

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04530

研究課題名(和文)多自由度パルス変調型入力による精密制御

研究課題名(英文)Precise control using multi-degree-of-freedom pulse-modulation-type input

研究代表者

鈴木 雅康 (Suzuki, Masayasu)

宇都宮大学・工学部・准教授

研究者番号：10456692

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：幅広い分野でパルス変調方式を用いた制御系が構築され、省エネルギーの実現などその有意性は広く認められている。しかしながら、この方式が有する複雑な特性がしばしば制御性能の劣化をもたらす、高速高精度のモーションコントロールには敬遠されている現状がある。本研究は、パルス駆動制御系に対し、サンプリング周波数に比べて相対的に速いダイナミクスの影響を考慮に入れて、理想とする連続値入力駆動系の性能に近づけるための方法論を構築するとともに、三相交流モータを含む実システムへの適用を通して、その有効性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

矩形波の数/幅/配置の操作はスイッチングによるものであり、制御系に新たなアクチュエータを追加することなく操作量の自由度を増やすという戦略に他の研究グループにない特徴がある。また、パルス駆動系のサンプリングに比べて相対的に速いダイナミクスについてはこれまで十分に研究されておらず、本研究は先駆的といえる。加えて、本研究は電力変換を伴うシステムに対する汎用的な制御法の開発を核としその応用範囲は広いが、さらに空圧式除振台やジェットスラスト系のような流体量のon-offバルブ操作を用いたモーションコントロール系についても同様の理論展開が可能である。

研究成果の概要(英文)：In various fields, the pulse modulation scheme has been used to control systems, and its advantages such as energy conservation have been widely accepted. However, high-speed high-precision motion control keeps a distance from employing the PWM scheme, because its complex characteristics often cause the degradation of control performance. For pulse-drive control systems, this study has built a methodology to bring its performance close to that of ideal continuous-valued input-drive system by taking into account the relatively fast dynamics compared to the sampling frequency, and moreover, shown via several numerical experiments of practical systems including a three-phase AC motor that it is effective.

研究分野：制御工学

キーワード：多自由度パルス変調 厳密線形化 サンプル点間応答 周波数整形PWM型終端状態制御 三相インバータ 三相交流モータ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

半導体デバイスのオン・オフスイッチング動作によって電力変換をおこなう技術は、身の回りの数多くの場面で利用されている。例えば、直流モータの制御系は、モータ軸が所望の角度や角速度となるように定電圧源からの供給電力を調整するシステムであるが、エネルギー損失の少ないスイッチングアンプの採用は省エネに欠かせない手段となっている。しかし、制御量が連続値であるにも関わらず制御対象への制御入力が高々数個の値のみとなることは、高効率化の裏で、制御性能の低下を招くこともよく知られており、いまだ高速高精度を要求されるモーションコントロールではこの方式が敬遠される現状があった。

今日の主たる制御系設計論は、系が連続値入出力をもつことを前提に構築されている。パワーエレクトロニクス系やメカトロニクス系においてスイッチングデバイスを実装するときには、一旦、入力は連続値であると見做して制御則を導き、その制御則が与える入力値を離散値時系列であるパルス矩形波に変換する方法が採られてきた。この変換は、情報工学でいうところのパルス変調であり、特に、入力計算結果をパルス矩形波の幅に反映させるパルス幅変調 (pulse-width modulation, PWM) がしばしば用いられる。ところが、パルス変調の介入は、連続値入力の適用を想定した応答との不一致を必然的にもたらす。

このことを背景に、報告者らは PWM 駆動系を高精度に制御するための基礎理論構築に取り組んできた。従来 PWM 方式においてはパルス幅のみを操作するが、報告者らは、パルス配置も可変とする問題設定の拡張の上で、一定のサンプリング周期 (= 制御周期) 毎の応答について、先述の非線形特性を取り除くことができる変調方式が存在することを突き止めた。具体的には、一制御区間のパルス列が制御対象の次数と同数の可調整パラメータを持つならば (図 1)、ある変調則が存在して、変調前の入力から制御対象の状態までの離散時間伝達特性を厳密に線形化できる (図 2)。

