

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第4672008号
(P4672008)

(45) 発行日 平成23年4月20日 (2011. 4. 20)

(24) 登録日 平成23年1月28日 (2011. 1. 28)

(51) Int. Cl.

F I

F O 1 B 11/00 (2006. 01)

F O 1 B 11/00

F O 1 B 23/10 (2006. 01)

F O 1 B 23/10

F O 2 B 71/00 (2006. 01)

F O 2 B 71/00

F O 1 B 7/16 (2006. 01)

F O 1 B 7/16

請求項の数 19 (全 18 頁)

(21) 出願番号 特願2007-508824 (P2007-508824)
 (86) (22) 出願日 平成17年4月19日 (2005. 4. 19)
 (65) 公表番号 特表2007-532827 (P2007-532827A)
 (43) 公表日 平成19年11月15日 (2007. 11. 15)
 (86) 国際出願番号 PCT/EP2005/004165
 (87) 国際公開番号 W02005/100764
 (87) 国際公開日 平成17年10月27日 (2005. 10. 27)
 審査請求日 平成20年2月26日 (2008. 2. 26)
 (31) 優先権主張番号 PCT/EP2004/004140
 (32) 優先日 平成16年4月19日 (2004. 4. 19)
 (33) 優先権主張国 欧州特許庁 (EP)

(73) 特許権者 502196511
 ボルボ テクノロジー コーポレイション
 スウェーデン国 エス-4 0 5 0 8 イ
 エテポリィ
 (74) 代理人 100098729
 弁理士 重信 和男
 (74) 代理人 100116757
 弁理士 清水 英雄
 (74) 代理人 100123216
 弁理士 高木 祐一
 (74) 代理人 100089336
 弁理士 中野 佳直
 (72) 発明者 リンドゲルデ, オロフ
 スウェーデン国 エス-4 3 1 4 9 メ
 ルンダル トルグ 1 3 エ克蘭ダ
 最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 フリーピストンエネルギー変換器を制御する方法およびシステム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

可動質量に作用する電磁力を用いたフリーピストンエネルギー変換器を制御する方法であって、少なくとも2つのシリンダのうち、少なくとも一方のシリンダにおける外乱作用が他方のシリンダにおいて影響しないように切り離す方法であり、

前記可動質量のストローク中に前記変換器の前記可動質量に作用するであろう見込みの力を、前記可動質量が所定の位置 (x_0) に位置している前記変換器内の特定の現在の状態および/または条件に基づいて予測する第1ステップと、

前記可動質量が前記ストロークに沿った特定の位置 (x_3) において所望の基準条件または状態に達するように、前記可動質量に作用する電磁力を発生させる値を前記予測された見込みの力に基づいて評価または推定する第2ステップと、

前記ストロークに沿った前記可動質量の前記位置 (x_0) に続く少なくとも1つの次の位置 (x_1 ; x_2) について前記第1ステップと前記第2ステップとを繰り返す第3ステップと、を含む方法。

【請求項 2】

前記所望の基準条件または状態が、所望の運動エネルギーである、請求項1に記載の方法。

【請求項 3】

前記変換器の前記可動質量に作用する前記見込みの力の今後の成長または今後の値が、前記フリーピストンエネルギー変換器内の観測および/または推定された特定の現在の状

10

20

態および／または条件の評価に基づいて予測される、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 4】

前記変換器の前記可動質量に作用する前記電磁力と、前記変換器に入力される燃料とが制御変数であり、前記変換器の着火時刻と出力電力とが、前記制御変数によって制御される出力値である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 5】

前記可動質量に作用する前記電磁力が、前記可動質量の物理モデルに基づき、前記フリーピストンエネルギー変換器内の圧力信号および／または位置信号および／または速度信号から評価または推定される、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 6】

前記変換器の前記可動質量の位置および／または速度を評価または推定するための前記物理モデルが、加えられた全部の力に対して前記可動質量がどのように動くかに基づく、請求項 5 に記載の方法。

【請求項 7】

前記圧力を評価または推定するための前記物理モデルが、前記変換器の少なくとも 1 つのシリンダの中の圧力センサが発生させる圧力信号のフィルタリングに基づく、請求項 5 に記載の方法。

【請求項 8】

前記可動質量に作用する前記電磁力 (F_{e1}) が、

(1) 所定の位置 (x_0) における、前記可動質量の運動エネルギーまたは速度の現在の値および前記関連シリンダ内の圧力の値を測定または推定するステップと、

(2) 前記ストロークの終わり近く、または特定位置 (x_3) における前記可動質量の前記所望の見込みの運動エネルギーを考量するステップと、

(3) 前記位置 (x_3) において前記可動質量の前記所望の見込みの運動エネルギーに今後達するように、一定の電磁力を、ステップ (1) で測定または推定された前記値に基づいて予測し、同じ力を前記可動質量に作用させるステップと、

(4) ステップ (1) に戻り、前記可動質量の少なくとも 1 つの次の位置 ($x_1; x_2$) について前記手順を繰り返すステップとによって評価される、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 9】

請求項 1 乃至 8 の少なくとも一項に記載の方法を実施するためにフリーピストンエネルギー変換器を制御するシステム。

【請求項 10】

前記変換器 (1) の前記可動質量に作用する見込みの力を予測することと、前記可動質量が前記ストロークに沿った特定の位置において所望の運動エネルギーのような所望の基準条件または状態に達するよう前記可動質量に作用する電磁力 (F_{e1}) を発生させる値を、評価および／または推定することとを行う速度サーボコントローラ (50) を備える、請求項 9 に記載のシステム。

【請求項 11】

前記可動質量に作用する前記見込みの力の今後の成長または今後の値を予測するために前記速度サーボコントローラ (50) によって評価される、前記フリーピストンエネルギー変換器 (1) 内の特定の現在の状態および／または条件を観測および／または推定するオブザーバ (60) を備える、請求項 10 に記載のシステム。

