

2024 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所 属 機 関	北海道大学 大学院工学研究院 機械・宇宙航空工学部門
職 位 または 役 職	助教
氏 名	米 沢 平 成

1. 研究題目

通信容量制約下における EV パワートレインのアクティブ振動制御：くじらアルゴリズムを活用した最適自動設計への挑戦

2. 研究目的

電気自動車（EV）の動力を伝達する機構であるパワートレインの振動は、快適性や耐久性を著しく劣化させる。アクティブ振動制御は車両重量を増加させずに、既存のアクチュエータ（モータ）を用いてこの振動を抑制できる強力な技術である。近年では制御系とパワートレインが相互にサイバー空間を介して通信するネットワーク化制御が主流となりつつあるため、制御入力信号の離散化による悪影響が無視できなくなる。これは離散化の幅を粗くせざるを得ないことを意味し、本来の理想的な制御性能が損なわれる。本研究の目的は、世界で初めてくじらアルゴリズムの活用によって離散化の影響を克服したパワートレインのアクティブ振動制御系を構築することである。くじらアルゴリズム（Whale optimization algorithm: WOA）（Mirjalili, 2016）は、くじら独特の泡網による狩りを模倣した新型の群知能最適化手法であり、従来手法よりも優れた探索能力が近年注目を集めている。本研究の鍵となるアイデアは、粗い離散化幅でも制御を実行できるサンプル値制御器の設計問題において、くじらの狩りの原理を導入することにより、その最適解を自動で探索することである。提案手法は、既存の全てのアクティブ振動制御系が抱える実装上の課題の包括的な解決に資するものであり、特にビッグデータをネットワークで通信する次世代の車両システム全般に対して、汎用的な振動制御系を構築できる。

3. 研究内容及び成果

本研究の主な成果として、EV パワートレインの基礎的なアクティブ振動制御系の設計において、くじらアルゴリズム(WOA)による最適化の有効性を確認した。具体的に今年度は、パワートレインのモデルベース制御器のチューニングに対して、WOA の適用可能性を探った。車体に生じる過渡振動を抑制するためにはアクティブ制御器が必要であるが、サンプル値制御を含むモデルベース制御器全般について、従来の設計は周波数重み関数の試行錯誤的な調整を伴う。本研究は、設計に係る重要なパラメータを WOA の設計変数に組み込みことで、効率的な自動最適化を行った。

最初に、パワートレインのモデル化を行い(Fig. 1)、制御系設計用の状態方程式を導出した。この際、パワートレインの重要な非線形特性であるバックラッシの不感帯特性や、通信容量制約(粗い離散化周期による影響)も Simulink 上で再現し、その影響を考察した。次に、離散化誤差を補償する前の基礎検討として、モデルベース H2 制御器を設計し、これを離散化したデジタル制御系を適用した。さらに、振動制御のロバスト性を向上させるために、パワートレインが有する構造的な非線形特性に対する補償も検討し、振動抑制と非線形特性への対処を同時に行う切り換え制御系を構築した

(Fig. 2)。次に、制御系の最適化を行うための WOA のコード構築に着手した。

WOA の泡網および包囲による狩りを模倣したコードを本課題に適合するよう改造し、最適化のループ中で制御系の評価と周波数重みなどの重要なパラメータの最適値を探索するアルゴリズムを構築した。その際、最適化の評価関数は振動応答と制御入力ノルム和として定義した。最適化の結果を Fig. 3 に示す。評価関数の減少傾向からわかるように、WOA がパワートレインに対するモデルベース制御器をチューニングすることに成功した。また、最適化された制御系のシミュレーション結果を Fig. 4 に示す。赤線に示すように、WOA で設計された制御系は振動を大幅に低減することができた。

また、通信容量制約を背景とした離散化に起因する悪影響を補償するために、現在はサンプル値制御系の検討を進めている。試行錯誤の結果、Fig. 5 の解析結果に示すように、固有振動数の 5 倍の制御周期下でも、サンプル値制御は振動を抑制しており、その基礎特性を確認できた。

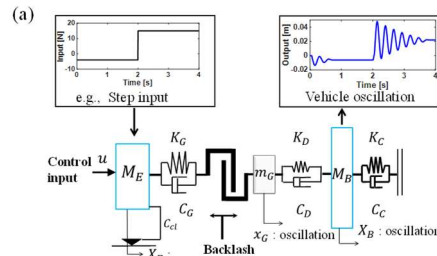


Fig. 1 Powertrain model cited from (Yonezawa et al., 2025 in ICCAS2025, 業績欄 2).

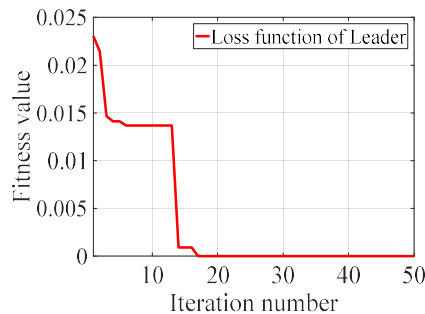


Fig. 3 Fitness function cited from (Yonezawa et al., 2025 in ICCAS2025, 業績欄 2).

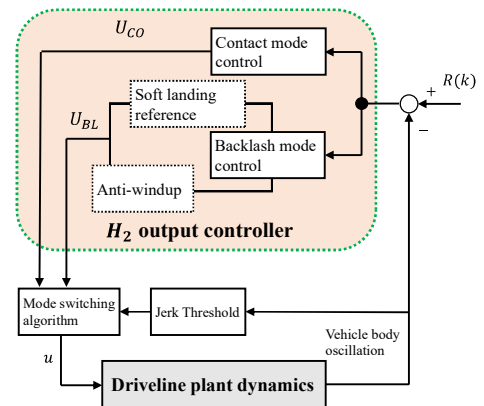


Fig. 2 Active vibration control system cited from (Yonezawa et al., 2025 in ICCAS2025, 業績欄 2).

