

平成 22 年 5 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19560445

研究課題名（和文） 電磁駆動弁のモデル予測制御

研究課題名（英文） Model predictive control of electro mechanical valve system

研究代表者

川邊 武俊 (KAWABE TAKETOSHI)

九州大学・システム情報科学研究院・教授

研究者番号：60403953

研究成果の概要（和文）： エンジンの吸排気弁を電磁駆動弁とすることで、自動車の大幅な燃費向上が見込まれている。本研究では、独自のモデル予測制御法を開発し、電磁駆動弁の運動制御に適用した。弁の移動時間はエンジンの回転数が高くなるほど短く制限されるが、移動時間は従来法では十分短くない。そこで、提案手法により移動時間短縮し電機子のソフトランディングを可能とした。制御則を開発すると共に実験装置を試作し、計算機シミュレーションと実験の双方により検証した。

研究成果の概要（英文）： This research deals with a model predictive control method for a electro mechanical valve. Computer simulations were carried out to test the effectiveness of the model predictive controller. Further, an experimental tesbed was constructed. A traveling time of an armature could be decreased and a soft landing of the armature can be obtained using the model predictive controller by comparison with the conventional method.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	800,000	240,000	1,040,000
2008 年度	600,000	180,000	780,000
2009 年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	1,800,000	540,000	2,340,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード： 制御工学， 機械力学・制御， モデル予測制御， ロバスト性， 電磁駆動弁

1. 研究開始当初の背景

環境問題を受けて、自動車の燃費性能の向上は社会的急務である。燃料電池など新動力源の開発に平行して、ガソリンエンジンなど従来の動力源の燃費性能の改良が必要と

されている（ハイブリッド電気自動車もガソリンエンジンを搭載している）。ガソリンエンジンの性能は吸気弁や排気弁（以下、吸気弁と総称する）の開閉タイミングに強く支配される。現行型の吸排気弁は、クランク軸

(出力軸)の回転と連動する機械的なリンクやカムで開閉するため、開閉タイミングは必ずしも常時理想的とはならない。そこで、吸排気弁をクランク軸の回転とは無関係に、電磁石で開閉する電磁駆動弁とすることが研究されてきた。その結果、電磁駆動弁により、燃費・動力性能は15%以上向上すると見込まれるが、本研究で解決する課題が未解決であることを主要因として、実用化に到っていない。電磁駆動弁は、ばねで懸吊されたアーマチャの両側に電磁石を設け、電磁力でアーマチャを吸着保持し、アーマチャに直結した弁を開閉する駆動方式をとることで、省電力化が達成されている。ところが、電磁力はアーマチャと電磁石との距離(ギャップ)の2乗に反比例して増加するため、アーマチャは電磁石に激突しやすく、激突すれば乗用車としては容認できない騒音を発するのみならず、弁自身の寿命を縮めることになる。そこで、電磁石の電流を操作量とし、アーマチャが電磁石に接触する瞬間の速度を制御し低減する研究が行われてきた。従来研究では、弁が開状態から閉状態となるときアーマチャの衝突速度を許容値以下とする制御法、弁を半閉状態に保つ制御法などが提案されている。しかし、燃焼室内の圧力変化、ばね定数の劣化・ばらつきなどに対しロバストに速度を制御することは実用上不可欠なのであるが、これらの文献では触れられていない。一方、申請者(川邊)は、ロバスト性を確保した上で、弁の速度制御を可能とする方法を先駆けて提案しているので、他グループに対して先進的な立場を保っていると考えられる。

2. 研究の目的

エンジンの吸排気弁を電磁駆動弁とすることで、自動車の大幅な燃費向上が見込まれている。ところが、現状の電磁駆動弁は騒音が発生する、開閉速度が仕様を満たさないなどの問題があり、実用化されていない。そこで、独自のモデル予測制御法を開発し、電磁駆動弁の運動制御に適用することで、電磁駆動弁実用化の道を開拓する。移動時間(弁が開状態から閉状態、あるいは閉状態から開状態へ遷移するのに要する時間)はエンジンの回転数が高くなるほど短く制限されるが、移動時間は従来法では十分短くない。そこで移動時間短縮、を可能とする制御手法を開発する。制御則を開発するとともに実験装置を試作し、計算機シミュレーションと実験の双方で制御手法を検証する。