【請求項 12】

前記速度サーボコントローラ (50) が、シリンダ内の推定圧力 (p) と、推定される現在の位置 (x) における前記可動質量の推定運動エネルギー (E_k) と、前記ストロークに沿った特定の位置における前記可動質量の所望の基準となる運動エネルギー (E_k^{ref}) の値とを示す入力信号を受け取る安定化補償器 (52) を備え、前記安定化補償器 (52) が、前記可動質量に作用する電磁力 (F_{e1}) の値を出力するために与えられる、請求項 10 に記載のシステム。

【請求項 13】

前記オブザーバ(60)が、着火時刻推定器(61)と、ピストン状態推定器(62)と、出力電力推定器(63)とを備える、請求項11に記載のシステム。

【請求項 14】

前記ピストン状態推定器(62)が、前記可動質量の推定位置および推定運動エネルギーを評価するために、前記可動質量によって生じた、ホール効果センサのスイッチング信号(x_{hall})と、前記可動質量に作用する前記電磁力(F_e)の現在の値と、前記シリンダ内の前記圧力(P)の現在の値とを受け取る、請求項13に記載のシステム。

【請求項 15】

着火時刻コントローラ(70)と出力電力コントローラ(80)とを備える、請求項9

10

【請求項 16】

請求項9乃至15の少なくとも一項に記載のシステムを備えるフリーピストンエネルギー変換器。

【請求項 17】

プログラム可能なマイクロコンピュータ上で実行される場合に、請求項1乃至8の少なくとも一項に記載の方法を実施するように適応されているか、請求項1乃至8の少なくとも一項に記載の方法において用いられるように適応されているコンピュータプログラムコード手段を含むコンピュータプログラム。

【請求項 18】

20

インターネットに接続されたコンピュータで実行される場合に、請求項9に記載のシステムまたはその構成要素にダウンロードされるように適応された、請求項17に記載のコンピュータプログラム。

【請求項 19】

請求項17に記載のコンピュータプログラムコード手段を含み、コンピュータ可読媒体に格納されたコンピュータプログラム製品。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、フリーピストンエンジンまたはフリーピストンエネルギー変換器を制御する

30

方法およびシステムに関する。

【背景技術】

【0002】

フリーピストンエネルギー変換器は、少なくとも1つのシリンダの中に自由に動くピストンを少なくとも1つ有し、通常、そのピストンにはクランクシャフトもカムシャフトも接続されていない。このことは、非常にコンパクトで効率的なエンジンの設計を可能にするが、ピストン運動の正確な制御、ならびに少なくとも1つのシリンダのインレットポートおよびアウトレットポートを開閉するバルブの作動および運動の正確な制御を必要とする。これらの運動および作動は、電子クランクシャフトおよび電子カムシャフトの機能を実現する制御システムによって制御される。

40

【0003】

フリーピストンエネルギー変換器は、通常は、燃焼エネルギーを電気エネルギーまたは機械エネルギーまたは水力エネルギーに変換するために提供される。

【0004】

そのようなフリーピストンエンジンの利点の1つは、圧縮比をストロークごとに制御できることである。これは、従来の燃焼エンジンでは不可能である。この特性は、フリーピストンエネルギー変換器において予混合圧縮着火(HCCI)を実現する可能性を開くものである。しかしながら、そのようなエンジンの不利点は、外乱に対してロバストな制御システムを与えることが困難なことである。

【0005】

50

たとえば１つのシリンダに１つのピストンを含むそのようなフリーピストンエネルギー変換器の信頼性および効率は、外乱に対して非常に敏感である。これは、２つのピストンが互いに強く結合していて、一方のピストンに影響を及ぼすイベントが他方のピストンにも同様に影響を及ぼすためである。

【０００６】

特許文献１では、軸方向に並べて配置され、互いに対向している内部燃焼ピストンのペアを含むリニア発電機の運動を制御する方法が開示されている。その場合は、発電機の往復運動サイクルの間に得られる、発電機に作用する抵抗力が、少なくとも中央のストローク範囲において発電機の運動速度にほぼ比例するように、電流吸収が制御される。

【０００７】

【特許文献１】米国特許第６１８１１１０号明細書

【非特許文献１】Levine, W. S. 「The Control Handbook」
(CRC Press、１９９６年) ７３４頁

【発明の開示】

【０００８】

本発明の１つの目的は、外乱作用が少なくとも１つのピストンおよび／またはシリンダに影響を及ぼす場合でもフリーピストンエネルギー変換器のロバストな制御が可能であるような、フリーピストンエネルギー変換器を制御する方法およびシステムを提供することである。

【０００９】

本発明の別の目的は、燃焼エネルギーを電気エネルギーおよび／または機械エネルギーまたは他の任意の種類エネルギーに変換するために、１つのシリンダに１つのピストンを含むフリーピストンエネルギー変換器を制御する方法およびシステムを提供することである。この方法およびシステムによって、２つのシリンダのうちの少なくとも一方におけるピストンおよび／またはプロセスの少なくとも１つに影響を及ぼすあらゆる外乱および／または環境条件に少なくとも実質的には左右されない、フリーピストンエネルギー変換器の効率的な制御が実現される。

【００１０】

これらの目的は、請求項１に記載の方法、および請求項８に記載のシステムによって達成される。

【発明を実施するための最良の形態】

【００１１】

従属請求項は、本発明による方法およびシステムの有利な実施形態を開示する。

本発明のさらなる詳細、特徴、および利点については、以下の内容を概略的に示す図面と関連させての、後述の本発明の例示的实施形態の説明から明らかになるであろう。

【００１２】

図１は、例示的フリーピストンエネルギー変換器１の断面図である。この変換器１は、第１の燃焼室１２を有する第１のシリンダ１１の中で動く第１のピストン１０と、第２の燃焼室２２を有する第２のシリンダ２１の中で動く第２のピストン２０とを備える。

【００１３】

第１のシリンダ１１は、第１のピストン１０によって開閉される第１および第２の吸気開口部１３と、第１および第２のバルブ１５によってそれぞれ開閉される第１および第２のインレットおよび／またはアウトレット開口部１４とを有する。第２のシリンダ２１は、それに応じて、第２のピストン２０によって開閉される第１および第２の吸気開口部２３と、第１および第２のバルブ２５によってそれぞれ開閉される第１および第２のインレットおよび／またはアウトレット開口部２４とを備える。

