

派遣機関報告書

1. 派遣機関名 : 東北大学大学院工学研究科
2. 交流テーマ : 次世代流体制御に向けた低次元モデル化の意見交換および共同研究
3. 研究者氏名 : 野々村 拓 東北大学大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻 准教授
4. 派遣期間 : 平成 30 (2018) 年 9 月 17 日～9 月 30 日
5. 研究者等の活動およびその成果に関する評価、所見

当該派遣支援を受けて、アメリカ、ワシントン大学の Steve Brunton および Nathan Kutz と情報交換および2週間共同研究を実施するため研究者の野々村拓を派遣した。現地では、セミナーを行うなど、研究者のこれまでの成果をさらに広めることに加え、様々な議論を行うことで、情報交換がより進んだようである。また、受け入れ先の研究者との打ち合わせを通して共同研究を進められたようであり、当初の目的が達成できたものと評価している。

アメリカ、ワシントン大学の研究者や派遣研究者が行っている当該分野は非常に注目されており、そのような分野で共同研究を通して情報交換ができたことは非常に価値が高いと考えている。2週間という短い期間では当然論文執筆にまでは至らないものの、得られた結果は論文執筆につながるような成果であると聞いており、これをきっかけにビデオ会議などで打ち合わせを続け、論文執筆にまでつなげてほしいと考えている。

当大学としてもワシントン大学は共同すべき機関であると考えており、今回派遣を通じて作り上げたネットワークをもとに、より密接な関係を維持できるようにしていきたい。

6. 研究者報告書 : P.2～4参照

研究者報告書

1. 研究者氏名 : 野々村 拓
2. 交流テーマ : 次世代流体制御に向けた低次元モデル化の意見交換および共同研究
3. 派遣機関名 : 東北大学大学院工学研究科
4. 派遣期間 : 平成 30 (2018) 年 9 月 17 日～9 月 30 日

5. 交流活動の成果

(1) 交流活動の実績

アメリカ、ワシントン大学の Steve Brunton 教授および Nathan Kutz 教授と情報交換および 2 週間共同研究を実施した。下記に順に行ったことを示す：

9/18 に、派遣研究者によるセミナーを行い、研究者のこれまでの研究成果を説明することにより、情報交換を促進することができた。またこの際、ボーイング社の鈴木氏にセミナーを聴講していただき、ボーイング社の状況を伺うとともに研究者のこれまでの研究に対するコメントをいただいた。また本セミナーには、ワシントン大学の Dana Debiri 教授や前田氏も参加いただいた。

9/19 以降は、Steve Brunton および Nathan Kutz との毎日短時間の打ち合わせに加え、2、3 日に一度長めの研究打ち合わせを持つことで、情報交換を進めるとともに共同研究の促進を図った。この打ち合わせには Nathan Kutz の学生である、Travis やも加わり、様々な視点で議論を行うことができた。

9/21 には、Dana Debiri と打ち合わせを持ち、当該期間に行った研究分野に対するコメントをもらうのと同時に、同教授の専門である PIV,PTV 研究の最先端情報を聞くことができた。

9/27 には、Steve Brunton の行っている、水槽試験装置を見学させていただき、実験データの取得方法及びそれを低次元モデルやデータサイエンスにどう生かしているのかについて聞くことができた。

(2) 共同研究成果の要約

交流活動内での共同研究による成果は以下の通りである。

派遣研究者は、本共同研究内で新しい「システム表現での動的モード分解」の定式化をベースに、最適化によりこのモードと元のデータの再構築を行うことを提案したが、実際にこの期間内に最適化のアルゴリズムを決定しそれを実装することができた。

データの再構築の際に、先に動的モードを計算し固定することなどの提案があり、この部分を議論しながら進めることができた。これにより、計算のスピードアップを図ることができた。また、派遣研究者の提案は事前にシステムノイズおよび観測ノイズのそれぞれの強さを把握し指定しておく必要があるが、この期間中に得たコメントにより、事前に指定することなく、これらのノイズレベルも同時に経験的ベイズ法で予測する定式化を提案し、これにより様々な条件下で得られたデータから、より信頼するに足る動的モード（低次元モデル）を抽出することに加えて、この低次元モデルを用いたデータのノイズ除去が可能であることを示した。

派遣期間中にアルゴリズムはほぼ完成したため、今後はテスト問題や実問題へ適用しその有用性を示した上で学術論文執筆につなげていきたい。

(3) 鈴木氏および Dana Dabiri からの研究内容に対するコメント

鈴木氏は社内での業務とは別に低次元モデルを使ったデータ同化技術を専門としており、今回のアルゴリズムに関する有用な意見をいただいた。特に低次元モデルでの流れの予測は最も強い周期運動を 1-2 周期程度であり、これをどの程度伸ばせるかがカギになるとの有用なコメントをいただいた。

Dana Dabiri からは、低次元モデルではカルマン渦のような周期運動はよく捉えられるが、一方で乱流のような複雑な流れ場は難しいのではないかとのコメントがあり、乱流解析のツールとしては不十分であるものの、流体制御を目的とするのであればその利用可能性は十分にあるとのコメントをいただいた。