3. 研究の方法

研究は、計算機シミュレーションを援用する机上検討(理論的検討)と、実機と類似した性質を持つテストリグを用いての制御実

験の両面から、相互に補完する形で結論を導くこととする。全体構想を図に示す。

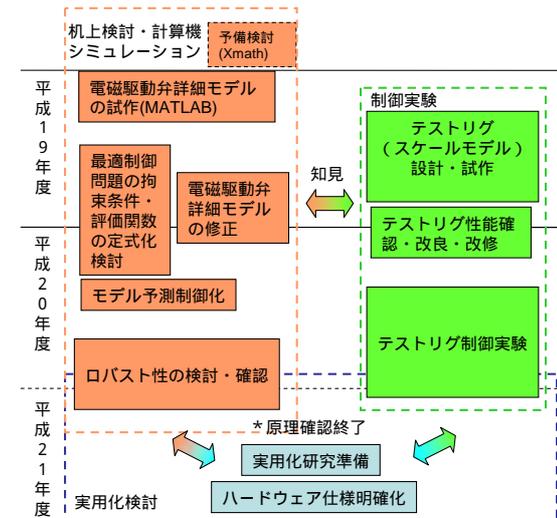


図1 研究計画

(1) 平成19年度

電磁駆動弁詳細モデルの試作・修正：MATLAB(Simulink)上に電磁駆動弁の詳細モデル(電流系の応答遅れ、電磁力の非線形性などを含む)を製作し、電磁駆動弁の応答詳細を再現できるモデルを試作する。制御則の効果は、このモデルと後述するテストリグでの実験により補完的に検証する。モデル作成には申請者が過去に得たノウハウを投入する。また、テストリグの実験結果に基づくモデルの修正を行う。

最適制御問題としての拘束条件の取り扱い、評価関数の定式化の検討：計算機シミュレーションを援用し、19年度以前に検討した拘束条件・評価関数の設定法(研究目的欄に記載)の効果を確認し、必要な点を改良する。

テストリグの設計・試作：制御則の効果を実験的に検証するためのテストリグ(スケールモデル)を試作する。テストリグの概略を図に示す。テストリグは、駆動方式など基本特性は電磁駆動弁と同じとする。ただし、1)動作は閉弁状態から開弁状態だけを再現可能、2)電気系の応答時定数や、機械系の固有振動数は実機と同等ながらも稼動部質量は実機より小さくする、などの工夫を施し、大容量電源などを必要としない、低コストで簡易に製作可能な設計とする。

(2) 平成20年度

電磁駆動弁詳細モデルの試作・修正：MATLAB(Simulink)上に電磁駆動弁の詳細モデル(電流系の応答遅れ、電磁力の非線形性

などを含む)を製作し、電磁駆動弁の応答詳細を再現できるモデルを試作する。制御則の効果は、このモデルと後述するテストリグでの実験により補完的に検証する。モデル作成には申請者が過去に得たノウハウを投入する。また、テストリグの実験結果に基づくモデルの修正を行う。

最適制御問題としての拘束条件の取り扱い、評価関数の定式化の検討：計算機シミュレーションを援用し、19年度以前に検討した拘束条件・評価関数の設定法(研究目的欄に記載)の効果を確認し、必要な点を改良する。

テストリグの設計・試作：制御則の効果を実験的に検証するためのテストリグ(実機のスケールモデル)を試作する。テストリグは、駆動方式など基本特性は電磁駆動弁と同じとする。ただし、1)動作は閉弁状態から開弁状態だけを再現可能、2)電気系の応答時定数や、機械系の固有振動数は実機と同等ながらも稼働部質量は実機より小さくする、などの工夫を施し、大容量電源などを必要としない、低コストで簡易に製作可能な設計とする。

