

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04438

研究課題名（和文）PWM型入力による完全追従制御

研究課題名（英文）Perfect Tracking Control by PWM-Type Input

研究代表者

平田 光男（Hirata, Mitsuo）

宇都宮大学・工学部・教授

研究者番号：50282447

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）：モータ制御などで用いられるPWM型入力系において、パルス幅に加えてその位置も可変にすると離散化の際に生じる不安定零点が安定化できる。これは、安定な逆モデルによるフィードフォワード（FF）制御器によって完全追従制御が実現できることを意味する。しかし、その具体的な設計法はこれまで十分議論されてこなかった。そこで本研究では完全追従制御を達成するための具体的な設計法を提案し、レーザ加工機で用いられるガルバノスキャナの高速度・高精度な角度制御に適用し実験で制御性能を評価した。その結果、不安定零点を有する場合のFF制御器設計法としてよく知られる零位相差追従制御と比べて目標値追従性能が向上することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

制御対象の逆モデルが構成できれば、制御対象の特性を完全に打ち消すことができるので、目標値に誤差無く追従する完全追従制御系が構成できる。しかし、多くの場合離散化零点が不安定になるので、逆モデルが不安定となり、それが実現できない。そこで、本研究ではPWM型入力系において、PWMパルスの生成法を工夫することで、安定な逆モデルに基づくフィードフォワード制御器を設計する方法を明らかにした。さらに、その有効性をレーザ加工機で用いられるガルバノスキャナの角度制御問題に適用し、その有効性を実機実験で示した。PWM型入力は各種産業機器の制御系で多く用いられていることから、それらの制御性能向上に大きく貢献できる。

研究成果の概要（英文）：In pulse-width modulation (PWM), commonly used in motor control, varying both the pulse width and its position can stabilize unstable zeros that arise during discretization. This indicates that perfect tracking control can be achieved using a feedforward (FF) controller based on a stable inverse model. However, specific design methods for this approach have not been sufficiently explored. Therefore, this study proposes a detailed design method to achieve perfect tracking control and applies it to the high-speed and high-precision angular control of a Galvano scanner used in laser processing machines. The control performance was evaluated through experiments. The results demonstrated that the proposed method enhanced tracking performance compared to zero-phase error tracking control, a well-known FF controller design method for systems with unstable zeros.

研究分野：制御工学

キーワード：PWM型入力系 完全追従制御 離散化零点 不安定零点 量子化誤差 動的量子化器 二重積分系 ガルバノスキャナ

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

モータ制御などで良く用いられるパルス幅変調 (pulse-width-modulation, PWM) 方式は、制御入力 ON または OFF の 2 状態のみとなるため、エネルギー損失の少ないスイッチングアンプが利用でき、省エネに大きく貢献できる。一方で、制御入力となるパルス幅から制御対象の出力までの特性は非線形となるため、精密な位置決め制御系には不向きであった。

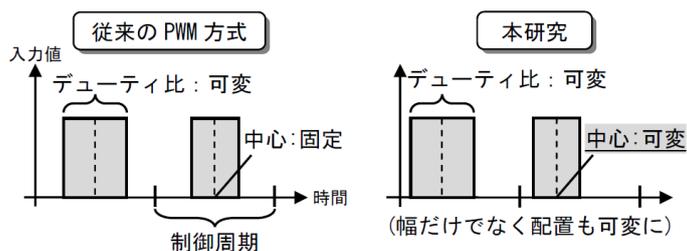


図 1：本研究で用いる PWM 型入力の従来との違い

しかし、申請者らのこれまでの研究で、図 1 に示すように、パルス幅だけでなくパルスの中心位置も可変にすると、厳密に線形化可能であることが明らかとなった。その過程で、厳密線形化されたシステムの零点が、厳密線形化の際のパラメータによって変化することを突き止めた。さらに、その零点を安定領域へ移動できる場合があることを見いだした。一般論としては、零点が安定であれば、安定な逆モデルが構成でき、それによって構成したフィードフォワード制御器を使って、目標値に対する完全追従制御が実現できる。

しかしながら、どのような制御対象であれば零点が安定化できるか、また、その範囲はどの程度か、といったことはこれまで十分検討されて来なかった。特に、零点の配置は、完全追従を達成する際の制御入力の応答と関係があり、仮に完全追従が達成されたとしても、制御入力が振動的になる場合は、実システムへの適用は難しくなる。このような場合は、何らかのフィルタを用いて、制御性能と制御入力の振動との間のトレードオフを取るようになるが、定量的な評価はされていない。さらに、実システムに対する有効性の検証も行われていない。このように、PWM 入力系における完全追従制御系の解析及び設計についてはこれまで十分に研究されておらず、学術的にも明らかにすべき点が多い。

