

研究報告書

「流体最適制御に向けた高速高精度データ同化手法の確立」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 2016 年 10 月～2020 年 3 月

研究者: 野々村 拓

1. 研究のねらい

本研究では、飛行機、自動車まわりなどの高速な流体場の最適制御を目標に、実機条件を意識した限られた計測から流体場の情報を高速高精度に推定する技術进行研究する。飛行機、自動車まわりの流体場をパラメータチューニングなしに時々刻々の確に制御するためには準最適制御などの利用が望まれるが、準最適制御で求められる非常に精度の高い状態観測機は数値実験でも多大な計算を必要とし、未だ実用化のレベルに至っていない。実験データから、この状態観測機の精度を圧倒的に上げ、かつ超高速に流体場の情報を推定する方法を確立する。この手法を確立することで、飛行機、自動車など高速な流体場の情報を高速高精度に明らかにし流体最適制御を実現する。これにより限界に近付きつつある輸送機器の抵抗、流体機器の効率を飛躍的に向上させるインパクトを生む。

これを実現するために 2 つの方法論を導入する:

1. オプティカルフローによる流体の詳細情報の取得と低次元化

計測融合アプローチの一つであるオプティカルフロー (PIV、PSP、オイルフロー) により流体場の詳細情報を取得する。この情報に固有直交分解などの縮約化を利用し、動的モード分解や Galerkin 投影などによる適切な低次元化を行って高精度のまま状態推定時の計算コストを飛躍的に向上させる。現状、このようなアプローチは報告がされ始めたところであるが、実験的なアプローチは情報量が限られており数値実験レベルにとどまっている。雑音の含まれる実測から低次元化モデルを実現する方法論を確立する。

2. フィルタリングによる高速データ同化

構築した低次元モデルにカルマンフィルタなどを適用することにより、適切な高速、高精度なデータ同化手法を構築する。

最終的にはこれらを組み合わせることで、高速流体場の高速高精度な計測を目指す。現状で、流体場の計測精度は実験室レベルでは先進計測技術により飛躍的に伸びているが、一方で実機では離散的な圧力データの取得に留まる。実験室レベルでオプティカルフロー流体場の詳細情報を取得し低次元化し、モデル式を通した高速高精度のフィルタリングを利用することで、実機で得られると考えられる離散的な圧力データからの流れ場の的確な予測を実現する。その推定された流れ場を準最適制御に利用し、限界に近付きつつある輸送機器の抵抗、流体機器の効率を飛躍的に向上させる技術につなげる。輸送・流体機器は様々な場所にあり、本技術が社会全体のエネルギー効率に大きなインパクトを与える。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、当初提案した 2 つの項目 1) 詳細情報の取得と低次元化および 2) フィルタリン

