値、数値解析データを低次精度性能値とすることで、実験データの絶対値と数値解析データの傾向に基づいて1つの応答曲面モデルを構築した。実験データには JAXA 遷音速風洞において得られた DLR-F6 翼胴形状の揚・抗力係数値を用い、同形状での数値流体解析データも取得した。これらの揚・抗力係数値を性能値データとして用いたが、数値解析データは絶対値としては実験データと差があるものの、その変化傾向としては実験データと定性的に一致している事が確認できた。一様流マッハ数・迎角・レイノルズ数の3変数のパラメータ空間において応答曲面モデルを構築し、その精度検証を行った。図5は得られた揚力及び抗力の近似モデルの可視化図であり、図中の球及び立方体がそれぞれ実験データサンプル点・数値解析データサンプル点を示している。複数精度性能値を援用した応答曲面法により、従来の単精度応答曲面法に比べ高精度な近似モデルを構築できる事が示され、開発した手法による実験・数値解析融合技術の有用性を確認する事ができた。その他にも粘性・非粘性流体解析の物理モデル差や計算格子解像度の粗密差で複数精度を定義した場合についても検討を行い、開発した応答曲面技術の多角的な有用性を確認した。

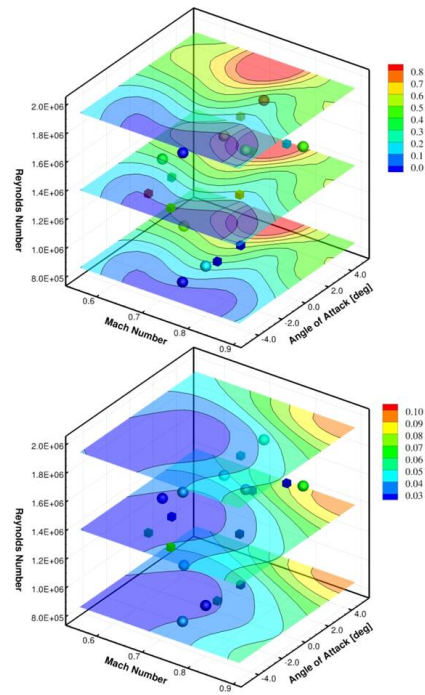


図5 実験データ及び数値解析データの融合による近似モデル可視化、上：揚力係数近似モデル、下：抗力係数近似モデル

(5) 開発した複数精度性能値を援用する応答曲面技術を用い、設計条件に揺らぎがある場合のロバスト最適設計手法を開発した。設計条件の揺らぎに合わせて応答曲面モデル上でモンテカルロシミュレーションをすることで、揺らぎに対する性能値の平均や標準偏差を評価した。この際、開発した応答曲面手法を用いる事で設計空間全域において高精度な応答曲面モデルを構築する事ができるため、結果としてモンテカルロシミュレーションの精度も向上し、より効率的なロバスト最適設計を実現する事ができた。図6にはその最適化結果の概略を示した。この最適設計においては巡航マッハ数 0.729 を（平均）設計条件としたが、加えてこの巡航マッハ数に標準偏差 0.05 の正規分布の揺らぎがある場合を考慮した。平均設計条件において単純に最適設計され得られた形状は設計条件においては最も良い性能を示すものの、巡航マッハ数の増加と共に抵抗係数は急激に増加している。設計条件の揺らぎを考慮して得られたロバスト最適形状においては平均設計条件においての性能は劣るものの、巡航マッハ数の増加に対して性能の悪化度合の小さい形状である事が確認できる。その他にも勾配・ベクトル積情報を援用する Kriging 応答曲面法も開発し、近接するサンプル点群を含む入力データに対しても高精度な応答曲面を構築でき、ロバストに最適設計を行う事ができる手法も提案した。