【００１４】

第１のピストン１０と第２のピストン２０とは、接続シャフト３０で互いに接続されている。さらに、第１のシリンダ１１と第２のシリンダ１２との間に電気機械が配置される。この電気機械は、実質的に、シャフト３０の周囲に固定された少なくとも１つのコイル

10

20

30

40

50

40と、シャフト30に固定された少なくとも1つの永久磁石41とを備える。コイル40および永久磁石41の寸法および位置は、コイル40内での永久磁石41の軸方向の動きがコイル40内に電流を誘起し、逆に、コイル40に電流が印加されると永久磁石41に軸方向の力がかかるよう、それらが互いに電磁的に作用することが可能であるように決定される。結果として、この電気機械は、発電機およびモータの両方の動作が可能である。

【0015】

さらに、第1および第2のバルブ15、25を作動させるアクチュエータ、燃料および/またはガスなどを噴射するインジェクタ、ならびに各種動作状態(温度、圧力、ピストン10、20の位置など)を検出するセンサがフリーピストンエネルギー変換器1に設けられるが、図1ではこれらを図示していない。

10

【0016】

図2は、本発明による、フリーピストンエネルギー変換器1を制御する例示的システムの主要構成要素および主要構造のブロック図である。このシステムは、実質的に、速度サーボコントローラ50、オブザーバ60、着火時刻コントローラ70、および出力電力コントローラ80を備える。この制御システムの主な機能は、2つのシリンダ11、21における燃焼の作用を切り離すことである。

【0017】

このシステムの第1の入力は、第1の加算器81を介して出力電力コントローラ80に接続される、変換器1の基準出力電力値 P^{ref} を入力するために設けられる。このシステムの第2の入力は、第2の加算器71を介して着火時刻コントローラ70に接続される、ピストン10、20の上死点(TDC)または下死点(BDC)を基準とする着火時刻 t_{ign}^{ref} の基準値を入力するために設けられる。

20

【0018】

変換器1の好ましい2つの主要制御変数は、変換器1の可動質量(すなわち、ピストン10、20、シャフト30、および永久磁石41)に作用する電磁力 F_{e1} 、および変換器1への燃料入力 Q_{comb} である。これらの変数によって制御される好ましい出力値は、それぞれ、ピストン10、20の上死点(TDC)または下死点(BDC)を基準とする着火時刻と、変換器1の出力電力である。

【0019】

性能を向上させるために、基準信号 P^{ref} および t_{ign}^{ref} から制御コマンド Q_{comb} および F_{e1} へのフィードフォワードコントローラを用いることが可能である。明確化のために、図2にはフィードフォワードコントローラを示していない。

30

【0020】

使用可能ではあるがここでは特に取り上げない他の制御変数が、バルブを開く時刻、燃料噴射時刻、および所望の電磁力を得るための電気機械の電流制御である。同様に、制御される出力は、たとえば、着火時刻ではなく、特定の環境制約および環境条件の下での変換器1の出力電力および最大効率であろう。

【0021】

速度サーボコントローラ50の全般的な機能は、可動質量が、ストロークに沿った特定の位置において(好ましくは関連シリンダ11、21の中でのストロークの終わり近くで、特に次の燃焼イベントにおいて)、所望の基準条件または基準状態(好ましくは所望の基準となる運動エネルギー)に到達するよう、ピストン10、20、およびシャフト30のストロークの間に変換器1の可動質量に作用する力を予測すること、および変換装置(図示せず)によって、コイル40を流れる適切な電流に変換される電磁力 F_{e1} を表す値を評価および/または推定することである。そのような速度サーボコントローラ50を導入することによって、フィードバック制御システムは、プロセス外乱に対して格段にロバストになる。

40

【0022】

オブザーバ60の全般的な機能は、フリーピストンエネルギー変換器1内での特定の最

50

新（現在）の状態および／または条件を観測および推定することであり、観測および推定された状態および／または条件は、特に、速度サーボコントローラ 50 が、前述の力の今後の成長または今後の値を予測するために用い、評価する。

【0023】

この目的のために、オブザーバ 60 の入力に変換器 1 の関連センサ出力に接続され、オブザーバ 60 のいくつかの第 1 の出力が速度サーボコントローラ 50 の入力に接続される。

【0024】

オブザーバ 60 の第 2 の出力が、第 2 の加算器 71 に接続され、これによって、基準着火時刻の値と推定着火時刻の値との差が着火時刻コントローラ 70 に入力され、その出力が速度サーボコントローラ 50 に接続される。

10

【0025】

最後に、オブザーバ 60 の第 3 の出力が第 1 の加算器 81 に接続され、これによって、基準出力電力の値と推定出力電力の値との差が出力電力コントローラ 80 に入力され、出力電力コントローラ 80 は、その出力において、関連の燃料噴射装置を制御するための、変換器 1 への燃料入力 Q_{comb} の値を発生させる。

【0026】

このシステムにより、変換器 1 は、出力電力の基準値 P^{ref} および着火時刻の基準値 t_{ign}^{ref} を入力し、変換器 1 の可動質量に作用する電磁力 F_{e1} と燃料入力 Q_{comb} とを制御することによって、所望の出力電力 P と、TDC または BDC を基準とする所望の着火時刻 t_{ign} とが得られるように制御される。

20

【0027】

そのようなシステムでフリーピストンエネルギー変換器 1 を制御するためには、以下の観察結果を考慮しなければならない。まず、変換器 1 は、そのようなものであることから、不安定なシステムであり、燃焼プロセスは非線形である。さらに、変換器 1 は、（たとえば燃焼エネルギーの突然の減少のような）プロセス外乱に対して敏感である。最後に、変換器 1 は、イベントトリガシステムであり、複数の入力および複数の出力（MIMO）を有する。