グによる高速データ同化を実施した。また追加課題としてスパースセンサ位置最適化アルゴリズムを提案し、これらの項目の実施につなげた。まず 1) 詳細情報の取得と低次元化であるが、まず詳細情報の取得の項目に関して、オプティカルフローの高解像度化を行った。平均場のシングルピクセル解像度のオプティカルフローを提案し、その精度を明らかにした。次に、オプティカルフローに低ランク性を加味して GappyPOD などを利用することで非定常かつシングルピクセル解像度を達成するアルゴリズムを提案した。次に、低次元化に関しては、オンラインでシステムを同定する「カルマンフィルタ動的モード分解」と、オンラインでシステムと現信号を同定する「拡張カルマンフィルタ動的モード分解」を提案し、システムノイズの入った系に対して非常によく原信号に追従することができることを示した。さらに、これをオフラインへ拡張して、システム、原信号、ノイズ強度のすべてを推定する「状態空間最適化動的モード分解」を提案した。また風洞試験を実施し、流れ場の低次元モデルを作成することに成功した。次にこれらのモデルを利用して、高速高精度データ同化を検証する風洞試験を実施した。風洞試験モデルに非定常圧力センサを埋め込み、粒子画像流束測定法(PIV)と圧力センサの同時計測を実施した。現状では完全なリアルタイム計測はまだ達成できていないが、今後、後解析で教師データとして PIV から得られた速度場と圧力センサのペアの情報を与え、圧力センサの情報から速度場の再構築がリアルタイムにできるかを検証して報告したい。またこれらの課題に合わせて PIV の画像計測は非常に計算コストが高いが、画像のすべての点で解析を行うためであり、予め決められた疎な点の情報のみを解析してモードを復元することで高速を達成する方法を新たに検討した。このためにまずスパースセンサ位置最適化の追加課題を実施した。具体的には PIV で得られる速度ベクトル場への拡張および定式化を見直した貪欲法の提案などである。これらを利用して感度の良いセンサ点を見出すことに成功した。次に、これを利用することで、リアルタイムに PIV の速度ベクトルが再構築できるか検討した。まだ現時点では、リアルタイムのためのプログラミングが間に合っていないが、オフラインで検討したところ、疎な点の速度の見積もりのみで全体の場がおおよそ再構築できており、かつ計算コストは計算機の並列化を行うことで十分にリアルタイム処理できることがわかった。以上より、完全なリアルタイム高速高精度データ同化はまだ実現できていないが、計算機の見積もりから実現可能であることを示しており、今後早い段階でプログラミングを行うことで実現できると考えられ、おおよそ本研究の目的を達成することができた。

(2) 詳細

1) オプティカルフローによる流体の詳細情報の取得と低次元化

a) オプティカルフローによる詳細情報の取得

本項目では、オプティカルフローを用いた流体計測の高解像度を目的にして研究を進めた。せん断応力場を蛍光油膜法で得られる輝度値分布から計測する方法を例に研究を進めた。まず、平均場を仮定することにより、同じピクセル位置の複数のアンサンブルからオプティカルフローを行うことを提案した。この方法を用いることでシングルピクセルの解像度で平均せん断応力場を算出できることを示した[論文 1]。また合わせて誤差解析を行って定量的な評価も可能であることを示している[論文 2]。次に、この方法を拡張し非定常流れの解析法を提案した。まず流体場が少ないモードで記述できる特性を利用し、これを利用する形で非定常シング

ルピクセルのオプティカルフローでは足りない情報を埋めるように GappyPOD を利用したアルゴリズムを構築した。この方法では、輝度値が弱い部分などでノイズが大きいため、POD にロバスト PCA を改良したものを利用するなどしてより正しい分布が得られるように提案した。さらに同領域の東工大小野准教授と共同研究を行い、より見通しのよい定式化を提案しており、これを学会で発表する予定である[発表 1]。提案するアルゴリズムにより解析した結果を図 1 に示す。

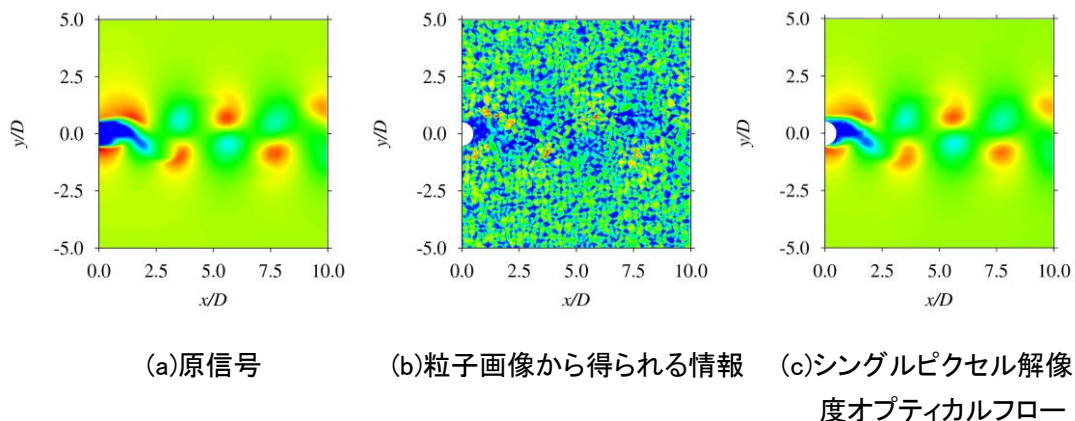
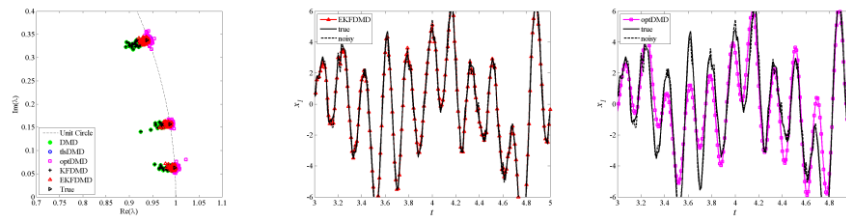


