K-3

ヤコビ行列のノルムを組込んだ変分自己符号化器の損失関数が振動燃焼場の状態特定精度に与える影響

Influence of Loss Function of Variational Auto-Encoder Incorporating the Norm of Jacobian Matrix for State Identification Accuracy of Oscillation Combustion Field

○三輪聡太[1]，水谷胤夢[2]，伊藤遥輝[2]，新井史也[3]，齊藤允教[4]，田辺光昭[4]
*Sota Miwa[1], Tsugumu Mizutani[2], Haruki Ito[2], Fumiya Arai[3], Masanori Saito[4], Mitsuaki Tanabe[4]

In the analysis of combustion oscillation field using β-Variational Auto-Encoder (VAE), a jacobian-based term was incorporated to the loss function. The influence of this method was evaluated by using the distance D_P as the third axis of the phase plane to calculate state identification accuracy.

ロケットエンジンなどの燃焼器内では燃焼振動が発生する可能性がある．燃焼振動が発生すると燃焼器破壊につながる可能性がある．この現象は非線形性があらわれると高次元であることが知られている．田辺[1]は多様体学習の一種である Variational Auto-Encoder（VAE）による潜在空間を用いることで燃焼振動の状態特定が可能となることを示した．VAE 全体を通しての写像は全単射かつ連続であり，エンコーダを用いた入力 $\boldsymbol{x}$ から潜在変数 $\boldsymbol{\mu}$ への写像が局所同相写像の条件を満たすとき，位相空間上の軌跡は重ならず，状態特定が可能となる．Arai[2]らは，状態特定精度を定量的に評価する手法を提案した．従来手法と比較し，VAE が従来より精度が高いことを示した．その上で VAE に改善の余地があることを示した．しかし，軌跡の改善には評価が学習に反映される必要がある．本報では VAE の損失関数に軌跡の重なりの改善を目的とした項を新たに導入した．

入力に対する潜在変数の応答を定量化するため，$\boldsymbol{x}$ から $\boldsymbol{\mu}$ の写像についてヤコビ行列 $\boldsymbol{J}(\boldsymbol{x})$ を取得する．軌跡の重なりに影響するプロット点の跳びの抑制として，$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{x})$ のフロベニウスノルムを第 3 項に追加した．式(1)に提案する損失関数を示す．

$$L_{total} = \beta \cdot L_{MSE} + (1-\beta) \cdot L_{KL} + \frac{\lambda}{B}\sum_{b=1}^{B} \|\boldsymbol{J}(\boldsymbol{x}_b)\|_F^2 \quad (1)$$

ここで，B はバッチサイズ，β と λ は各項に対する重みであり，$\beta = 0.8, \lambda = 1000$ とした．右辺第 1 項は MSE，第 2 項は KL divergence である．VAE の構造は参考文献[3]を参照されたい．入力は振動燃焼場の圧力変動，発熱率変動，温度，CH_4 の質量分率，O_2 の質量分率，密度，軸方向速度，半径方向速度の空間分布とした．

図 1 に従来手法と提案手法での位相平面を示す．表 1 に位相平面の評価結果を示す．評価方法については参考文献[2]を参照されたい．図 1 より軌跡の分布範囲が狭まり，軌跡が滑らかになることが確認された．このことから，入力に対する潜在変数の応答を制限する効果が表れたことが示唆される．表 1 より，いずれも値の減少は見られず，分布の改善は見られなかった．

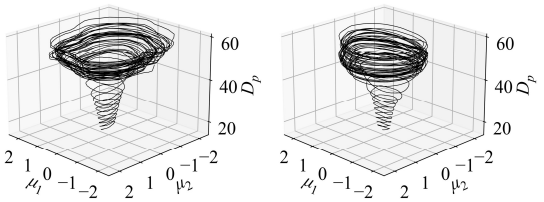

Figure 1. Phase plane (Left : previous method Right : proposed method).

Table 1. Evaluation of univalent functions.

Method Degree of polynomial fit	Previous 23	Proposed 15
MSE	3.18	7.22
MAE	1.36	2.02
L	0.187	0.435

参考文献

[1] 田辺光昭:深層自己符号化器を用いた燃焼ダイナミクスの低次元化解析, 日本燃焼学会誌, Vol.63, No.203, pp.21-29，2021.

[2] F. Arai. et al.: “Study of the Driving Mechanism of Nonlinear Pressure Waves in a Rocket Combustor with a Single-Element Injector by Using State Space”, AIAA SciTech Forum, 6-10 January, 2025.

[3] F. Arai. et al.: “Study on Nonlinear Dynamics Using the State Space of Combustion Oscillation in a Rocket Combustor”, Trans. JSASS, Vol.66, No.5, pp. 156–163, 2023.

1：日大理工・学部・航宇　2：日大理工・院（前）・航宇　3：日大理工・研究員・航宇　4：日大理工・教員・航宇