研究成果の概要は別紙（P.5～6）にまとめた。

以上のように情報交換および意見交換を種々行うとともに、共同研究を強力に推進することができた。

6. 交流活動

全体の実績を示す。

9/17 渡米

9/18 ワシントン大学訪問，セミナー講演，鈴木氏と面談

9/19 15:00-Kutz 教授，Brunton 教授と議論を行う

9/20 共同研究開始，Brunton 教授と朝ショートミーティングを持つ

9/21 11:00-ワシントン大学 Dabiri 教授と意見交換

9/25 共同研究継続，Brunton 教授とは朝ショートミーティングを持つ

9/25 共同研究継続，
12:00-ランチミーティング

16:00-Kutz 教授，Brunton 教授と議論を行う

9/26 共同研究継続，Brunton 教授とは朝ミーティングを持つ

9/27 10:00-午前中実験施設見学，午後共同研究継続，

15:00-Kutz 教授，Brunton 教授と議論を行い今後の予定を決定

9/28 共同研究継続，Brunton 教授とは朝ショートミーティングを持つ

9/29 帰国

9/18 に図 1 および 2 に示す通り，派遣研究者によるセミナーを実施した。聴講者は Kutz 教授のグループ，Brunton 教授のグループ，鈴木氏および Dana Dabiri 氏を中心に 30 名程度が集まった。非常に良いコメントをいただき，今後の研究の方針に役立つ有用なコメントを多数得ることができた。

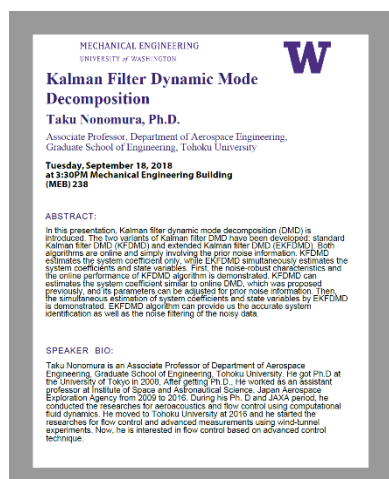


図 1 セミナーのアナウンス



図 2 セミナーの様子

また 9/27 の午前中に Brunton 教授のグループの実験装置を見学させていただいた。彼らは水槽を利用したタービンの試験を行っていた。図 3 に水槽を示す。



図 3 水槽と模型トラバース用の冶具

最終日, 9/28 午後のミーティングは長めのものであったが, そこで帰国後の研究方針を決定した。最後に Brunton 教授と Kutz 教授との写真を図 4 に示す。

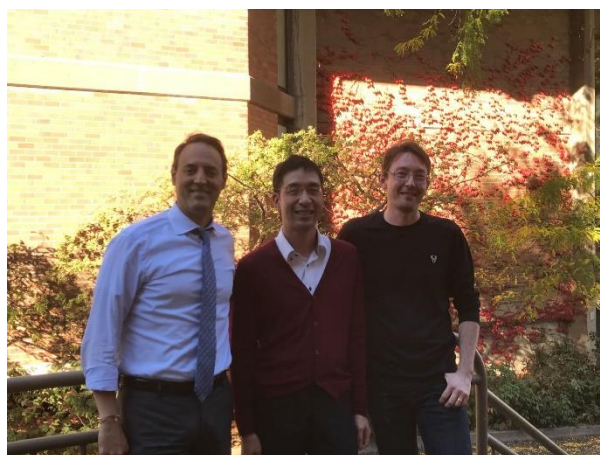


図 4 Kutz 教授(左)と Brunton 教授 (右)

研究成果のまとめ

1. 背景

動的モード分解は、線形の式に基づきデータを最もよく表す線形システムを構築することである。これまでの研究では、1ステップ前のデータと1ステップ後のデータを集めた行列から、線形システムの係数行列を最小2乗法で求める方法が提案されてきており、これが広く使われている。派遣研究者は、これまでにこの線形システムの推定にカルマンフィルタを用いることを提案し、さらに雑音が入ったデータから雑音を取り除きながら、同時にシステムを推定する方法を提案した。しかしながらカルマンフィルタはオンラインアルゴリズムであり、必ずしも最善の推定となっているかは不明である。そこで本派遣ではこのアイデアを突き詰めて、オフラインの最小2乗問題として定義することでこれを進めることを提案し、ワシントン大学を訪問した。

カルマンフィルタのアイデアを突き詰めてまずは以下の方程式を考慮した。

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_n + \mathbf{v}_n, \quad \mathbf{y}_{n+1} = \mathbf{x}_{n+1} + \mathbf{w}_{n+1}$$

ここで \mathbf{x}_n は状態変数、 \mathbf{A} はシステムの係数行列、 \mathbf{y}_n は観測変数、 \mathbf{v}_n 、 \mathbf{w}_n はシステムノイズおよび観測ノイズである。このとき、目的関数を $\min \sum (\lambda_v \|\mathbf{v}_n\|^2 + \lambda_w \|\mathbf{w}_n\|^2)$ と置き、これらの残差を最小化する \mathbf{x}_n と \mathbf{A} を求めることで尤もらしいシステムと元の信号をノイズが強く含まれるデータから推定する新しいオフラインアルゴリズムを提案した。ここで λ_v 、 λ_w はシステムノイズと観測ノイズの重みである。これまででは動的モード分解の研究で陽にシステムノイズを考えた研究はあまりなく、新しい試みである。

