

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：12201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14698

研究課題名(和文) 厳密線形化によるPWM型入力系精密制御のための基礎理論構築

研究課題名(英文) Building a theoretical framework for precise control of PWM-type input systems by exact linearization

研究代表者

鈴木 雅康 (Suzuki, Masayasu)

宇都宮大学・工学部・助教

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)：パワーエレクトロニクスやメカトロニクスをはじめとするさまざまな分野でパルス幅変調方式を用いた制御系が構築され、低コスト化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、この方式が有する非線形特性が問題となり、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。本研究では、制御周期内においてパルス矩形波の幅だけでなくその数や配置も操作することによって、系の非線形特性を消去して制御系設計が容易になることを理論的に示し、制御性能を向上させるためのいくつかの方法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案した矩形パルスの数/幅/配置の操作は、時間的なスイッチングにより実現され、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り、類似の研究報告はほとんどない。本研究では、自由度を与えた矩形パルスがどのように系に影響を与えるかという最も基本的で重要な性質のいくつかを解明しており、拡張されたPWM方式による制御系の研究において先駆的なものになり得ると考える。

研究成果の概要(英文)：In various fields including power electronics and mechatronics, the pulse-width modulation (PWM) scheme has been used to control systems, and its advantages such as the reduction of costs have been widely accepted. However, high-speed high-precision motion control still keeps a distance from employing the PWM scheme, due to the nonlinearity that it possesses. This study has theoretically shown that the nonlinearity can be eliminated and hence control design becomes easier, by adjusting not only the width of the pulse rectangular wave but also its number and location in each control interval. Several control methods to increase control performance have also been proposed.

研究分野：制御工学

キーワード：パルス幅変調 非線形システム 厳密線形化 追従制御

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

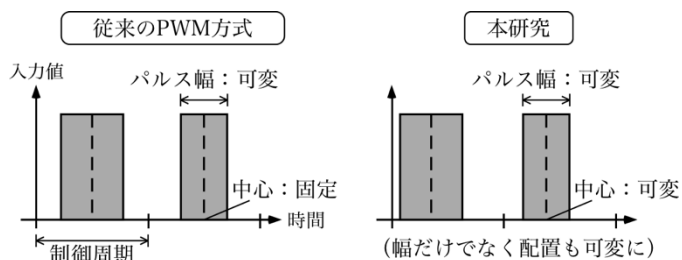
(1) 制御系を構築する際に、経済的・技術的な要因でパルス幅変調 (pulse-width modulation, PWM) 方式により駆動するアクチュエータを使うことがしばしばある。この方式は、瞬間的な出力値が予め定められた数個の値のいずれかに限られるが、その出力を高頻度で切り替えることで時間平均的に中間値を生成するというものである。例えば、モータ制御に用いられるスイッチングアンプは、直流電源 (電圧:  $E$  [V]) のオン状態の比率を調整して  $0 \sim E$  [V] 間の電圧をモータに与えるが、出力電圧調整を可変抵抗によっておこなうリニアアンプと比べて、消費電力を大幅に削減できることはよく知られている。また別の例として、流体量の加減制御装置にはバルブ開度の精密な調整が難しいために開度を全開か全閉に限って信頼性を向上させているものもある。

しかしながら、この PWM 方式は高速高精度のモーションコントロールには不向きであると考えられてきた。制御周期に対するオン状態の比率 (以下、デューティ比) の大小操作が系の状態に非線形的に影響を与えることが主たる理由である。この非線形特性に関する問題は古くから認識されており、特に PWM 方式のフィードバック系の安定化については、「非線形系=線形近似モデル+誤差」という捉え方に基づいた方法によって議論されてきた。一方、高速な位置決めや軌道追従を目指す場合に、フィードフォワード入力を併用すべきであることはよく知られている。この場合、入力設計に高精度なモデルを必要とするが、設計を容易にするために近似モデルを採用して制御性能を犠牲にするか、精密加工機ではその近似誤差が無視できないものになり得るため PWM 方式ではなくリニアアンプ等の高コストな連続値入力装置を用いることが多いという現状であった。

(2) これらを背景に、本研究助成開始前より、報告者は PWM 方式によって駆動する制御系 (以下、PWM 型入力系) を高精度に制御するために基礎検討をおこなってきた。一般に、PWM 方式における矩形波の中心あるいは前縁は、制御周期内の特定の位置に固定される。そこで、矩形波の幅だけでなく矩形波の数と配置も可変にし、増えた自由度を活かして非線形特性の緩和を試みてきた。なお、近年のデジタル信号処理技術の向上により矩形波の任意位置での切り替えは実現可能な技術であり、その点を念頭に置いた方法といえる。

