

令和 6 年 5 月 13 日現在

機関番号：10101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20396

研究課題名（和文）時間軸の標本化と入力軸の量子化を考慮した次世代パワートレインのアクティブ振動制御

研究課題名（英文）Active vibration control of vehicle powertrain considering effects due to sampling and quantization

研究代表者

米沢 平成（Yonezawa, Heisei）

北海道大学・工学研究院・助教

研究者番号：50944328

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、自動車の快適性や耐久性の向上に必須であるパワートレインのアクティブ振動制御について、離散化制約による悪影響を考慮した制御手法を開発した。先行研究で提案されている最適動的量子化器を従来の振動制御系に導入することで、制御入力の値が離散的となることによる影響を陽に補償した。最適動的量子化器を設計する上で考慮しなければならない制約に対しては、パワートレインのモデリングを駆使したアプローチを提案した。提案する振動制御系は実車を考慮したパワートレインシステムに適用され、その有効性が確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動車の動力を伝達する機構であるパワートレインの低周波振動は快適性や耐久性に悪影響を与えるため、開発現場におけるこの対策は製品価値を左右する重要な要素である。特に近年では、制御信号の伝達にCAN通信を使用する機会が多いため、通信時の離散化の影響も無視できない。本研究で提案した手法と知見はこれらの問題の解決に有効であり、自動車産業界の競争力向上に貢献できる。また、最適動的量子化器のパワートレインに対する適用例は申請者の知る限りこれまで無く、モデリングに基づく系統的かつ簡便な設計手法を提案したという点で学術的意義も有する。

研究成果の概要（英文）：In this research, a control method considering the adverse effect due to the discretization constraint was developed for active vibration control of automotive powertrains necessary for improving the comfort and durability. The optimal dynamic quantizer, which has been proposed in previous literatures, was introduced into a conventional powertrain vibration control system to explicitly compensate for the effect caused by discrete-valued control inputs. For a limitation that should be satisfied in design of the optimal dynamic quantizer, a modeling-based-countermeasure was presented. The effectiveness of the proposed vibration control system was confirmed by the application to a powertrain system, which considers a real vehicle configuration.

研究分野：制御工学

キーワード：自動車 パワートレイン アクティブ振動制御 離散化

1. 研究開始当初の背景

自動車の動力を伝達する機構であるパワートレインの低周波振動は、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(エンジンやモータ)を用いて、この振動を抑制できる強力な技術であり、環境の改善にも貢献する。従って、アカデミア・産業界を問わず、多種多様で理論的にも精巧な振動制御系が構築されてきたが、その多くは制御入力の信号を連続値と仮定しており、離散化による影響を考慮していない[1]。

自動車のパワートレイン振動制御では、通信媒体として Controller area network (CAN) を介した制御系が台頭している[2]。パワートレインの振動制御で制御入力となるトルクはアナログ量であり、滑らかな連続値をとる。しかし、従来のアクチュエータであるエンジンの機械的制約に加え、CAN におけるデジタル通信の必要性から、制御器からの制御入力信号は離散的な値しか取れず、理想的な制御性能が崩れる。将来的にはパワートレインの振動制御に対して、粗い幅での離散化による悪影響が顕在化することが予想されるが、この難題を陽に解決する制御系は未だ提案されていない。

2. 研究の目的

本研究は、サンプル値制御器や最適動的量子化器を応用することで、離散化の影響を陽に補償した自動車のパワートレイン振動制御系を提案する。提案する制御系は自動車の快適性や燃費、耐久性の向上につながるため、次世代のパワートレイン制御開発が急務である自動車産業に貢献できる。また、パワートレインが有する非線形特性に対する補償も検討する。本研究は提案する制御系を実車の特性を考慮したパワートレインシステムに適用することで、その振動抑制効果とロバスト性を実証することを目的とする。

3. 研究の方法

以下の内容は、主に文献[3]に基づく。本研究では、CAN 通信における離散化への応用を視野に入れつつ、同様の離散値制約を発生させる機械的制約を含むエンジンを用いたパワートレインを制御対象とする。制御入力信号が粗い間隔の離散的な値しか取れないという点で、両者の問題は本質的に等価であり、開発された手法の幅広い応用が期待できる。