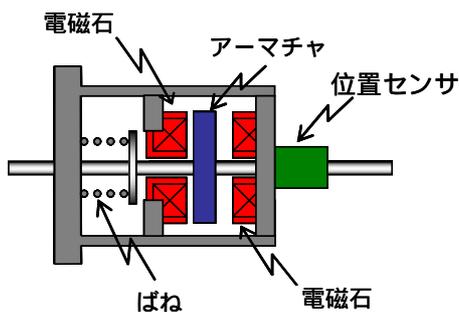


図2 電磁駆動弁のスケールモデル

(3) 平成21年度

モデル予測制御化：前年度に検討した最適制御問題を基に、モデル予測制御則を構成する

最適制御問題の解が解析的に表現できない場合は、連続変形法アルゴリズムの適用を検討する。

テストリグ性能確認・改修：机上検討から得られた知見を基に、テストリグが必要な再現性を持つかを確認するとともに、必要に応じて改修を行う(アーマチュアの素材変更など)。

ロバスト性の検討・確認・制御実験：過去の知見・ノウハウを基に、制御則のロバスト性(燃焼圧変化、ばねの劣化・品質のばらつきその他)を計算機シミュレーションとテストリグを用いた実験で検証する。テストリグで再現不能な条件は計算機シミュレーションを実行し補完する。

実用可能性の検討・実用化の検討：このフェーズでは、制御性能に加え、演算量、制御則実装の可能性(計算機仕様)電磁駆動弁のばね定数、可動部質量、電流制御系の仕様など必要なハードウェア仕様を明らかにし、次の段階である実用化の可能性を明らかにする。また、この段階では企業の支援を仰ぎ、例えば生産コストを見積もるなど、次年度からの実用化研究(企業・他研究機関との共同研究)に備える。

4. 研究成果

磁駆動弁では、電磁石の吸引力の及ぶ範囲が短いため、弁の移動の途中からしか制御ができず、かつ同じ理由から、加えることのできる操作量はアーマチュアに対する吸引力だけに限られ、反発力は発生できない。これらの制約条件や、移動時間の制限は、従来の固定ゲイン制御手法で制御仕様として陽に扱うことができなかった。この問題を抜本的に解決するため、終端時刻と終端条件とを固定した最適制御問題を基礎としたモデル予測制御手法を開発する。評価関数は操作量の2乗を制御開始時刻から終端時刻(固定)まで積分した値とし、終端条件を固定とすると、この最適解はほぼ解析的に求まり、操作量を正の値の範囲とする最適制御則の導出は直線探索問題に帰着できるため、計算時間を2点境界値問題として解く場合より短縮することが可能となった。すなわち、終端時刻を移動時間の制限から決定し、弁の目標位置における位置と速度を終端条件とすれば、制約条件を満たし、制御に要するエネルギーを最小とするモデル予測制御則が、リアルタイム制御が可能な僅かな計算量で得られるようになった。提案手法のシミュレーションの結果を図3に示す。

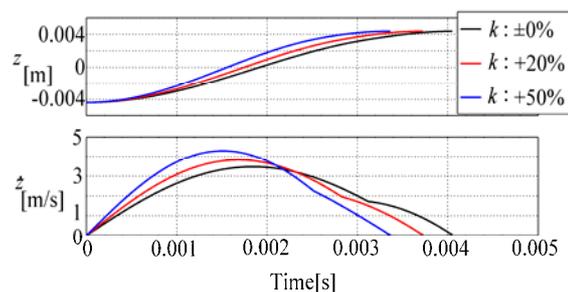


図3 提案手法のシミュレーション結果：上図は電機子の変位、下はその速度。

図3より変位は目標位置に到達し、制御が完了していることを示している。また制御終了時に電機子の速度が零にできていることを示している。ソフトランディングが達成できていると言える。また、実機ではバネ定数

のばらつきが存在すると思われるため、バネ定数が予測モデルと異なる場合の計算機シミュレーションも行っている。そのような相違があっても制御目的が達成できていることが分かる。