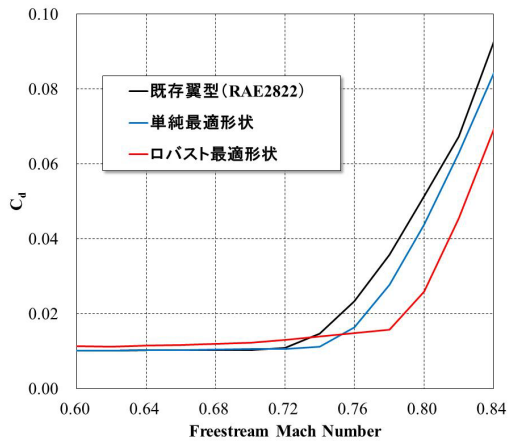


図6 単純最適形状とロバスト最適形状の
オフデザイン性能比較

(6) 以上のようなロバストな最適設計に関わる要素技術及び実験データと数値解析データの融合に関わる要素技術を本研究では独自に開発した。これらの手法の組み合わせ及び更なる拡張により、実験・数値解析・最適設計技術を融合・フィードバックさせた流体機械の高度設計技術を構築する事が可能となった。今後の研究の展開としては、この開発した設計技術を基に、様々な流体機械において実験と数値解析を融合した実例を蓄積すると共にその高効率な最適形状を提案していきたいと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計4件)

- ① 山崎 渉, “効率的な最適設計に向けた Kriging 応答曲面手法の拡張について” 日本機械学会論文集, 掲載決定, 査読有.
- ② W. Yamazaki, “Robust Aerodynamic Design Optimization via Variable Fidelity Surrogate Model” Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol.57, No.2, pp.109-119, 2014, 査読有.
DOI: 10.2322/tjsass.57.109
- ③ W. Yamazaki and D. Mavriplis, “Derivative-Enhanced Variable Fidelity Surrogate Modeling for Aerodynamic Functions” AIAA Journal, Vol.51, No.1, pp.126-137, 2013, 査読有.
DOI: 10.2514/1.J051633
- ④ 山崎 渉, “複数精度関数値を用いた Kriging 応答曲面法による不確実性解析” 日本航空宇宙学会論文集, Vol.60, No.2, pp.80-88, 2012, 査読有.
DOI: 10.2322/jjsass.60.80

〔学会発表〕 (計10件)

- ① 秋元麗, 山崎 渉, “固有直交分解に基づく PIV/CFD データの融合手法の検討” 第27回数値流体力学シンポジウム,

2013/12/17-19, 名古屋市.

- ② H. Yamada, Y. Fujii, R. Hashiguchi, W. Yamazaki, “PIV Flowfield Measurements around a Flapping Wing Object with Feathering Motion” 10th International Conference of Flow Dynamics, 2013/11/25-27, Sendai.
- ③ 山崎 渉, “効率的な最適設計に向けた Kriging 応答曲面手法の拡張について” 日本機械学会第23回設計工学・システム部門講演会, 2013/10/23-25, 読谷村.
- ④ 藤井憂也, 山崎 渉, “固有直交分解による PIV データの再構築手法の検討” 可視化情報全国講演会, 2013/9/27-28, 会津若松市.
- ⑤ W. Yamazaki, H. Yamada, “PIV Data Analysis around a Flapping Wing via Proper Orthogonal Decomposition” 43rd AIAA Fluid Dynamics Conference, AIAA Paper 2013-2473, 2013/6/24-27, San Diego, USA.
- ⑥ 山崎 渉, 山田英知, “POD を用いた羽ばたき翼周りの PIV データ解析” 平成24年度航空宇宙空力班シンポジウム, 2013/1/25-26, 亀岡市.
- ⑦ 山崎 渉, “勾配情報を援用した応答曲面法による最適形状設計” 日本機械学会第10回最適化シンポジウム, 2012/12/6-7, 神戸市.
- ⑧ 山田英知, 藤井憂也, 植田和樹, 山崎 渉, “羽ばたき翼周り流れ場の PIV 計測” 第50回飛行機シンポジウム, 2012/11/5-7, 新潟市.
- ⑨ W. Yamazaki, S. Kuchi-ishi, “A Variable Fidelity Response Surface Approach towards Integration of CFD and EFD” 5th Symposium on Integrating CFD and Experiments in Aerodynamics (Integration 2012), 2012/10/3-5, Tokyo.
- ⑩ W. Yamazaki, “Efficient Robust Design Optimization by Variable Fidelity Kriging Model” AIAA 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials and Co-located Conferences, AIAA Paper 2012-1926, 2012/4/23-26, Honolulu, USA.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 渉 (YAMAZAKI, Wataru)
長岡技術科学大学・
産学融合トップランナー養成センター・
講師
研究者番号: 50598696