### 2. 研究の目的

本研究は、PWM 型入力系に対し、制御周期内において通常可変とされるパルス矩形波の幅だけでなくその数や配置も操作することによって系の非線形特性を消去する方法を開発し、それを基に制御系の性能を向上させることを目的とした。問題の数学的な特徴付けから開始し、方法の開発と実システムへの適用・評価を通して、基礎理論の構築を試みた。



### 3. 研究の方法

前述の初期段階の研究を通じて、PWM 型入力系を高精度に制御するための基礎理論を構築するには、自由度を増やした矩形波群が与える系への影響を数学的に特徴付け、その特徴に基づいて制御系設計手法を開発し、実システムで検証するという流れを採ることが有意であると考えに至った。

(1) 制御系において状態量に対する入力作用は、状態空間におけるベクトル (以下、制御ベクトル) で表現できる。PWM 型入力系を扱うことの難しさは、ある固定した状態量に対して、入力ベクトルの大きさだけでなく向きも矩形波に応じて変化する点にある。この本質を理解するために、矩形波から制御ベクトルへの対応を写像として捉えて問題を数学的に定式化するとともに、微分幾何論、位相空間論等を用いて幾何学的に解析するという戦略をとった。

① ある条件を満たす低次の系については制御ベクトルの集合が数学的に凸集合を成すことを事前調査で確かめており、この特徴から非線形特性を厳密に線形化できる (=制御ベクトル集合内部に線分を見出すことができる) という事実が導かれる。一般の系も同じ特徴をもつと予想され、これを理論的に証明することを試みた。

② 上述の線分が存在するとして、線分上の点と矩形波の対応関係 (=入力変換則) を具体的に求める必要がある。高次系の場合、非線形方程式から直接導くことはおそらく不可能であるので、この導出問題を最適化問題に帰着させるアプローチを採った。このとき、解の一意性など問題のもつ性質を知ることは重要であり、上述①と並行してその追究に取り組んだ。

(2) 制御ベクトルの成す集合の定量的な評価を行い、その集合を制御系設計にどのように活用

するかを制御応用の立場から探究した。

① 目標値応答の向上させるフィードフォワード入力生成には、制御対象の逆モデルがよく使われる。しかし、PWM 型入力系に限らず、制御対象の離散時間モデルが不安定零点をもち、安定な逆モデルを得られないことがしばしばある。本研究の厳密線形化法は多入力線形系への変換を可能にするため、その応用によって安定な逆モデルの構成法の開発を目指した。

② 多入力線形化とは異なるアプローチとして、単入力系の制御ベクトルの方向を変えることで、零点の配置調整ができる可能性を追究した。

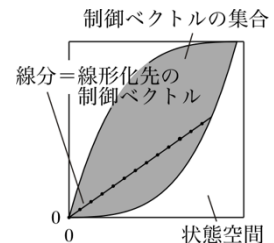
③ サンプル点（サンプリング周期＝制御周期）における状態量をねらい通りに制御できたとしても、通常、サンプル点間の波打ち現象（リップル）が少なからず生じてしまう。多入力線形化、制御ベクトルの選択、参照軌道の最適化等を応用することで、サンプル点間応答の向上を目指した。

(3) メカニカルシステムを中心とした実システムへの適用（数値シミュレーション）を通して、提案手法の有効性を多角的評価を試みた。特に、全状態量に対する完全な線形化ではなく重要とされる部分空間のみに対する線形化の有効性を評価した。

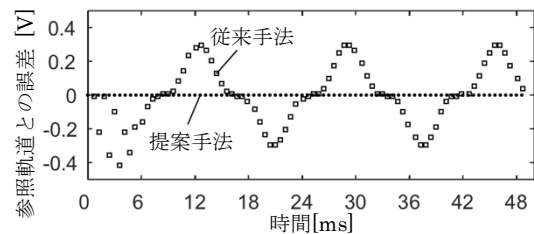
#### 4. 研究成果

(1) パルス生成器と任意の二次線形系の離散時間直列結合系について、パルス生成の自由度を利用した厳密線形化可能性を追究し、その可能性と二次系の固有値、可制御性、制御周期の間にある関係を明らかにした。

① 二次系について、離散時間系の制御ベクトルの集合が原点に関する星状集合（ある種の凸集合。右図の灰色の領域）であることを証明し、厳密線形化は常に可能である（つまり、常に灰色領域内に原点から端点とする線分を見出すことができる）ことを示した。一方、線形化則の一意性と変換先の線形系のクラスに関しては、システムの固有値・可制御性・制御周期による差異があることを確認した（下記文献[4, 13]）。