図 1 提案するシングルピクセルオプティカルフローの結果[発表 1]

b)流体場の低次元化

本項目では、a)で得られた流れ場の情報から低次元モデルを構築する方法を提案し、実験データから流体場の低次元モデルを構築した。まず、低次元モデルの構築のため線形で近似する動的モード分解に着目した。まず、実験データのノイズ特性を先見情報としてよりよく活用するためカルマンフィルタで低次元モデルのシステム同定を行う「カルマンフィルタ動的モード分解」[論文 3]を提案した。この方法を用いることでノイズの強さの変化などの先見情報を活用して高精度にシステム同定を行えることを示した。また、時変システムに対してもその変化に追従しながらシステム同定を行えることを示した。次に、システムと同時に原信号も同時に推定する「拡張カルマンフィルタ動的モード分解」[論文 4]を提案した。この方法を用いることでシステムノイズが含まれる場合にシステム同定の精度を圧倒的に上げられるとともに、真の流体場の状態を推定することができており、システム同定のみならずノイズ除去の観点でも有用なアルゴリズムを開発することができた。最後に、「拡張カルマンフィルタ動的モード分解」をオフラインで定式化しなおし、EM 法を利用することで観測データから、システム、原信号、ノイズの強さをすべて見積もる「状態空間最適化動的モード分解」[発表 2]を提案しており、本手法を用いることで、オフラインでシステムを学習する際に非常に推定精度を高く元のシステムを予測できることを示した。本アルゴリズムをテスト問題へ適用した結果を図 2 に示す。

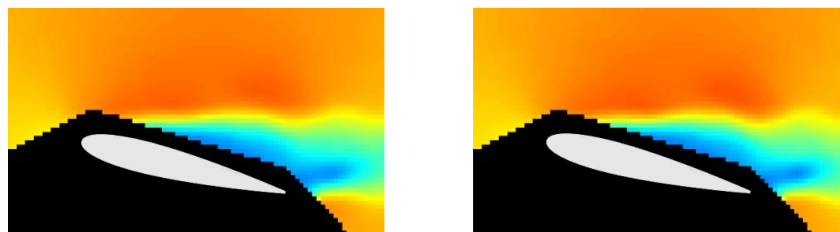


(a)固有値の推定結果 (b)原信号の復元 (c)従来手法による復元
(拡張カルマンフィルタ動的モード分解) (最適化動的モード分解)

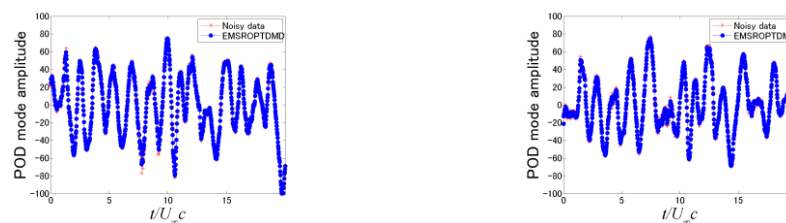
図 2 拡張カルマンフィルタ動的モード分解の結果[論文 4]