2. 開発したアルゴリズム

滞在期間中に4種類のアルゴリズムを実装した。うち後半3つはアイデアも含めて滞在中に開発したアルゴリズムとなる。

2-1 非線形最小化問題

まず、(1)式の問題を \mathbf{A} 、 \mathbf{v}_n 、 \mathbf{w}_n を変数とした最小化問題として、非線形の最小2乗を解くためのアルゴリズムを提案した。これには、随伴方程式を用いる方法を提案し、最小化問題を解く際の勾配を随伴方程式で、実際にステップの方向を決める際に準ニュートン法で、ステップサイズの幅を決める際に黄金比法を使ってこれを実装した。これらの実装をBrunton教授とKutz教授のアドバイスのもとすべてワシントン大学で行った。これらの実装で最小化問題は無事に解けるようになったが、一方で多くのタイムステップが必要となることが分かり、最適化を加速する必要性なども分かった。

2-2 線形最小化問題

次に(1)式の問題を \mathbf{A} を別の方法で求めてから \mathbf{v}_n 、 \mathbf{w}_n を求める問題とすると、線形最小2乗問題で解けることが分かった。この際に行列がデータ数 \times ステップ数のサイズとなり、通常の実行解法では解くのが難しくなるが、これをブロック3重対角としてLU分解法で解くことでこれを実装した。これにより \mathbf{A} を固定すると非常に速く問題が解けることを明らかにした。この解を初期解として、2-1の非線形最小2乗問題を解くことで、リーズナブルな時間で非線形までの最適化が行えることが分かった。一方で \mathbf{A} の推定が十分な精度で行えているときには、この線形最小化問題の解は2-1の非線形最小化問題の解と変わらないことも分かった。

2-3 経験的ベイズ法

2-1 および 2-2 で行った最適化では \mathbf{v}_n および \mathbf{w}_n の重みが (λ_v, λ_w) 不明であった。このため、最尤推定値を真値と近似して \mathbf{v}_n および \mathbf{w}_n の大きさを算出し、その重みを変更して再度最適化を行うことを複数回繰り返す EM アルゴリズムを実装した。これにより、予めシステムノイズと観測ノイズの強さのバランスが分からないデータに対しても尤もらしいノイズの強さの予測とともに、システムの推定と元の信号の推定ができるようになった。

2-4 経験的ベイズ法と非線形最適化の組み合わせ

経験的ベイズ法で求めた元の信号に対して、 \mathbf{A} を推定し直して繰り返し最適化を行う方法も提案した。しかしながらこの場合、 \mathbf{A} を複雑にして \mathbf{v}_n を非常に小さくする過推定の問題が生ずると分かった。これを解決するには、 \mathbf{A} 行列のランクを低ランクに固定することなどが求められるようで、最適化の問題に戻ってこれを検討する必要があることが分かった。今後このアルゴリズムについてはさらに検討を進めていきたい。

3. テスト問題の結果

参考文献でオンライン推定を行った問題を 2-3 のオフラインアルゴリズムにより推定したシステムの固有値の推定には tlsDMD 法を用いた (図 1 に示す)。図 2 よりノイズを入れたデータから、低次元モデルを構築することで、真の値を予測できている (点線の noisy データから青色に復元している)。

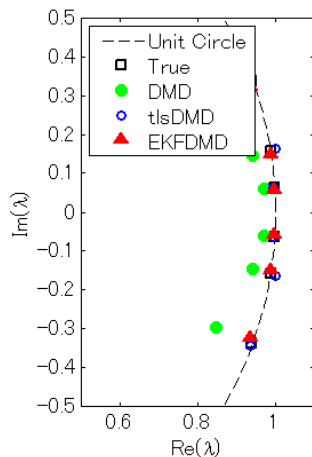


図 1 システムの推定(tlsDMD)

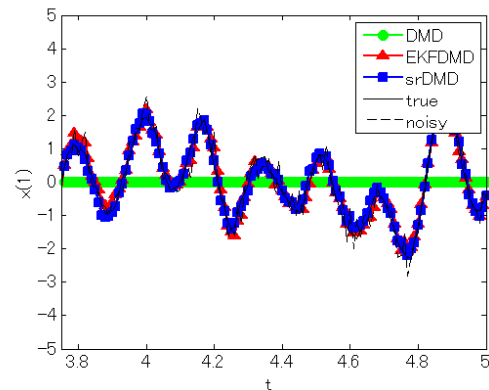


図 2 真のデータの推定

4. 今後の進め方

派遣期間中にアルゴリズムの開発はほぼ終わったため、今後テスト問題での性能評価と実問題への適用を行う。Brunton 教授と Kutz 教授との結果の議論はメール、ビデオ会議を利用して行い、成果をまとめてジャーナル論文投稿に進みたい。

以上