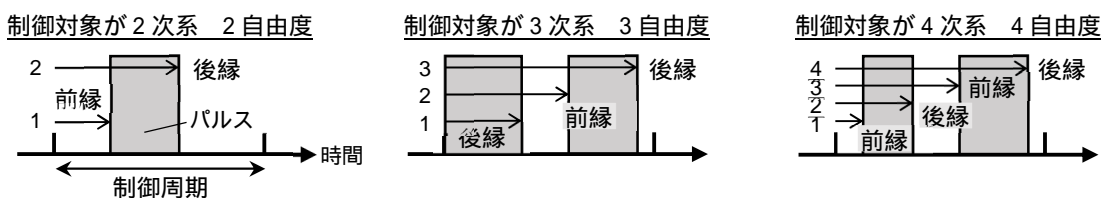


図 1: 多自由度パルスの例 (図中のパルス前縁/後縁が可調整パラメータ)

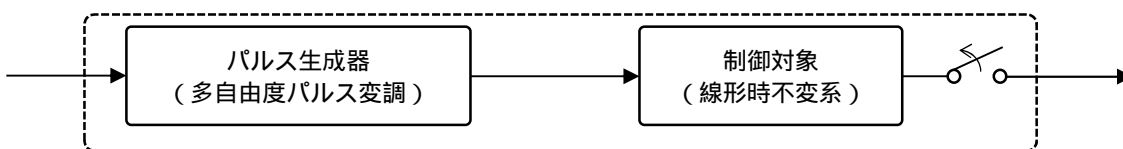


図 2: 多自由度パルス変調を用いた厳密線形化 (破線枠部分が線形となる)

一方、上述の提案変調方式で厳密線形化されるのはサンプル点上の応答のみであり、サンプル点間の応答は依然として線形則に従わない。また、変調則は制御対象の数式モデルを使って計算されるが、モデル化が困難な高周波数域のモードが存在する場合には、その存在が不確かさとして問題に影響を及ぼす。国内外の研究においても、パルス駆動系のサンプリングに比べて相対的に速いダイナミクスについてはこれまで十分に研究されていない状況であった。また、スイッチングアンプを用いた電力変換の重要な応用として三相交流モータ制御があるが、スイッチングに起因する非線形性を追究した研究はほとんどなく、その特性の解明と対策法の開発への期待は大きい。

2. 研究の目的

パルス駆動制御系において、サンプリングに比べて相対的に速いダイナミクスの影響を考慮に入れることで制御性能を高める理論を構築するとともに、三相交流モータを含む実システムへの適用を通して、その有効性を明らかにすることを目的とした。矩形波の数/幅/配置の操作はスイッチングによるものであり、制御系に新たなアクチュエータを追加することなく操作量の自由度を増やすという戦略に特色がある。

3. 研究の方法

以下について主に理論面から追究し、ガルバノスキャナや三相交流モータ (永久磁石同期モータ) の数式モデルに対する数値実験を通して有効性を確認する。

- 高周波数モードの影響及び時間的量子化誤差を考慮した制御系構成法の検討
- 三相交流モータ制御系の精密制御手法の開発
- サンプル点間応答の評価と多自由度パルス変調を用いた制御の検討
- 上記手法の体系化

4. 研究成果

(1) パルス変調駆動高次系のフィードフォワード入力設計において周波数整形型終端状態制御を応用し、高い周波数域の振る舞いを再現できるが構築にコストを要する精密モデルを利用する代わりに、信頼度の高い低次モデルの採用と入力のパワースペクトル密度の調整によって、制御対象の高次モード励起を抑制しながら高精度位置決めを達成する方法を開発した[1 - 4]。