### 2. 研究の目的

本研究では、PWM 型入力を用いた制御系において、完全追従制御を達成するための具体的な設計法を構築することと、実システムへの適用を通してその有用性を明らかにすることである。比較対象としては、制御対象の零点が不安定な時に、近似的に逆モデルを構築する Zero phase error tracking control (ZPETC) 法が代表的な方法となる。

### 3. 研究の方法

研究は、理論及び応用の両面から行う。理論面においては、以下を明らかにする。

1. PWM 型入力系において、零点が安定化できるクラスの解明
2. 安定な逆モデルに基づく完全追従制御系の構成方法の検討
3. 理論の拡張可能性の検討

応用面においては、提案法をガルバノスキャナの位置決め制御問題に適用し、ZPETC といった既存の方法との性能比較を通して、有効性の検証を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) PWM 型入力系において、零点が安定化できるクラスの解明

まず、モーションコントロールにおける制御対象として一般的な二重積分系や積分器＋一次遅れ系について検討を行った。これらの制御対象は、PWM パルスをサンプリング周期の前方に制限することで、ある程度の安定化が可能であるが、制御性能を向上させようとサンプリング周期を短くすると、パルスの存在領域をサンプリング周期のかなり前方に制約する必要があることがわかった。この場合、(2)で説明するように、時変のフィードフォワード制御器を用いることで、制御性能の向上が可能であることを示した。また、この方法を使うと、制御対象が二重積分系と 2 次遅れ系の積で記述できる 4 次システムにおいても、PWM パルスの数を増やすことなく、逆モデルの安定化が可能であることを示した。別の 4 次システムとして、電機子特性を有する 2 慣性系についても検討し、入力マルチレート化と仮想目標値の導入により、従来法では逆モデルの安定化が不可能な場合でも、それが可能となることを示した。

#### (2) 安定な逆モデルに基づく完全追従制御系の構成方法の検討

(1)で述べたように、零点をより安定側に移動させようとすると、PWM パルスをサンプリング周期のかなり前方に制約する必要がある。そこで、このような場合は、パルスの立ち上がり時刻をサンプリング周期の始めに固定し、パルスの立ち下がり時刻を可変とすることで、パルス幅の制約を受けずに、フィードフォワード制御が可能であることを示した。この場合、制御対象の逆モデルに相当するフィードフォワード制御器が時変系となるため、安定性の解析が難しくなるが、線

形近似モデルを活用することで、逆モデルの安定性を考察した。

### (3) 理論の拡張可能性の検討

現実のシステムでは、PWM パルスはカウンタなどを用いて生成するため、分解能は有限となり、量子化誤差を持つ。そこで、この量子化誤差を低減するため、動的量子化器を適用し、その有効性を検証した。その際、動的量子化器の設計問題は、制御対象の不安定零点の影響を受けることから、不安定零点の安定化問題と関連があることを明らかにした。

### (4) 実機実験による有効性検証

レーザ加工機の心臓部で用いられるガルバノスキャナの位置決め制御に提案法を適用した。ガルバノスキャナは、図2のようにモータの先端に取り付けられたミラーの角度を制御して、対象物に当たるレーザ光の位置を高速かつ高精度に制御する装置のことである。制御系は2自由度制御系とし、フィードフォワード(FF)制御器は、規範モデル $M$ を用いて $C_{FF} = M/P$ として与えることとした。フィードバック制御器は、所望の外乱抑制特性が得られるようにループ整形法で設計した。

目標値を50Hzの三角波として実験を行ったときの出力応答を図3に、追従誤差を図4に示す。青の実線は、提案法により安定な逆モデルを設計し、FF制御器を $C_{FF} = 1/P$ 、つまり $M = 1$ とした場合の結果を示している。比較対象として、中心固定PWM入力を用いた場合の結果を波線で示す。なお、中心固定PWMの場合、逆モデルが安定とならないので、ZPETCにより近似的に逆モデルを構成した。これらの図から、提案法の方が追従誤差を小さく抑えられていることがわかる。ただし、図5の制御入力を比較すると、提案法では三角波の頂点で過大な入力となっていることがわかる。これを抑える場合は、規範モデル $M$ を零位相差フィルタに選び、そのカットオフパラメータ $c$ を調整することで、追従誤差と制御入力の間にあるトレードオフが調整できる。同図に $c = -0.2$ および $c = -0.4$ とした場合の結果を示す。 $M = 1$ とした場合に比べて、制御入力の振動が抑えられていることがわかる。一方で、 $c$ の絶対値を大きくして零位相差フィルタのカットオフ周波数を低くすると、それに従って追従誤差は増加するものの、中心固定PWM入力を用いた場合よりも良好な追従精度が得られている。このように、規範モデル $M$ によって、追従誤差と制御入力の振動との間のトレードオフが図れることも確認できた。