【0028】

前述のように、外乱に対して敏感である理由は、2 つのシリンダ 11、21 の燃焼特性に強い関連があることである。一方のシリンダ 11（21）における外乱が他方のシリンダ 21（11）における燃焼イベントに影響を及ぼし、それが最初のシリンダ 11（21）における燃焼に影響を及ぼし、これが繰り返される。したがって、外乱に対して一層ロバストであって、複数の入力および複数の出力（MIMO）を有するフリーピストンエネルギー変換器 1 を制御することが可能な、ロバストなイベントトリガシステムが必要である。

30

【0029】

これは、一般に、本発明による方法およびシステムにより、2 つのシリンダ 11、21 における燃焼の作用を切り離すことによって達成される。

【0030】

これらの作用を切り離すために、速度サーボコントローラ 50 およびオブザーバ 60 に関するシステム設計を以下のように提供する。

40

【0031】

速度サーボコントローラ 50 の設計は、ある基準値に基づく。基準値は、たとえば、ピストン 10、20 のストロークの特定点（特にストロークの終わり近く）（または、変換器 1 の別の条件または状態）におけるピストン 10、20 の所望の運動エネルギーである（これは、全ストロークの間の位置または速度軌道に通常は従う先行技術の場合と反対である）。ピストンの所望の基準となる運動エネルギーは、速度サーボコントローラ 50 で電気機械を制御すること、特に、適切な電磁力 F_{e1} が永久磁石 41 に加わるようコイル 40 を流れる電流に変換される値を発生することによって達成される。この特徴により、

50

コントローラを設計する場合の自由度が増える。

【 0 0 3 2 】

さらに、速度サーボコントローラ 5 0 の設計は、あるモデルに基づく。すなわち、電気機械を制御する、速度サーボコントローラ 5 0 の出力値（加えられた電磁力を発生させる値）は、ピストン 1 0、2 0、およびシャフト 3 0 の可動質量のモデルに基づき、特に後述の内容に従って、フリーピストンエネルギー変換器 1 内の圧力信号、位置信号、および速度信号から評価される。

【 0 0 3 3 】

変換器 1 の可動質量の位置および速度を推定するために、オブザーバ 6 0 は、加えられた全部の力（すなわち、実質的には電磁力とシリンダ内のガス圧）に対して可動質量がどのように動くかという物理モデルに基づく。そのようなオブザーバ 6 0 はさらに、障害検出（たとえば、ホール効果センサ、圧力センサ、電気機械などの故障の検出）に用いることが可能である。圧力を推定するために、圧力信号のモデルベースフィルタリングを追加導入することが可能である。

10

【 0 0 3 4 】

速度サーボコントローラ 5 0 のさらなる詳細を、図 3 のブロック図に示す。この図には、フリーピストンエネルギー変換器 1 およびオブザーバ 6 0 も同様に示してある。サーボコントローラ 5 0 は、実質的に、安定化補償器 5 2 およびサーボ補償器 5 3（たとえば、P I コントローラ）を備える。これは、ロバストサーボ機構問題を解決する、コントローラの標準的な構成であることが好ましい（たとえば、非特許文献 1 を参照されたい）。

20

【 0 0 3 5 】

安定化補償器 5 2 は、シリンダ内の推定圧力 p と、推定（最新または現在）位置 x における可動質量の推定運動エネルギー E_k とを示す、オブザーバ 6 0 によって評価された入力信号を受け取る。さらに、安定化補償器 5 2 は、着火時刻コントローラ 7 0 によって設定される、ピストンのストロークの終わり近く（またはピストンの特定位置）における所望の基準となる運動エネルギー E_k^{ref} の値を受け取る。電磁力 F_{e1} の値は、安定化補償器 5 2 の出力信号であり、受信された入力信号から安定化補償器 5 2 によって計算されたものであるが、その値が第 3 の加算器 5 1 に送られる。

【 0 0 3 6 】

サーボ補償器 5 3 の第 1 の入力、所望の基準となる運動エネルギー E_k^{ref} の値を受け取り、第 2 の入力、オブザーバ 6 0 によって推定された運動エネルギー E_k の値を受け取る。サーボ補償器 5 3 の出力は、第 3 の加算器 5 1 に接続される。これによって、安定化補償器 5 2 の出力信号とサーボ補償器 5 3 の出力信号との和が、電磁力 F_{e1} の値として、前述の、変換器 1 内のコイル 4 0 を流れる適切な電流を発生させる変換装置（図示せず）に送られる。

30

【 0 0 3 7 】

速度サーボコントローラ 5 0 および特に安定化補償器 5 2 によって実施されるモデルベースのシミュレーションについて、図 4 を参照して例示的に説明する。この図は、速度サーボコントローラ 5 0 が、ピストンのストロークの間に可動質量に作用する力を予測することによって、電磁力 F_{e1} の値を与える様子を示している。以下のアルゴリズムが実施される。

40

- 1．第 1 の位置 x_0 における、ピストンの運動エネルギー E_k （または速度 v ）の値および関連シリンダ内の圧力 p の値を測定または推定する。
- 2．ストロークの終わり近く、または特定位置 x_3 における所望の基準となる運動エネルギー E_k^{ref} を考量する。
- 3．位置 x_3 において所望の基準となる運動エネルギー E_k^{ref} に達するように、一定の電磁力 F_{e1} を、ステップ 1 で測定または推定された値に基づいて予測する。
- 4．ステップ 1 に戻り、ピストンの第 2 の（次の）位置 x_1 について手順を繰り返す。

【 0 0 3 8 】

図 4 の曲線 A は、ピストンの位置 x_i を表し、曲線 B は、ピストンの速度 v （運動エネ

50

ルギー E_k) を表し、曲線 C は、速度サーボコントローラ 50 の出力において要求される電磁力 F_{e1} の値を表す。各曲線は、横軸の時間 t に対して表されている。

【 0 0 3 9 】

電磁力 F_{e1} が完全に予測された場合、この力は、全ストロークにわたって一定になる。しかしながら、図 4 に示すように、この予測は、外乱やモデルの不完全さのために、正確でないのが普通である。したがって、電磁力は、図 4 に示すように、ストロークの間に変化する。