また、本研究では、サンプリングに比べて相対的に速いダイナミクスの影響に注目しているが、特に、パルス入力値切替は時間分解能に応じて定められた各制御区間上のある限られたタイミングにしか配置できず、分解能が十分に高くない場合にこの時間的量子化誤差が性能に悪影響を及ぼすことに着目し、その問題を静的量子化器によって表現する定式化を行った。そして、その量子化器周りに動的な補償を加えることによって影響を軽減する手法の開発に成功した。

パルスの前縁・後縁に限られた時刻の集合に制限される状況では、パルス変調器を含めた系を、パルスパターンを決定するための連続値信号が非一様に量子化される系として捉えることができる。このとき、パルスが次時刻の状態に与える影響は離散的なので、系の振る舞いを線形化することは厳密の意味ではできない。そこで、上述の操作量が任意の実数値を取れるという仮定の下で準備した離散時間線形系を理想モデルとし、実際の制御対象の制御量が理想モデルのそれに近くなるよう動的量子化器を実装することを考えた(図3)。直流モータに提案手法を適用した結果を図4に示す。モータ軸角度を参照軌道に追従する問題を考え、黒線が時間的量子化のない理想的な状況における参照軌道に対する誤差応答、青線が切替えタイミングを分解能によって定められる値に制限した際の誤差応答、赤線が動的量子化器を導入した提案手法による誤差応答を示している。時間的量子化によって性能が悪化するものの、動的量子化器を用いることで、理想的な応答に回復できていることを確認した。

- [1] 瀧澤, 鈴木, 平田, 電気学会メカトロニクス制御研究会, MEC-20-038, pp.93 - 98, 2020.
- [2] M. Suzuki, Y. Takizawa, M. Hirata, Proc. of IEEE ICM, TD-002348, 2021.
- [3] M. Suzuki, M. Hirata, Proc. of IEEE AMC, 000048, 2022.
- [4] 鈴木, 平田, 日本機械学会情報・知能・精密機器部門講演会, IIP1R1-C04, p.9, 2022.

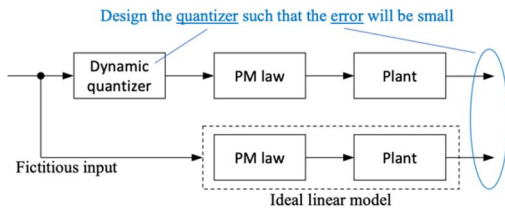


図3 動的量子化器を用いたパルス駆動系

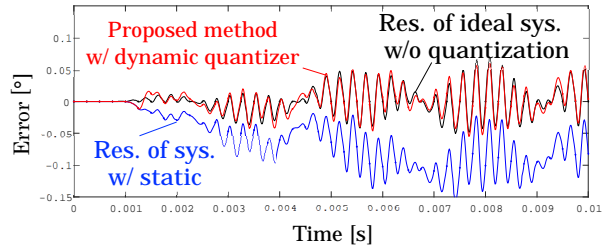


図4 動的量子化器を用いた量子化誤差の影響低減

(2) 三相交流モータの制御問題に取り組み、三相インバータの厳密線形化に成功した。具体的には、三相インバータは各相の電圧をスイッチングにより操作するが、その操作量の自由度を利用して非線形性を消去できることを示し、三相インバータ電流制御の数値実験によって有効性を示した[5]。また、三相交流モータのモータ軸角度を制御量とする位置決め制御のための新たな制御方法を提案した。三相交流モータの機械部を考慮し、先行して開発した三相インバータに対するパルス変調則を応用するとともに、d軸電流とq軸電流の非線形的な干渉に起因する制御系設計の困難さを避ける目的で、d-q軸モデルを採用したことが特徴となっている。提案手法が有効であることを数値実験により確認した[6]。

- [5] 谷, 鈴木, 平田, 自動制御連合講演会, 2021.
- [6] M. Suzuki, M. Hirata, T. Tani, Proc. of Mechatronics/AISM, 2023.