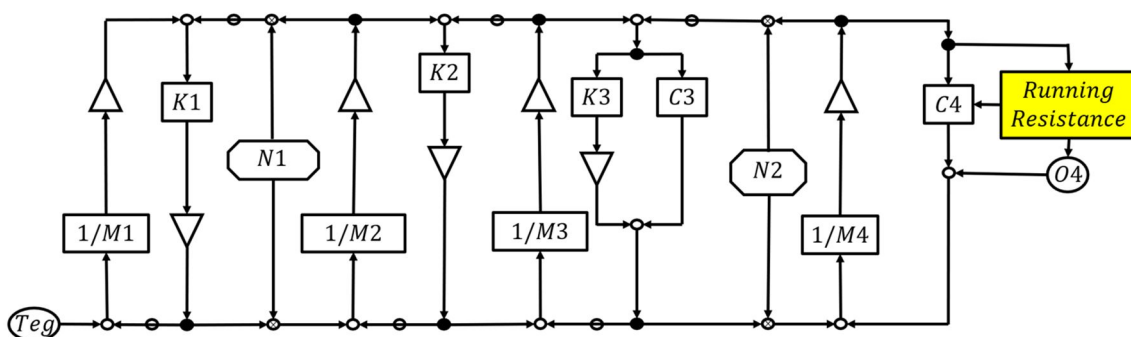


図1 パワートレインの物理機能モデル

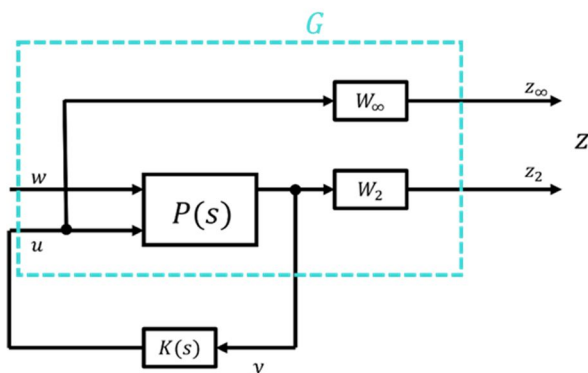


図2 制御系設計に使用したブロック線図の一例

制御系設計に用いるモデル化として、本研究は物理機能モデル[4]を採用した。図1にパワー

トレインの物理機能モデルを示す．これはシステムの機能とエネルギーの流れに基づくブロック線図による手法であり，様々な非線形特性を有するシステムを柔軟にモデル化可能であり，かつ制御対象の時変線形状態方程式を与える．

次に，最適動的量子化器と併用するベースとなる振動制御器を設計した．本研究では，様々な制御系を検討したが，一例として制御出力に関する優れた過渡応答と制御入力量の制限（高周波帯域におけるロバスト安定性）を同時に考慮できる混合 H2/H ∞ 制御理論[5]の使用が挙げられる．特に，車体加速度を H2 ノルム，制御入力を H ∞ ノルムによって評価する．制御器の設計には MATLAB の Control System Toolbox 及び Robust Control Toolbox を使用した．

本研究では，制御入力信号が離散的な値しかとれない制約による影響を補償するために，先行研究で提案されている最適動的量子化器[6][7]をパワートレイン系に適用する．最適動的量子化器とは図 3(a)に示すような制御対象と制御器の間に挿入されるシステムであり，量子化された制御入力の値を与えるものである．重要な点として，これは，量子化器導入による制御系への影響（量子化器を含む場合と含まない場合の最大出力誤差）を最小化するように設計されている[6][7]．具体的な形式は動的システムの状態方程式で定義され，その係数行列は制御対象の状態方程式を用いて構成される．本研究は，この設計に物理機能モデルから得られた状態方程式の係数行列を使用した．また，最適動的量子化器の設計においては，状態方程式の出力行列 C と入力行列 B の積が正則でなければならないという制約条件が存在する[6]．本研究はこの制約条件を満たすために，パワートレインモデルを適切に簡略化（図(b)）することで，条件を満たす状態方程式を構築した．このモデリングに基づくアプローチを通して，安定した最適動的量子化器が簡便に得られた．