【 0 0 4 0 】

電磁力 F_{e1} は、安定化補償器 52 によって以下のように計算される。

【 0 0 4 1 】

10

1. エネルギーバランス：

電気機械によって力が加えられる距離を x_{range} で表す。電磁力の開始位置と終了位置とを、それぞれ、 x_1 、 x_2 で表す。すなわち、 $(x_1 - x_2) = x_{range}$ である。これと同じ表記方法を圧力 p_1 および p_2 と速度 v_1 および v_2 にも適用する。

ロバストサーボ機構問題は、次のように示される。初期速度 v_1 および初期圧力 p_1 に対し、ロバストな安定化コントローラを次式のように設計する。

【 数 1 】

$$v_2 = v_{ref} \quad (1)$$

20

ここで、 v_{ref} は、 x_2 における所望の速度を表す。さらに、電磁力 F_{e1} が、次式のように、ストロークの間は一定であるとする。

【 数 2 】

$$F_{el} = \text{constant for } x_1 \geq x \geq x_2 \quad (2)$$

次式のように、実施された仕事は、運動エネルギーの損失に等しい。

【 数 3 】

30

$$\int_{x_1}^{x_2} F_{tot}(x) dx = \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) \quad (3)$$

力の合計を、次式のように、電磁力、2つのシリンダからの圧力 $p(t)$ による力、およびモデル化されていない作用（摩擦、熱損失など）およびプロセス外乱が原因と考えられる他の力 F_{Δ} の和であるとする。

【 数 4 】

40

$$F_{tot} = F_{el} + pA + F_{\Delta} \quad (4)$$

電磁力 F_{e1} が、サーボ補償器の出力 F_{e1}^{serv} と、安定化補償器の出力 F_{e1}^{stab} との和であるとする。したがって、(2) ~ (4) から次式が成り立つ。

【 数 5 】

$$(F_{el}^{stab} + F_{el}^{serv}) x_{range} + \int_{x_1}^{x_2} (Ap(x) + F_{\Delta}) dx = \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) \quad (5)$$

50

サーボ補償器の出力が次式で与えられるとする。

【数 6】

$$F_{el}^{serv} x_{range} + \int_{x_1}^{x_2} F_{\Delta} dx = 0$$

(6)

したがって、次式が成り立てば、(5)および(6)からサーボ問題(1)が解決される。

【数 7】

$$F_{el}^{stab} = \frac{m(v_{ref}^2 - v_1^2)}{2x_{range}} - \frac{A}{x_{range}} \int_{x_1}^{x_2} p(x) dx$$

10

(7)

【0042】

2. 圧力特性の予測：

一方の側のピストンについて考える。シリンダヘッドとピストンとの間の距離を x で表す。理想的なガスの断熱膨張（または断熱圧縮）においては、次式の関係が維持される。

【数 8】

$$\frac{dp}{p} = -\kappa \frac{dx}{x}$$

20

(8)

κ はストローク全体を通して一定であるとする。間隔 x [x_a x_b] にわたって(8)を積分すると、次式が成り立つ。

【数 9】

$$[\ln(\phi)]_{p(x_a)}^{p(x_b)} = -\kappa [\ln(s)]_{x_a}^{x_b}$$

30

(9)

【数 10】

$$\frac{p(x_b)}{p(x_a)} = \left(\frac{x_b}{x_a} \right)^{-\kappa}$$

(10)

40

したがって、

【数 1 1】

$$\begin{aligned} A \int_{x_a}^{x_b} p(s) ds &= \frac{Ap(x_a)}{x_a^{-\kappa}} \left[\frac{s^{1-\kappa}}{1-\kappa} \right]_{x_a}^{x_b} = \frac{Ap(x_a)}{(1-\kappa)x_a^{-\kappa}} (x_b^{1-\kappa} - x_a^{1-\kappa}) \\ &= \frac{Ax_a p(x_a)}{(1-\kappa)} \left(\left(\frac{x_b}{x_a} \right)^{1-\kappa} - 1 \right) \end{aligned}$$

(11)

10

フリーピストンエンジンの圧縮フェーズについて考える。インレットバルブ（またはポート）が開閉する位置を x_{ivo} で表す。さらに、インレットポートが開いたときのシリンダ内の圧力を p_{in} で表す。したがって、 x_1 [x_1 x_2] にわたってガスがピストン上で実施する仕事 W_{com} は、次式で与えられる。

【数 1 2】

$$W_{com} = \frac{Ax_{ivo}p_{in}}{(1-\kappa)} \left(\left(\frac{x_2}{x_{ivo}} \right)^{1-\kappa} - 1 \right) + Ap_{in}(x_{ivo} - x_1)$$

20

(12)

膨張フェーズの間にピストン上で実施される仕事 W_{exp} についても同じ方法の計算を行うことが可能である。ここで、(7) から、 F_{el}^{stab} が次式で与えられる。

【数 1 3】

$$F_{el}^{stab} = \frac{m(v_{ref}^2 - v_1^2)}{2x_{range}} - \frac{(W_{com} + W_{exp})}{x_{range}}$$

30

(13)

【0043】

3. ストロークの間の電磁力 F_{el} の更新：

セクション 1 および 2 では、電磁力 F_{el} がストローク全体を通して一定であると仮定してきた。しかしながら、式 (13) から、ストロークの間の任意の位置 x_i で電磁力 F_{el} を更新するのが単純明快である。ストロークの間に力を更新すると、コントローラが所望の基準となる運動エネルギー E_{kin} に達する可能性が高くなるので、ロバストネスが向上する。

40

【0044】

オブザーバ 60 は、フリーピストンエネルギー変換器 1 の特定の状態および条件を観測および推定する。図 5 は、オブザーバ 60 の主要構成部分を示しており、それらは、着火時刻推定器 61、ピストン状態推定器 62、および出力電力推定器 63 である。さらに、推定速度の値を推定運動エネルギー E_{kin} の値に変換する変換装置 64 が設けられる。

