# 構造的学習チーム 河原 吉伸 Structured Learning Team Y. KAWAHARA



### <u>2017年度中の主要な成果</u>

- 【1】時空間構造を持つデータ解析への作用素論的方法
- (a).動的モード分解のベイズ的定式化と推論アルゴリズムの開発[1]

(b). クープマン・スペクトルを用いた非線形ダイナミクス予測法の開発 [2] ([4]) 【2】高階結合正則化非負値テンソル分解による時空間データ解析法の開発 [3]

時空間構造を持つデータ解析への作用素論的方法(【1】の背景) 非線形(解析が困難 非線形システム  $\dot{x} = f(x)$ 挙動を解釈  $x_{t}$  $x_{t+1}$  $(\Leftrightarrow \boldsymbol{x}_{t+1} = \boldsymbol{F}(\boldsymbol{x}_t))$ 状態空間 S 線形(解析が容易) → 推定 作用素表現 (スペクトル分解) K  $\mathcal{K}g(\cdot) = g(\boldsymbol{F}(\cdot))$  $g \circ F$ q $(g: \mathcal{S} \to \mathbb{C})$ 無限次元<u>線形</u>空間 - プマン作用素 ヶ (関数空間) 動的モード分解 (時間方向) 固有なダイナミクスへの分解 空間方向 ^^^^  $g(x_{t+c}) = \sum$  $\lambda_i^c \varphi_i(\boldsymbol{x}_i) \boldsymbol{v}_i$ : 【クープマン作用素の固有分解  $\mathcal{K}\varphi_i = \lambda_i \varphi_i$ 】 高次元の時系列データ -15 各々のDMDモードに対応 観測·計測 • ... (流体現象の例) 高周波ダイナミクス (ある時刻のデータ例) 低周波ダイナミクス

・従来DMDモデルは、決定的システムを仮定した枠組みであった=> 確率的モデルを 導入し種々の機械学習的方法を適用するための基盤を構築(成果【1】(a))

・単にデータ解析としてではなく、判別的な学習へ用いる枠組みを構築=>成果[1](b)
 ・動的モード分解自体のの性能をあげるためのニューラルネットを用いた枠組み等も本年度中に開発(=> [5]など)

## 動的モード分解のベイズ的定式化と推論アルゴリズム (成果【1】(a))

- ・動的モード分解に対応する確率モデルの導出
- => サンプル無限の極限で既存の動的モード分解(TL-DMD)と一致することを証明
  => ダイナミクスに関する事前情報をベイズ推論により利用可能な枠組み

・ギブスサンプリングを用いた推論アルゴリズムを導出



#### クープマン・スペクトルを用いた非線形ダイナミクス予測法(成果【1】(b)) ・動的モード分解で推定したクープマン・スペクトルを用いて、非線形システムの動的

特性を比較する計量を設計し、これを用いた学習の枠組みを提案 =>時空間データから非線形性を伴う動的特性の可視化や、分類などの予測を実現



提案手法と[4]を組み合わせてスポーツ(バスケットボール)計測データへ適用した例:



# 高階結合正則化非負値テンソル分解による時空間データ解析法 【2】

・高階結合正則化[6]に基づく非負値テンソル分解アルゴリズムを導出

=> 時空間データからの特徴的構造の抽出へ利用可能 ・劣モジュラ性を用いた高速なパラメータ推定法の導出 => 大規模適用を実現



文献情報 [1] N. Takeishi, Y. Kawahara, Y. Tabei & T. Yairi, ``Bayesian Dynamic Mode Decomposition," in Proc. of IJCAI'17, pp.2814-2821, 2017.

[2] K. Fujii, Y. Inaba & Y. Kawahara, ``Koopman spectral kernels for comparing complex dynamics with application to multiagent in sports," in *Proc. of ECML-PKDD'17*, pp.127-139, 2017.
[3] K. Takeuchi, Y. Kawahara & T. Iwata, ``Structurally regularized non-negative tensor factorization for spatio-temporal pattern discoveries," in *Proc. of ECML-PKDD'17*, pp.582-598, 2017.
[4] Y. Kawahara, ``Dynamic mode decomposition with reproducing kernels for Koopman spectral analysis," in *Advances in Neural Information Processing Systems 29*, pp.911-919, 2016.
[5] N. Takeishi, Y. Kawahara & T. Yairi, ``Learning Koopman invariant subspaces for dynamic mode decomposition," in *Advances in Neural Information Processing Systems 30*, pp.1130-1140, 2017.
[6] K. Takeuchi, Y. Kawahara & T. Iwata, ``Higher order fused regularization for supervised learning with grouped parameters," in *Proc. of ECML-PKDD'15*, pp.577-593, 2015.