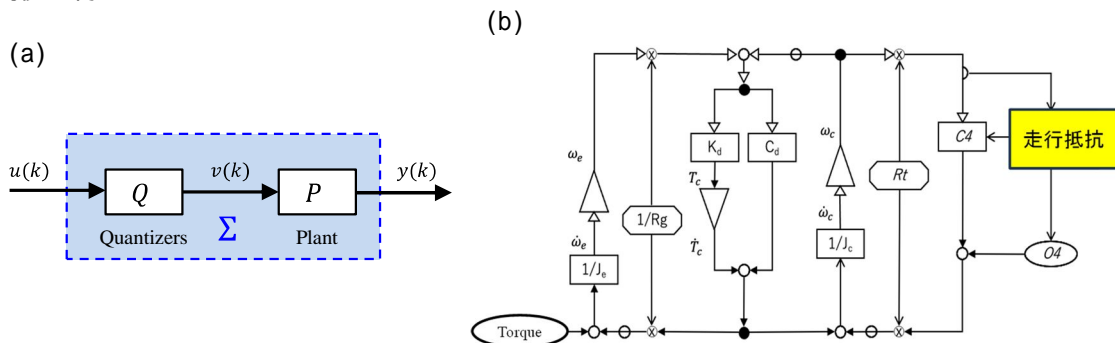


図 3 (a)最適動的量子化器，(b)簡略化されたパワートレインの物理機能モデル

4. 研究成果

提案する制御系を実車の特性を考慮したパワートレイン系に適用することで，その振動抑制性能を検証した．結果の一例として，図 4 にシミュレーション結果を示す[3]．これは，制御入力の量子化幅を 16 Nm と設定した場合の制御結果である．

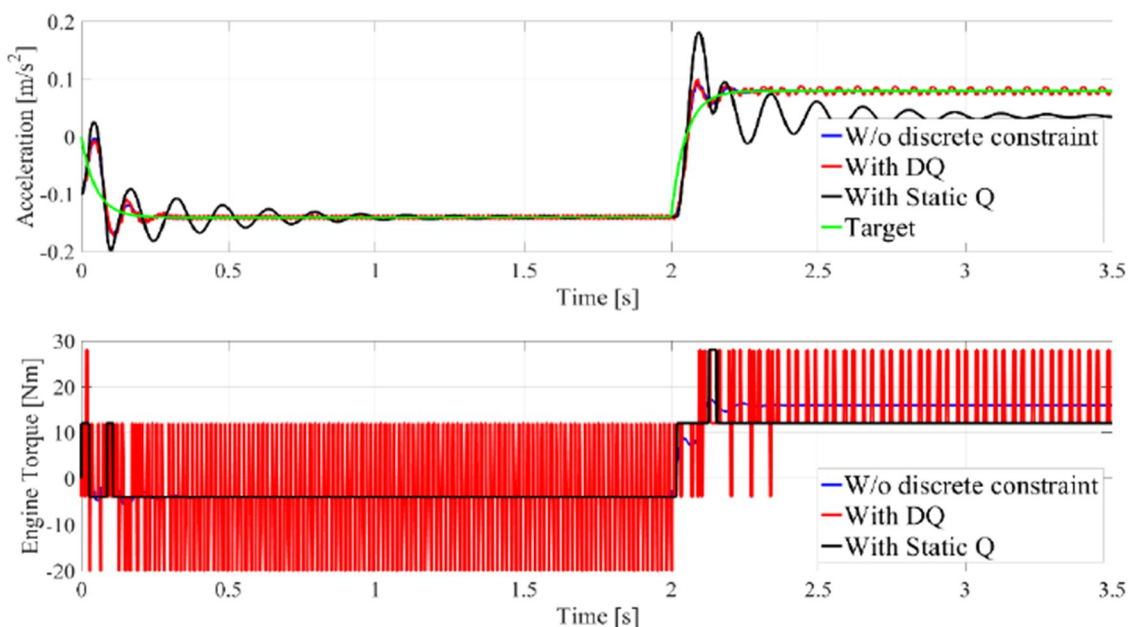


図 4 制御系の検証結果

上図は制御出力である車体加速度の時間応答，下図は制御入力の時間波形を示している．緑線は

理想的な加速度である目標信号，黒線は静的な量子化（単純な丸め込み）による制御結果，赤線は最適動的量子化器を取り入れた提案する制御系による結果を表す．本検証では，緩やかな減速状態から 2 秒時に急加速する運転条件を想定しており，車体の過渡振動を評価しやすくしている．上記で述べたように，制御入力の値は量子化されており，離散的な制約の影響を受ける．これは，CAN 通信における離散化やエンジンの機械的な制約に由来する要因にも通じる条件である．制御系の検証には，MATLAB/Simulink を使用した．

黒線からわかるように，最適動的量子化器を使用しない場合は車体加速度に大きな過渡振動が生じており，また目標加速度への追従性能も劣化している．一方で赤線に示される提案手法では，制御性能が改善されている．具体的には，振動振幅が十分抑制されており，また目標加速度への追従性能も向上している．