【0045】

オブザーバ 60 は、3つの入力 A、B、C を備える。これらはフリーピストンエネルギー変換器 1 のセンサ出力をピストン状態推定器 62 に接続する。第 1 の入力 A は、ピストンの作用を受けるホール効果センサのスイッチング信号 x_{hall} を受け取る。第 2 の入

50

力 B は、ピストンに作用する電磁力 F_{e1} の最新（現在）の値を受け取る。第2の入力 B は、出力電力推定器63にも接続されている。第3の入力 C は、シリンダ内の圧力 P の最新（現在）の値を受け取る。

【0046】

前述のように、可動質量（特にピストン）の位置および速度は、オブザーバ60が、加えられた力に対して可動質量がどう動くかの物理モデルに基づいて推定する。これは、ピストン状態推定器62が、受け取った3つの入力信号 A 、 B 、 C に基づいて実施する。これについては後で詳述する。

【0047】

着火時刻は、着火時刻推定器61が、位置、速度、および圧力に基づいて計算する。位置、速度、および圧力は、ピストン状態推定器62によって推定され、着火時刻推定器61の入力に与えられる。この計算は、ピストンのピーク圧力点と、ピストンの上死点（ TDC ）または下死点（ BDC ）との間の時間の測定値に基づいて行われる。これは、当業者から見れば、きわめて単純明快である。しかしながら、いくつかの観測を行うことが可能であり、それらの結果を考慮しなければならない。すなわち、

- 推定の質は、コントローラ50のサンプリング周波数と関係がある。
- シミュレーションによれば、着火がない場合に、現在フィードバックコントローラに問題が発生する可能性がある。これは、始動時や、不着火があった場合に於てはまるであろう。そのような問題を避けるために、着火が起こったかどうかのフラグ表示をセットする着火オブザーバを導入することが好ましい。

【0048】

オブザーバ60は、5つの出力 D 、 E 、 F 、 G 、 H を備える。第1の出力 D と第2の出力 E とを介して、ピストンの推定位置 x と、推定運動エネルギー E_k とが、それぞれ、安定化補償器52に与えられる。推定運動エネルギー E_k は、第2の出力 E からサーボ補償器53にも与えられる。

【0049】

推定出力電力 P は、第3の出力 F から第1の加算器81に与えられる。着火時刻は、オブザーバ60の第4の出力 G から第2の加算器71に送られる。最後に、推定圧力 p は、オブザーバ60の第5の出力 H を介して安定化補償器52に与えられる。

【0050】

可動質量（特にピストン）の位置および速度をピストン状態推定器62によって推定することは、本発明の方法およびシステムにとって非常に重要である。このフリーピストンエンジンまたはフリーピストンエネルギー変換器1では、可動質量の位置は、ホール効果センサ（または他のセンサ）によって測定される。これらのセンサは、たとえば可動質量上の磁石がセンサを通過したときに、フラグを立て、信号を発生させる。しかしながら、問題は、可動質量の位置および速度の推定を、ホール効果センサが信号を発生させたときだけでなく、任意の時点で行わなければならないことである。

【0051】

基本的な考え方は、可動質量に作用する全部の力 F_{total} を考慮に入れて可動質量の動きを推定するというものである。最も影響のある力は、電磁力と、シリンダ圧力による力である。図6によれば、ピストン状態推定器62は、可動質量の位置 x および速度 v を得るために全部の力を積分する二重積分器のモデルに基づいている。制御工学の分野では、この種の推定問題は、カルマンフィルタによって解決されることが多い。このケースでは、ピストンの運動が、加えられた力の線形関数であることから、カルマンフィルタの使用は十分に妥当である。しかしながら、他のフィルタも使用可能である。

【0052】

ホール効果位置センサを用いる場合の大きな問題は、このセンサが時刻トリガ方式ではなくイベントトリガ方式であることである。すなわち、位置測定値が正確なのはそれらが生成されたときだけであり、それらは同期更新されない。しかしながら、カルマンフィルタの場合は、時刻トリガ信号が必要である。この問題を解決するために、時変カルマンフ

10

20

30

40

50

フィルタを用いることが可能である。図 7 は、可動質量の位置および速度をフィルタが推定するシミュレーション例である。この図では、階段状プロット A が、ホール効果センサの出力信号を表し、曲線 B が、カルマンフィルタによって推定された位置を表す。曲線 C は、可動質量の推定速度である。

【 0 0 5 3 】

以下では、時変カルマンフィルタについて詳細に説明する。

離散時間モデルを次式で与える。

【 数 1 4 】

$$x(k+1) = Fx(k) + Gu(k) + v(k) \quad (14)$$

10

【 数 1 5 】

$$y(k) = C(k)x(k) + w(k) \quad (15)$$

これには次式の、プロセス外乱および測定ノイズの共分散行列が含まれる。

【 数 1 6 】

$$\begin{aligned} E\{v(k)v^T(l)\} &= R_1\delta_{kl} \\ E\{w(k)w^T(l)\} &= R_2\delta_{kl} \end{aligned}$$

20

カルマンフィルタは次式で与えられる。

【 数 1 7 】

$$\hat{x}(k+1) = F\hat{x}(k) + Gu(k) + K(k)(y(k) - C\hat{x}(k)) \quad (16)$$

ここで、利得 $K(k)$ は次式で与えられる。

【 数 1 8 】

$$K(k) = FP(k)C^T(CP(k)C^T + R_2)^{-1} \quad (17)$$

30

ただし、 $P(k)$ は、次の R i c c a t i の方程式の解である。

【 数 1 9 】

$$P(k+1) = FP(k)F^T - FP(k)C^T(CP(k)C^T + R_2)^{-1}CP(k)F^T + R_1 \quad (18)$$

通常は、カルマンフィルタの定常解が満たされる。すなわち、(1 8) は、次の代数方程式として解かれる。

【 数 2 0 】

$$P = \lim_{k \rightarrow \infty} P(k) \quad 40$$

しかしながら、カルマンフィルタ (1 6) は、次の時変系に対しても有効であることに注目されたい。

【 数 2 1 】

$$[F(k), G(k), C(k), D(k)]$$

これには時変共分散行列 $R_1(k)$ および $R_2(k)$ が含まれる。このような場合、(1 8) の定常解は存在しない。

フリーピストンエネルギー変換器エンジンにおいては、可動質量の動力学は次式で与え

50

られる。

【数 2 2】

$$\ddot{x} = F/m$$

(19)