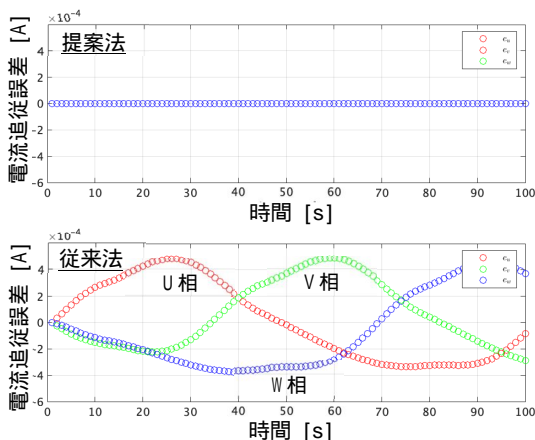


図 三相インバータの電流制御

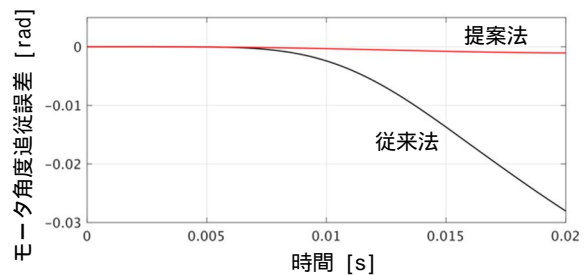


図 三相交流モータの位置決め制御

- (3) 多自由度パルス変調を用いた制御の体系化を進め、成果の一部は[7 - 9]に掲載された。
- [7] 鈴木, 計測と制御, Vol.61, No.2, pp.109 - 114, 2022.
- [8] M. Suzuki, M. Hirata, Proc. of IEEJ SAMCON, 2022.
- [9] 鈴木, 電気学会精密サーボシステムによる高付加価値化に関する調査委員会「精密サーボシステムによる高付加価値化に関する技術報告書」, 2023.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 鈴木 雅康	4. 巻 61
2. 論文標題 パルス駆動にともなう非線形特性と多自由度変調の利用	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 109 ~ 114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11499/sicejl.61.109	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 Suzuki Masayasu, Hirata Mitsuo, Tamekuni Kohta	4. 巻 31
2. 論文標題 Shifting Zeros of Pulse Modulation Driven Systems via Exact Linearization Using Multi-Degree-of-Freedom Pulses	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Control Systems Technology	6. 最初と最後の頁 27 ~ 38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCST.2022.3167605	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9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 谷智基, 鈴木雅康, 平田光男
2. 発表標題 PWM厳密線形化による三相インバータの電流制御に関する基礎検討
3. 学会等名 自動制御連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masayasu Suzuki, Mitsuo Hirata
2. 発表標題 Pulse drive control using multi-degree-of-freedom modulation
3. 学会等名 IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 瀧澤 侑也, 鈴木 雅康, 平田 光男
2. 発表標題 周波数整形PWM型終端状態制御における量子化誤差の影響低減に関する検討
3. 学会等名 電気学会メカトロニクス制御研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masayasu Suzuki, Yuya Takizawa, Mitsuo Hirata
2. 発表標題 A study on frequency-shaped PWM-type final-state control with quantization
3. 学会等名 IEEE International Conference on Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masayasu Suzuki, Mitsuo Hirata
2. 発表標題 A Study on Reducing Effect of Temporal Quantization Error in Pulse Drive Systems
3. 学会等名 IEEE International Conference on Advanced Motion Control (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木雅康, 平田光男
2. 発表標題 時間分解能を考慮に入れたパルス駆動系の制御に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会情報・知能・精密機器部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masayasu Suzuki, Mitsuo Hirata, Tomoki Tani
2. 発表標題 A study on feedforward control for permanent magnet synchronous motor using , -axes model
3. 学会等名 Joint Conference on 14th France-Japan/12th Europe-Asia Congress on Mechatronics / 9th Asia International Symposium on Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究 分担 者	平田 光男	宇都宮大学・工学部・教授	
	(Hirata Mitsuo)		
	(50282447)	(12201)	

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
---------	---------