2) フィルタリングによる高速データ同化

1)で構築したアルゴリズムを利用して、高速高精度データ同化を検証する風洞試験を実施した。風洞試験模型に非定常圧力センサを埋め込み、粒子画像流速測定法(PIV)と圧力センサの同時計測を実施した。まずは非定常流れ周りの粒子画像流速測定法による速度場単体の計測から低次元モデルの構築の可否を確認し、問題の無いことを確認した[論文 5] その後、粒子画像流速測定法による速度場と圧力センサによる圧力データを同時計測することに成功している。計測した粒子画像流速測定法による速度場に状態空間最適化動的モード分解[発表 2]を適用して 10 モードの低次元モデルを作成した(図 3 に結果を示す)。現状では圧力センサ情報からの速度場の完全なリアルタイム再構築はまだ達成できていないが、今後、後解析で教師データとして PIV から得られた速度場と圧力センサのペアの情報を与え、圧力センサの情報から速度場の再構築がリアルタイムにできるかを検証して報告したい。



(a) オリジナルの PIV データ(低次元化後) (b) 状態空間最適化動的モード分解の再構築



(c) 第 1 モードの時系列変化 (d) 第 2 モードの時系列変化

図 3 状態空間最適化動的モード分解の結果[発表 2]

3) 追加項目 スパースセンサ最適化とスパースプロセッシング PIV の提案と実証

またこれらの課題に合わせて PIV の画像計測は非常に計算コストが高いが、これは画像のすべての点で解析を行うためであり、予め決められた疎な点の情報のみを解析して学習した

よく現れる流体モードを復元することで高速にデータ同化を行う方法を新たに検討した。このためにまずスパースセンサ位置最適化の追加課題を実施した。まず、先行研究で提案された QR 法に基づくセンサ最適化手法があるが、これを PIV で得られる 2 成分の速度ベクトルに拡張するアルゴリズムを提案した。現状ではこの手法を用いている。この結果を図 4 に示す。

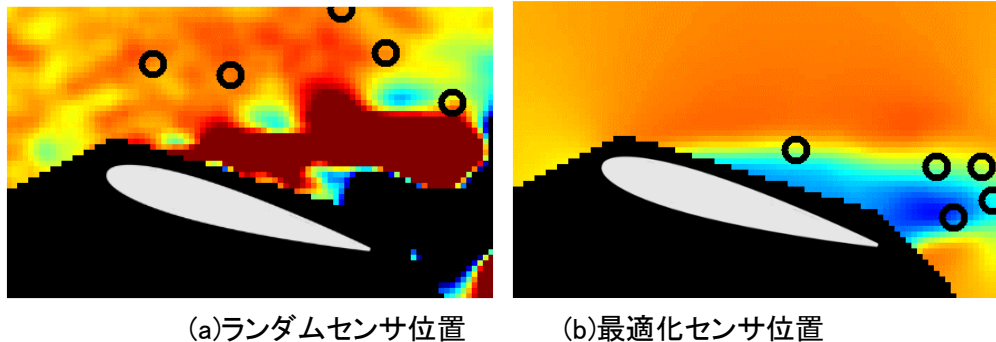


図 4 ランダムセンサ位置とスパースプロセッシング PIV 向けのベクトルセンサ最適化アルゴリズムを利用して決定したセンサ位置とそれらの情報を用いて再構築した流れ場