ただし、 x は位置を表し、 F は、可動質量 m に加えられた力を表す。問題は、位置の測定値および力の推定値に基づいて速度 $\dot{x}$ を推定することである。(19) が線形なので、カルマンフィルタは、この用途に好適なオブザーバである。

(14) および (15) を (19) の離散時間表現とする。ただし、 u は、加えられた力であり、 y は位置測定値である。問題は、位置測定値がサンプルごとには更新されないことである。さらに、位置測定値は同期サンプリングされない。この問題は、次の時変 R_2 行列を考慮することにより、解決可能である。

10

【数 2 3】

$$R_2(k) = \begin{cases} \infty & \text{位置が更新されない場合} \\ \epsilon & \text{位置が更新された場合} \end{cases}$$

$R_2(k)$ の変動は次のように解釈できる。 $R_2 = \infty$ の場合は使用可能な測定値情報がない。これに対し、 $R_2 = \epsilon$ の場合は、ノイズが無視でき、測定値が非常に正確である。すべての k に対して $R_2 = \epsilon$ とし、 C 行列を次のように場合分けするのも、それと同じ意味になる。

20

【数 2 4】

$$C(k) = \begin{cases} 0 & \text{位置が更新されない場合} \\ C & \text{位置が更新された場合} \end{cases}$$

R i c c a t i 方程式の解：

次式を与える。

【数 2 5】

30

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ h & 1 \end{bmatrix} \quad C = [0 \quad c_{12}]$$

ここで、 h はサンプリングレートを表し、 c_{12} は $1/m$ に等しい。したがって、

【数 2 6】

$$\begin{aligned} FPF' &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ h & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & h \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ hp_{11} + p_{12} & p_{12}h + p_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & h \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} p_{11} & hp_{11} + p_{12} \\ hp_{11} + p_{12} & h^2p_{11} + 2p_{12}h + p_{22} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

40

であり、

【数 2 7】

$$\begin{aligned}
 FPC' &= \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ hp_{11} + p_{12} & p_{12}h + p_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ c_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{12} \\ p_{12}h + p_{22} \end{bmatrix} c_{12} \\
 FPC'CPF' &= \begin{bmatrix} p_{12} \\ p_{12}h + p_{22} \end{bmatrix} c_{12} [p_{12} \quad p_{12}h + p_{22}] c_{12} \\
 &= \begin{bmatrix} p_{12}^2 & p_{12}(p_{12}h + p_{22}) \\ p_{12}(p_{12}h + p_{22}) & (p_{12}h + p_{22})^2 \end{bmatrix} c_{12}^2
 \end{aligned}$$

であり、

【数 2 8】

10

$$CPC' + R_2 = \begin{bmatrix} 0 & c_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ c_{12} \end{bmatrix} + R_2 = p_{22}c_{12}^2 + R_2$$

したがって、

【数 2 9】

$$FPF' - FPC(CPC' + R_2)^{-1}CPF' + R_1 =$$

$$\begin{bmatrix} p_{11} & hp_{11} + p_{12} \\ hp_{11} + p_{12} & h^2p_{11} + 2p_{12}h + p_{22} \end{bmatrix} -$$

20

$$\frac{c_{12}^2}{p_{22}c_{12}^2 + R_2} \begin{bmatrix} p_{12}^2 & p_{12}(p_{12}h + p_{22}) \\ p_{12}(p_{12}h + p_{22}) & (p_{12}h + p_{22})^2 \end{bmatrix} + R_1$$

【0 0 5 4】

図 5 によれば、オブザーバ 6 0 のこの実施形態では、圧力信号はフィルタリングされない。しかしながら、圧力信号の、インテリジェントかつモデルベースのフィルタリングを実現することが有利であると考えられる理由は 2 つある。1 つの理由は、圧力信号が外乱および/または測定ノイズの影響を受けやすいであろうことを実験データが示していることである。もう 1 つの理由は、制御システム（特にフィードバック）が圧力信号の外乱に敏感であることをシミュレーションが示したことである。この問題を解決する 1 つの可能性は、ピストン状態推定器 6 2 を用いて、圧力信号のフィルタリングを、可動質量の位置および速度の推定と組み合わせることである。これは、前述の式（7）を用いることにより可能であろう。したがって、このアプローチは、圧力信号の、モデルベースのフィルタリングにつながるであろう。

30

【0 0 5 5】

様々な代替アプローチが可能である：

【0 0 5 6】

40

前述の速度または運動エネルギーの代わりに、シリンダ内のピーク圧力を制御変数として用いることも可能である。これは、よりシンプルな解決法であるという利点があるが、外乱に対するロバストネスは劣る。

【0 0 5 7】

可動質量の位置の検出に、ホール効果センサの代わりに他の位置センサを用いることが可能である。

【0 0 5 8】

着火サーボコントローラ 7 0 を用いる代わりに、他の好適な制御変数を用いることも可能である。代替として、たとえば、着火時刻コントローラの代わりに、速度サーボに基準値を与えるピーク圧力コントローラを用いることが可能である。

50

【0059】

可動質量の位置および速度は、電気機械の端子値と、たとえば、コイル40における電圧の位相および/またはコイル40を流れる電流の位相とを解析することによっても推定可能である。可能性のある利点は、ホール効果センサへの依存、および圧力センサへの依存がより少なくてもよいことである。

【0060】

前述の方法およびシステムは、特に、2つのピストンを有し、2ストローク燃焼を行うフリーピストンエネルギー変換器を対象としたものである。しかしながら、本発明の方法およびシステムは、多くの様々な設計のフリーピストン機械の制御に用いることが可能である。図9～12は、そのような例のいくつかを、図8による、前述の、中間に電気機械100を有する2つの燃焼室111および2ストローク燃焼設計と比較したものである。