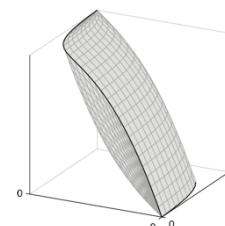


② PWM 系の制御器を設計するにあたり、厳密線形化のための計算は予め実施しておくことができ、制御則は選定した線形モデルに対して設計すればよい。この方策を二次の物理系に適用して、その有効性を確認した（単相インバータ（右図）：文献[1, 4]、剛体系：文献[7]、スラストで駆動するマスバネダンパ系：文献[4]）。また、文献[13]では、厳密線形化が安定不動点の吸引領域の評価に役立つことや、二次のサブシステムが支配的である高次系に対しても本手法が有効であることを確認した。



図：単相インバータへの適用（文献[4]より）

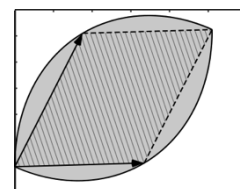
(2) 制御周期内に複数のパルスを配置し操作量の数やシステムの次数以上とすることで、虚部がナイキスト角周波数より大きい複素固有値をもたない三次系や、相異なる実固有値のみをもつ一般の高次系についても、離散時間系制御ベクトルの集合が凸集合となることを確かめた（文献[5, 9]。右図は三次系の例を示している）。より広いクラスのシステムが同様の性質をもつことに報告者は肯定的であるが、その証明は完成しておらず、今後の課題である。



図：三次系の制御ベクトル集合

(3) 制御対象の制御量に対応する部分空間に対し、制御ベクトル集合の射影の内部が空でないならば、その部分空間上で多入力線形系を考え制御系設計に利用できる。

① 固有値に幾何学的な重複がなくシステムが可制御であるとして、パルス生成自由度がシステムの次数と同じであるならば、制御ベクトルは内部が空でない凸状の集合を成すことは上記(1)・(2)で明らかにした。このとき、制御ベクトル集合内に並行多面体を埋め込むことで（右図）、変換先である線形系の入力最大でシステムの次数と同じだけ考えることができることを示した。また、入力数最大であれば、入力値制約が伴うものの全状



図：制御ベクトル集合に平行四辺形を埋め込んだようす

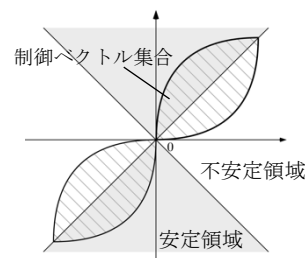
態目標軌道に対する完全追従制御が可能になることも報告した（文献[2]）。

② 単相インバータのサンプル点間応答の向上を目的に、全状態完全追従制御を実装した上で、目標軌道の最適化する問題と解法を提案した（文献[1]）。

③ パルス生成自由度が少ない場合でも、部分空間上で多入力線形系を導入し、状態の部分的な目標軌道に完全追従できることを示した（文献[6]）。また、入力値制約を満たしやすくするために、パルス生成自由度を十分に与えた上で敢えて目標軌道を部分的とする戦略を提案し、その有効性をガルバノスキャナ（五次系）に対する数値シミュレーションを通して確かめた（文献[12]）。

(4) 厳密線形化において、変換先の線形系（正確には制御項）には選択自由度が残されている。変換先が単入力系であるとき、これは制御ベクトルの方向を選択することに相当するが、選択の結果は離散時間ダイナミクスの零点配置に影響を与えることがわかる。

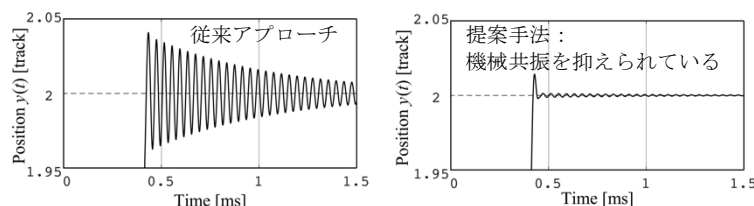
① ゼロ次ホールド離散化では零点が不安定となる制御対象であっても、上述の性質を利用すれば安定な零点をもつ離散時間系に変換できるものがあることを示した（文献[7, 8, 11]）。また、その離散時間関係の逆モデルをフィードフォワード入力設計に利用できることを示した（文献[7]）。



図：状態空間上での安定零点を生成する制御ベクトルの領域

② 二次・三次の制御対象について、零点の安定性とパルス生成則の関係について考察し、可観測正準形を用いて、その関係を状態空間上で可視化する方法（右図）を提案した（文献[8, 11]）。