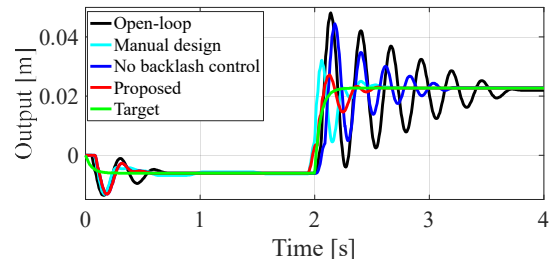


Fig. 4 Control result cited from (Yonezawa et al., 2025 in ICCAS2025, 業績欄 2).

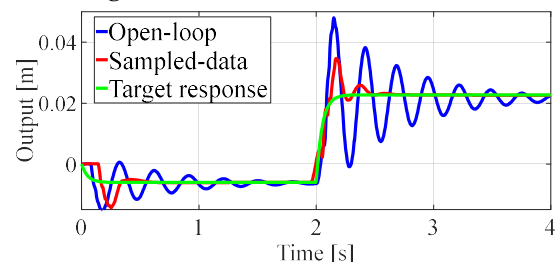


Fig. 5 Control result by sampled-data control.

4. 今後の研究の見通し

今後の本研究の検討項目としては、WOA とサンプル値制御の融合が挙げられる。具体的には、WOA の設計変数に、サンプル値制御系の性能保証に重要なパラメータ(周波数重み関数など)を組み込み、自動最適化アルゴリズム(Fig. 6)を検証する。その際、パワートレインの構造的な非線形特性による影響とサンプル値制御による振動抑制が干渉する可能性があり、これに対する補償も組み込む必要がある。すなわち、サンプル値制御と非線形補償の同時最適化が重要であると考えられる。これらの最適化プロセスについて、通信容量制約を背景とした様々な離散周期下において、評価関数の最小化を図る。

また、パワートレインを模擬した基礎実験装置(Fig. 7)に基づき、最適化された制御系に関する実験検証も行う必要がある。今後は Digital signal processor を実験系に組み込み、検証環境を構築する。

Algorithm. WOA-based driveline control optimization;

```
Create the random population of search agents.
Initialize  $i$ ,  $a$ ,  $A$ , and  $C$ 
 $X_{best}$  = the best search agent
while ( $i$  < maximum iteration number)
  for each search agent
    Update  $A$ ,  $C$ ,  $l$ , and  $p$ 
    if1 probability < 0.5
      if2  $|A| < 1$ 
        Update the position of the current agent by the shrinking encircle
      elseif2  $|A| \geq 1$ 
        Randomly select a search agent  $X_{rand}$ 
        Update the position of the current agent by the exploration
      end if2
    else if1 probability  $\geq 0.5$ 
      Update the position of the current agent by the spiral trajectory
    end if1
  end for
  Design  $(A_{Ki}, B_{Ki}, C_{Ki}, D_{Ki})$  and  $R_i^{BL}$  for all search agents
  Execute control simulations for all search agents
  Compute the fitness  $L(X)$  for all search agents
  Update  $X_{best}$ 
   $i = i + 1$ 
end while
Return  $X_{best}$ 
```

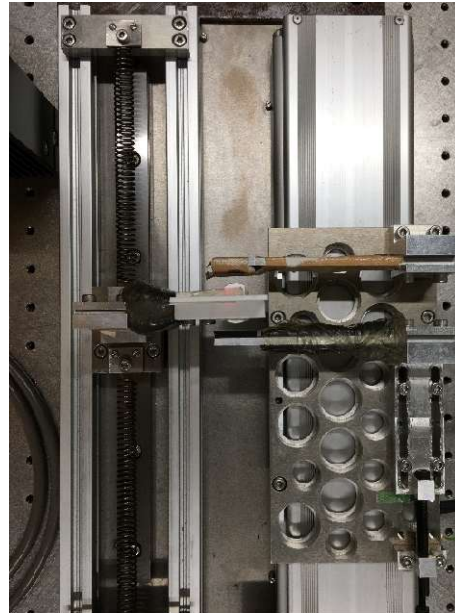


Fig. 6 Tuning algorithm based on WOA cited from (Yonezawa et al., 2025 in ICCAS2025, 業績欄 2).

Fig. 7 Hardware of our experimental device.

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

[国際会議(査読付き)]

1. Heisei Yonezawa, Ansei Yonezawa, and Itsuro Kajiwar, "Simultaneous Perturbation Algorithm Tuned Oscillation Controller for Automotive Driveline With Kalman Filtering-Based Compensation for Dead-Zone Nonlinearity," ASME 2024 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 17–21, 2024, Portland, Oregon, USA.
2. Heisei Yonezawa, Ansei Yonezawa, and Itsuro Kajiwar, "Whale optimization algorithm-based powertrain oscillation controller considering mechanical clearance nonlinearity," 2025 25th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), November 4-7, 2025, Incheon, Korea.

[国内会議(査読なし)]

3. 米沢平成, 米沢安成, 梶原逸朗, "Whale optimization algorithm を用いた自動車駆動系の振動制御器設計に関する基礎的検討", 日本機械学会 第 15 回最適化シンポジウム 2024(OPTIS2024), 2024 年 10 月.