さらに、先行研究で提案されたセンサ位置最適化手法である QR 法の定式化に問題点があることを指摘し、センサ情報からもとのモードの強さを推定する際に用いる擬似逆行列の中に現れる行列の行列式最大化として問題を定式化した。これにより、より高速に高感度なセンサ点を選べることを提案した。さらにこの技術を活用して、現在相関のあるノイズ情報やモードの予測される強さの先見情報を組み込んだ形でセンサ最適化が出来ることを示しつつある。これらのアルゴリズムを利用してセンサ点を決定し、リアルタイムに PIV の速度ベクトルが再構築できるか検討した。まだ実際には、リアルタイムのためのプログラミングが間に合っていないが、オフラインで検討したところ、疎な点の速度の見積もりのみで全体の場がおおよそ再構築できており、かつ計算コストは計算機の並列化を行うことで十分にリアルタイム処理できることがわかった[発表 3]。この結果を図 5 に示す。

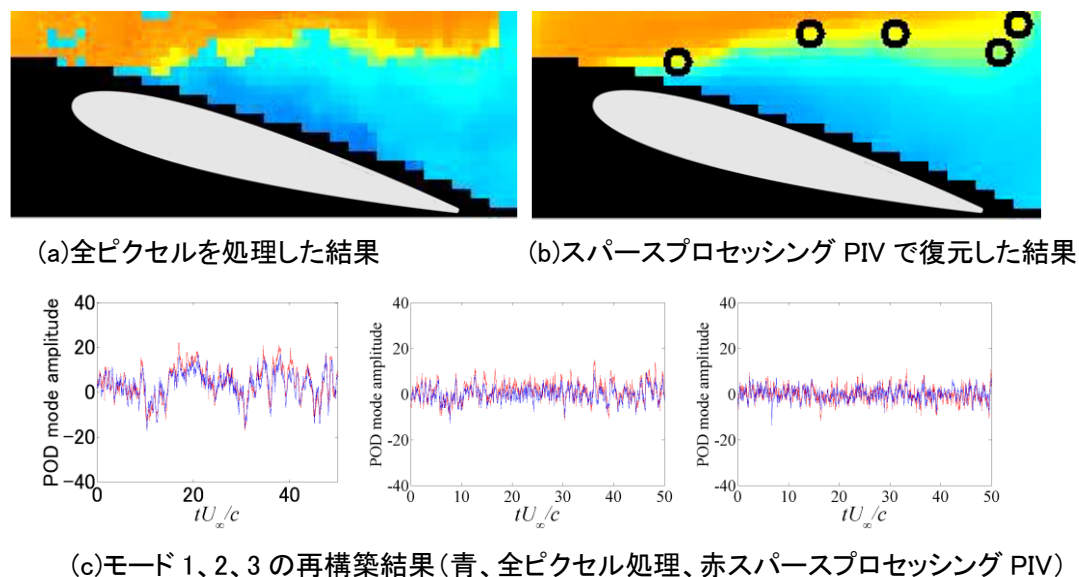


図 5 スパースプロセッシング PIV を用いた高速高精度データ同化[発表 3]

以上 2)および追加項目より、完全なリアルタイム高速高精度データ同化はまだ実現できていないが、計算機の見積もりから実現可能であることを示しており、今後早い段階でプログラミングを行うことで実現できると考えられ、おおよそ本研究の目的を達成することができた。

3. 今後の展開

これらの研究成果を利用して、リアルタイムで流体場が観測できる観測器がおおよそ完成した。今後は、推定した低次元モデルとともに準最適制御アルゴリズムを用いて最適流体制御入力の決定を行って、高速応答アクチュエータの入力を流体場へ入れることより先進的流体制御を実現していきたい。これにより、これまで流体制御が困難だった条件での流体制御を実現していき、飛行機などの輸送機へ適用し、その効率を飛躍的に向上させる。

また、追加課題で実施したセンサ位置最適化法は気象予測をはじめとする様々な分野に適用可能であると考えており様々な分野の研究者と共同することでこれを有効に活用していきたい。