以上より，提案する制御系の有効性が検証され，パワートレインのアクティブ振動制御系に最適動的量子化器を応用した場合の離散値制約に対する補償効果が示された．文献[3]では，量子化器の量子化幅を変更した場合の制御結果について，車体加速度と目標値の誤差の二乗和平方根（Root Sum Square: RSS）を評価することで，提案手法の有効性を定量的にも示した．

また，パワートレインの非線形特性を考慮した振動制御手法や（時間軸の離散化による悪影響に対して）サンプル値制御器の応用も検討したが，これらは基礎的な検討に留まっている．

参考文献:

- [1] C. Lin, S. Sun, P. Walker, N. Zhang, Off-line optimization based active control of torsional oscillation for electric vehicle drivetrain, *Appl. Sci.* 7 (2017). <https://doi.org/10.3390/app7121261>.
- [2] X. Zhu, H. Zhang, D. Cao, Z. Fang, Robust control of integrated motor-transmission powertrain system over controller area network for automotive applications, *Mech. Syst. Signal Process.* 58 (2015) 15-28. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2014.11.011>.
- [3] Y. ITO, M. HIRATA, H. YONEZAWA, S. SATO, T. HATANO, C. NISHIDOME, I. KAJIWARA, 自動車駆動系制御における離散値制約への対応と性能評価, in: *Proc. Dyn. Des. Conf.*, 2023: p. 238. <https://doi.org/10.1299/jsmedmc.2023.238>.
- [4] S. Hiramatsu, M. Nagamatsu, S. Sumida, An Approach on Modeling for Functional Development of Automobile, in: *SAE Tech. Pap.*, 2000. <https://doi.org/10.4271/2000-01-0123>.
- [5] M. Chilali, P. Gahinet, H design with pole placement constraints: An LMI approach, *IEEE Trans. Automat. Contr.* 41 (1996) 358-367. <https://doi.org/10.1109/9.486637>.
- [6] 東俊一, 杉江俊治, 離散値入力型制御における最適動的量子化器, *システム制御情報学会論文誌*. 20 (2007) 122-129.
- [7] S. Azuma, T. Sugie, Optimal dynamic quantizers for discrete-valued input control, *Automatica*. 44 (2008) 396-406. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2007.06.012>.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yonezawa Heisei, Yonezawa Ansei, Hatano Takashi, Hiramatsu Shigeki, Nishidome Chiaki, Kajiwara Itsuro	4. 巻 175
2. 論文標題 Fuzzy-reasoning-based robust vibration controller for drivetrain mechanism with various control input updating timings	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Mechanism and Machine Theory	6. 最初と最後の頁 104957 ~ 104957
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.mechmachtheory.2022.104957	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yonezawa Heisei, Yonezawa Ansei, Kajiwara Itsuro	4. 巻 11
2. 論文標題 Efficient Tuning Scheme of Mode-Switching-Based Powertrain Oscillation Controller Considering Nonlinear Backlash	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 93935 ~ 93947
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2023.3310540	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yonezawa Heisei, Yonezawa Ansei, Kajiwara Itsuro	4. 巻 -
2. 論文標題 Grey wolf optimization tuned drivetrain vibration controller with backlash compensation strategy using time-dependent-switched Kalman filter	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/09544070241240019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yonezawa Heisei, Yonezawa Ansei, Kajiwara Itsuro	4. 巻 -
2. 論文標題 Experimental verification of active oscillation controller for vehicle drivetrain with backlash nonlinearity based on norm-limited SPSA	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/14644193241243158	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirata Masaki, Yonezawa Heisei, Yonezawa Ansei, Kajiwara Itsuro	4. 巻 -
2. 論文標題 Final state control-based active compensation for backlash in vibration suppression of automobile powertrain	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 International Journal of Control	6. 最初と最後の頁 1~13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00207179.2024.2332539	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 平田 将規, 梶原 逸朗, 米沢 平成, 波多野 崇, 佐藤 晶太, 平松 繁喜, 西留 千晶
2. 発表標題 自動車駆動系の振動制御における離散値制約への対応の検討
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Heisei Yonezawa, Ansei Yonezawa, Takashi Hatano, Shigeki Hiramatsu, Chiaki Nishidome, Itsuro Kajiwara
2. 発表標題 Active Reduction of Transient Driveline Oscillations with Fuzzy Update Timings of Control Input
3. 学会等名 2022 10th International Conference on Control, Mechatronics and Automation (ICCMA) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤義房, 平田将規, 米沢平成, 佐藤晶太, 波多野崇, 西留千晶, 梶原逸朗
2. 発表標題 自動車駆動系制御における離散値制約への対応と性能評価
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2023
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Researchmap
<https://researchmap.jp/heisei620>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------