また、それに続く研究として、積分器を含めて制御問題を考え、入力信号のスムージングを可能とする制御を提案した。この制御により、入力信号の立ち上がりの様子を重み行列の調整により設計することを可能とした。

また、図4、5に示す実験装置を作成し、検証実験を行えるようにし、図6の良好な実験結果を得ることができた。また、この実験により、これまでの研究では曖昧にされていた、電磁駆動弁ハードウェアに関する仕様条件に関する知見を得ることができたと言える。



図4 実験装置全体図

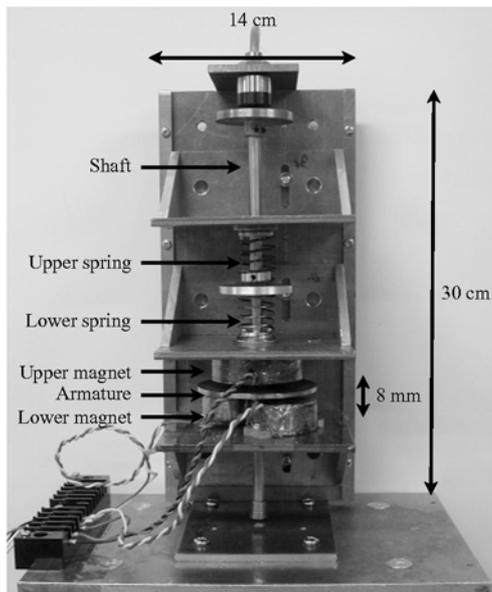


図5 電磁駆動弁のテストリグ

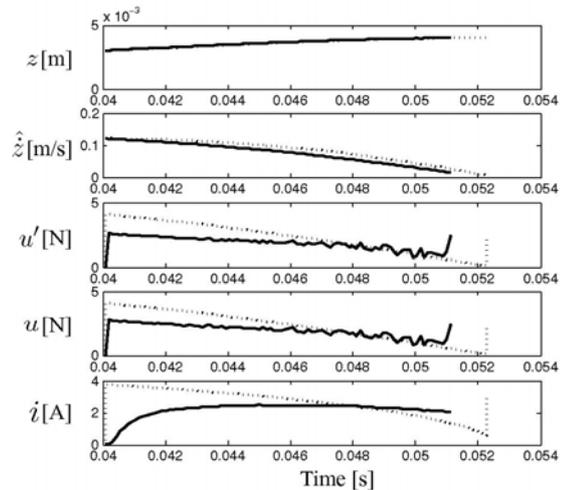


図6 実験結果の一例：上から電機子変位、電機子の速度の推定値、回路上の入力、制御入力、電磁石に流れる電流を表し、実線が実験結果、点線がシミュレーション結果。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

{ 雑誌論文 } (計 件)

{ 学会発表 } (計 4 件)

清木場卓, 向井正和, 川邊武俊, 電磁駆動弁運動制御へのモデル予測制御応用の検討, 計測自動制御学会第7回制御部門大会資料, 2007

清木場卓, 向井正和, 川邊武俊, モデル予測制御による電磁駆動弁の運動制御, 計測自動制御学会第8回制御部門大会資料, 2008

A. Wahyudie, T. Nakao, M. Mukai, T. Kawabe, A Design of Electromechanical Valve Control System using Model Predictive Controller, ICROS-SICE International Joint Conference 2009, 2009

中尾泰三, アディ ワヒュディ, 甲斐寿光, 向井正和, 川邊武俊, プラントの拡大によるモデル予測制御の操作量の連続化の一方法, 第11回「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集, 2009

{ 図書 } (計 件)

{ 産業財産権 }

出願状況 (計 件)

名称 :

発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6．研究組織

(1)研究代表者

川邊 武俊 (Kawabe Takethoshi)
九州大学・システム情報科学研究所・教授
研究者番号：60403953

(2)研究分担者

向井 正和 (Mukai Masakazu)
九州大学・システム情報科学研究所・助教
研究者番号：50404059

(3)連携研究者

()

研究者番号：