4. 自己評価

当初目的とした、オプティカルフローによる詳細な流体情報の取得および高速高精度データ同化はおおよそ実現できており、大きな意味で研究目的は達成できたと考える。高解像度オプティカルフローを低次元モデルに組み込めていない点や圧力センサを用いたリアルタイムでのデータ同化の実証ができていない点など細かな研究項目において最終目的の部分につながない点があるため今後そのような部分を埋めて、次の流体制御を含めた研究へ進める。

研究の実施体制としては、修士課程学生 3-4 名程度の研究補助を受けながら、研究者が中心となって研究を進めてきた。研究費は高速高精度な粒子画像流速計測法のために高繰り返し回数のレーザの購入、圧力センサを搭載した風洞試験模型、リアルタイムカメラの物品購入を主な支出先として、他論文誌発表や学会発表のための経費、学会等の会合での調査のための経費を利用した。主な研究成果は、オプティカルフローを流体場の先見情報を用いて高解像化できることを示したことおよび流体実験のように雑音が大きい場合の低次元モデル化のアルゴリズムを提案しそれを用いることでより高速高精度なデータ同化が実現できることを示したことと考えられる。今後航空機などの輸送機・風車などに本データ同化技術を観測器を用いたフィードバック流体制御技術が利用できることになれば、そのエネルギー消費に対する効果は絶大であると考えられる。

最後に本領域の戦略目標として「1)計測対象の特徴量解析技術の構築」があるが、この点に関しては、オプティカルフローの高度化や動的モード分解の高度化という点で貢献しており、さらに「(2)(1)を活用した新たな計測・解析技術の構築」に関してはこれらを利用して高速高精度データ同化を実現してこの目標達成に貢献できたと考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

1. T Lee, T Nonomura, K Asai, T Liu, "Linear least-squares method for global luminescent oil film skin friction field analysis," Review of Scientific Instruments, 89, (6), 065106,2018.

2. T Lee, T Nonomura, K Asai, J Naughton, Validation and uncertainty analysis of global luminescent oil-film skin-friction field measurement, Measurement Science and Technology, in press.
3. T Nonomura, H Shibata, R Takaki, “Dynamic mode decomposition using a Kalman filter for parameter estimation,” AIP Advances, 8, (10), 105106, 2018.
4. T Nonomura, H Shibata, R Takaki, “Extended-Kalman-filter-based dynamic mode decomposition for simultaneous system identification and denoising,” PLoSone, 14, (2), e0209836, 2019.
5. K Nankai, K Asai, T Nonomura, “Linear Reduced-order Model based on PIV Data of Flow Field around Airfoil,” Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Science, 62, (4), 227–235, 2019.

(2)特許出願

研究期間累積件数:0 件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

なし

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. T Nonomura, S Ono, “Single Pixel Resolution Optical Flow for Low-rank Flow Fields,” 74th Annual Meeting of American Physical Society Division of Fluid Dynamics (Seattle), 2019.
2. T Nonomura, K Nakamura, N Nakano, SL Bruntun, JN Kutz, “State-space Optimized Dynamic Mode Decomposition for Noisy Data,” 77th Annual Meeting of American Physical Society Division of Fluid Dynamics (Seattle), 2019.
3. N Kanda, K Nankai, Y Saito, T Nonomura, K Asai, “Feasibility Study on Sparse Processing Particle Image Velocimetry,” 72nd Annual Meeting of American Physical Society Division of Fluid Dynamics (Seattle), 2019.
4. Nonomura, T., “Kalman Filter Dynamic Mode Decomposition and its Off-lineExtension,” AIAA Aviation, July, 2019. (招待講演)
5. 野々村拓, “カルマンフィルタ動的モード分解法とその発展”, 日本機械学会 流体工学部門 トピックス講習会「流体とインフォマティクス」2019 年 1 月 (招待講演)
6. 野々村拓, “カルマンフィルタ動的モード分解法とその発展,” 第 3 回 風と流れのプラットフォーム・シンポジウム, 2018 年 12 月 (招待講演)