(5) 従来、ゼロ次ホールド入力を前提に議論されてきた周波数整形型終端状態制御を応用して、PWM型入力系に対して適用できる同様の制御法を提案し、ハードディスクドライブ（HDD）モデルに対しその有効性（共振抑制性能）を示した（文献[10]）。



図：HDDモデルへのPWM周波数整形型終端状態制御の適用（文献[10]）

(6) 上記の成果の概要（一部を除く）について、解説論文を発表した（文献[3, 9]）。

[1] 永藤, 鈴木, 平田, 自動制御連合講演会予稿集, 0641, 2017.  
[2] 鈴木, 平田, 計測自動制御学会論文集, Vol. 54, No. 2, pp. 194-200, 2018.  
[3] M. Suzuki, M. Hirata, Proc. of IEEJ SAMCON, IS1-4, 2018.  
[4] M. Suzuki, M. Hirata, Proc. of IEEE AMC, pp. 138-143, 2018.  
[5] M. Suzuki, M. Hirata, NOLTA, IECIE, Vol. 9, No. 2, pp. 204-217, 2018.  
[6] M. Suzuki, M. Hirata, Proc. of NOLTA, pp. 124-127, 2018.  
[7] 爲國, 平田, 鈴木, 電気学会メカトロニクス制御研究会, MEC-18-12, pp. 59-63, 2018.  
[8] 鈴木, 爲國, 平田, 自動制御連合講演会, pp. 1450-1454, 2018.  
[9] 鈴木, 平田, システム/制御/情報, Vol. 63, No. 3, pp. 118-123, 2019.  
[10] 瀧澤, 鈴木, 平田, 日本機械学会情報・知能・精密機器部門講演会, 2D09, 2019.  
[11] M. Suzuki, K. Tamekuni, M. Hirata, Proc. of ASCC, pp. 1199-1204, 2019.  
[12] 北垣, 鈴木, 平田, 計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 2H1-4, 2020.  
[13] M. Suzuki, M. Hirata, Automatica, Vol. 116, 2020.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Masayasu Suzuki, Mitsuo Hirata	4. 巻 116
2. 論文標題 Star-shaped control-vector sets of second-order systems with PWM-type input	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Automatica	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) 10.1016/j.automatica.2020.108924	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 鈴木雅康, 平田光男	4. 巻 63
2. 論文標題 多自由度バルス幅変調方式による制御	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 システム/制御/情報	6. 最初と最後の頁 118/123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 鈴木雅康, 平田光男	4. 巻 54
2. 論文標題 PWM型入力サンプル値系における多入力厳密線形化法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 194/200
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.9746/sicetr.54.194">https://doi.org/10.9746/sicetr.54.194</a>	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 Masayasu Suzuki, Mitsuo Hirata	4. 巻 9
2. 論文標題 Exact linearization of third-order systems with pulse-width-modulation-type inputs	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IECIE	6. 最初と最後の頁 204/217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1587/nolta.9.204">https://doi.org/10.1587/nolta.9.204</a>	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10件(うち招待講演 0件/うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Masayasu Suzuki, Kohta Tamekuni, Mitsuo Hirata
2. 発表標題 A remark on zero placement in exact linearization using multi-degree-of-freedom PWM-type input
3. 学会等名 Asian Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北垣 瞭太, 鈴木 雅康, 平田 光男
2. 発表標題 多自由度PWM型入力によるガルバノスキャナの部分状態完全追従制御
3. 学会等名 第7回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masayasu Suzuki, Mitsuo Hirata
2. 発表標題 Partial state perfect tracking control of PWM-type input systems
3. 学会等名 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 爲國康太, 平田光男, 鈴木雅康
2. 発表標題 PWM型入力による不安定零点の安定化に関する一考察
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 2018年

1. 発表者名 鈴木雅康, 爲國康太, 平田光男
2. 発表標題 多自由度PWM型入力を用いた厳密線形化の零配置に関する一考察
3. 学会等名 自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 瀧澤侑也, 鈴木雅康, 平田光男
2. 発表標題 PWM型入力系の周波数整形型終端状態制御に関する一考察
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 2019年

1. 発表者名 Masayasu Suzuki, Mitsuo Hirata
2. 発表標題 A study on PWM-type input systems: Ability of multiple pulses to generate arbitrary vectors and exact linearization
3. 学会等名 IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masayasu Suzuki, Mitsuo Hirata
2. 発表標題 Star-shaped input-value sets of second-order PWM-type systems
3. 学会等名 IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 永藤壮大, 鈴木雅康, 平田光男
2. 発表標題 参照信号最適化をともなう単相インバータの制御：厳密線形化法によるアプローチ
3. 学会等名 自動制御連合講演会
4. 発表年 2017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