10

【0061】

図9によれば、与えられる変換器は、一方の側に1つの燃焼室111を有し、他方の側にフリーピストンをガイドして減衰させるガススプリング112を有し、両者の間に電気機械100を有する。図10は、2つのピストンを有する1つの燃焼室111aが与えられた実施形態を示している。各ピストンは両側のガススプリング112によってガイドされ、各ピストンの側にある電気機械100によってそれぞれ制御される。図10の代替として、両側にも、ガススプリングの代わりに燃焼室を与えることが可能である。

【0062】

図11は、空気圧フリーピストンエンジンの実施形態を示す。この実施形態は、一方の側に燃焼室111を備え、他方の側に、空気、水素、または他の媒体を圧縮する圧縮器113を備え、その間に電気機械100を有する。電気機械の主目的は、これらのケースにおいて、フリーピストンエンジンの制御を可能にすることである。

20

【0063】

図12は、水圧フリーピストンエンジンの実施形態を示している。この実施形態は、一方の側に燃焼室111を備え、他方の側に水圧アクチュエータ114を備え、その間に電気機械100を有する。しかしながら、このケースでは、電気機械の代わりに水圧アクティベータを用いることも可能である。出力は水圧エネルギーである。これらのケースでは、制御システムは、電気機械の代わりに水圧アクチュエータを用いることが可能である。代替として、両者の間で、制御目的で小さな電気機械を水圧アクチュエータに追加することが可能である。

30

【0064】

本発明の制御システムは、様々な高速ならびに低速の入力（センサなど）および出力（アクチュエータなど）を非常に柔軟に含む。これにより、この制御システムを用いて完全なエンジン制御を行うことが可能である。本発明の制御システムを用いて、様々な燃焼プロセス（2または4ストローク）（HCCI、ディーゼル、電気着火など）および様々な燃料（ガソリン、ディーゼル、天然ガス、水素など）を制御することが可能である。

【0065】

本発明の方法およびシステムは、非フリーピストン機械または変換器の制御にも用いることが可能である。これらのケースでは、ピストン運動自体を、フリーピストン機械内のものとして制御することは不可能である。しかしながら、燃料噴射タイミング、バルブを開くタイミング、および電気火花（もしあれば）着火タイミングは、高速制御に用いられる可能性の例である。エンジンにISG（インテグレートッドスタータコンバータ）が装備されている場合は、それを制御システムに含めることが可能である。

40

【0066】

さらに、圧縮比を変えることが可能な、クランクシャフトエンジンが存在する。通常は非常に低速（数秒）である。

【0067】

提案される制御システムは、様々な高速ならびに低速の入力（センサ）および出力（アクチュエータ）を非常に柔軟に含む。これにより、この制御システムを用いて完全なエン

50

ジン制御を行うことが可能である。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 6 8 】

【図 1】フリーピストンエネルギー変換器の断面図である。

【図 2】本発明のシステムの主要構成要素のブロック図である。

【図 3】図 2 によるシステムの第 1 の構成要素のブロック図である。

【図 4】本発明のシステムの第 1 の主要構成要素の特徴を表す、本発明のシミュレーション例の結果である。

【図 5】図 2 によるシステムの第 2 の構成要素のブロック図である。

【図 6】ピストン運動のモデルの概略図である。

【図 7】フリーピストンエネルギー変換器における可動質量の推定位置および推定速度の、本発明のシミュレーションの結果である。

【図 8】第 1 のフリーピストンエネルギー変換器の構造の概略図である。

【図 9】第 2 のフリーピストンエネルギー変換器の構造の概略図である。

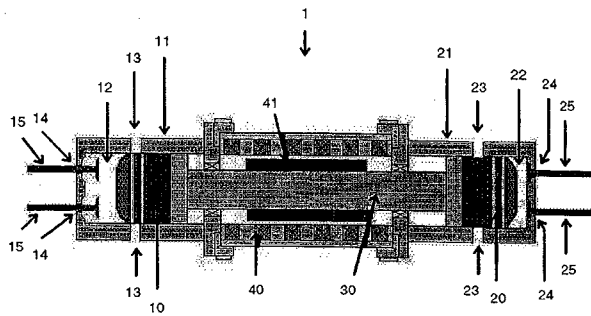
【図 10】第 3 のフリーピストンエネルギー変換器の構造の概略図である。

【図 11】第 4 のフリーピストンエネルギー変換器の構造の概略図である。

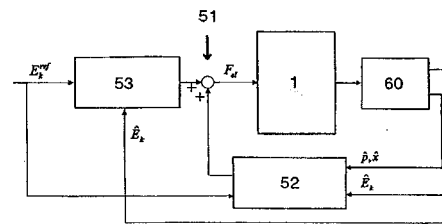
【図 12】第 5 のフリーピストンエネルギー変換器の構造の概略図である。

10

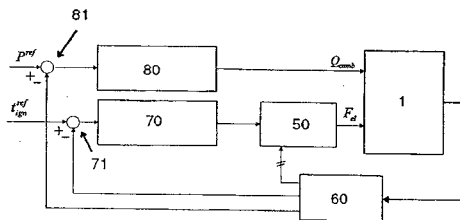
【図 1】



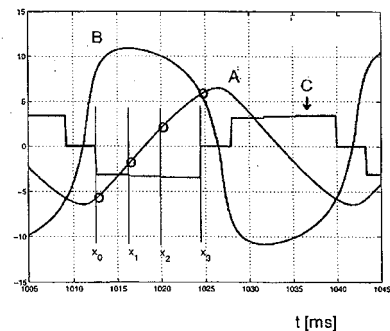
【図 3】



【図 2】



【図 4】



フロントページの続き

審査官 石黒 雄一

(56)参考文献 国際公開第2004/025098(WO, A1)

特表2003-519328(JP, A)

特表2000-504083(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

F01B 1/00-31/36

F02B 61/00-79/00

H02K 7/00- 7/20