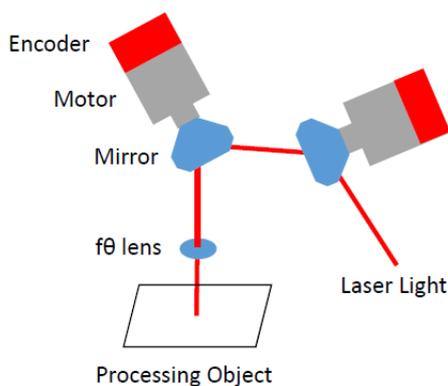


図2 ガルバノスキャナ

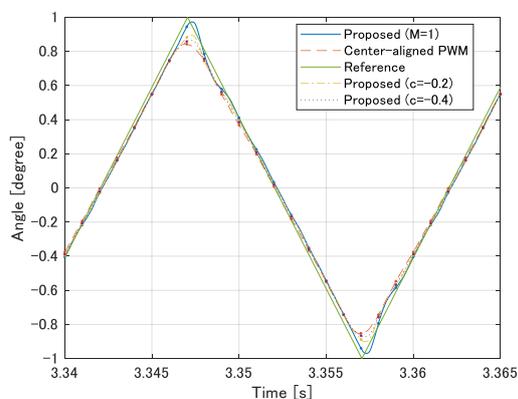


図3 出力応答

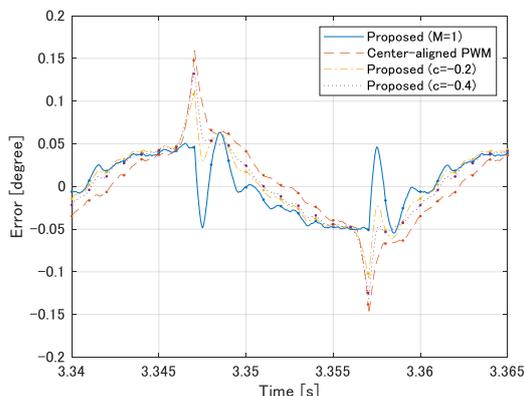


図4 追従誤差

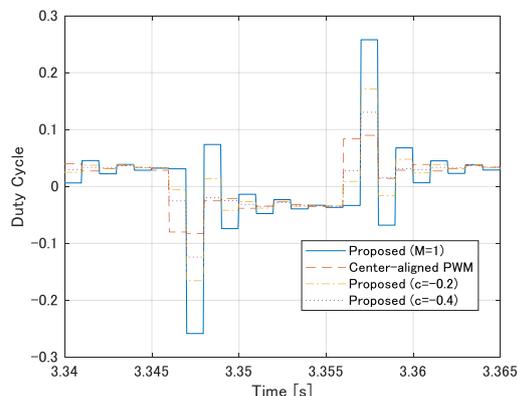


図5 制御入力

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 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 -

1. 著者名 Tamekuni Kohta, Suzuki Masayasu, Hirata Mitsuo	4. 巻 53
2. 論文標題 Output Perfect Tracking Control for a Plant with PWM-Type Input	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IFAC-PapersOnLine	6. 最初と最後の頁 8351 ~ 8356
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2020.12.1610	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 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 川崎 純, 平田 光男, 鈴木 雅康
2. 発表標題 ガルバノスキャナの完全追従制御におけるPWM厳密線形化の実機による有効性検証
3. 学会等名 第66回自動制御連合講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木 雅康, 瀧澤 侑也, 平田 光男
2. 発表標題 多自由度バルス変調を利用した動的量子化器の設計に関する検討
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 2021年

1. 発表者名 Tamekuni Kohta, Suzuki Masayasu, Hirata Mitsuo
2. 発表標題 Output Perfect Tracking Control for a Plant with PWM-Type Input
3. 学会等名 The 21st IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 為國 康太, 鈴木 雅康, 平田 光男
2. 発表標題 PWM型入力を有する2慣性系に対する出力完全追従制御: 厳密線形化の自由度を活用した離散時間逆モデルの安定化
3. 学会等名 IIP2020 情報・知能・精密機器部門 講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 為國 康太, 鈴木 雅康, 平田 光男
2. 発表標題 PWM型入力系に対する厳密線形化則の切り替えによる出力完全追従制御
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 為國 康太, 鈴木 雅康, 平田 光男
2. 発表標題 PWM型入力による出力完全追従に関する一考察
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 2019年

1. 発表者名 Yuya Takizawa, Masayasu Suzuki, Mitsuo Hirata
2. 発表標題 A Study on Frequency-Shaped Final-State Control for PWM-Type Input Systems
3. 学会等名 The 8th IFAC Symposium on Mechatronic Systems (国際学会)
4. 発表年 2019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	鈴木 雅康  (Suzuki Masayasu)  (10456692)	宇都宮大学・工学部・准教授    (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
---------	---------