慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	極値制御方式を用いたエンジン・パワートレインの実用的制御
Sub Title	Actual control of engine power train based on extreme control strategy
Author	大森, 浩充(OHMORI, HIROMITSU)
Publisher	
Publication year	2009
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2008.)
JaLC DOI	
Abstract	本研究では，連続可変動弁機構付きのＶ型6気筒SI(Spark Ignition)エンジンを制御対象として，(1)エンジン始動制御，(2)トルクデマンド制御を実現する制御手法を開発し，ベンチマークテストを行いすべての設計仕様が満足されていることを確認した．エンジン始動制御では，吸気バルブリフト量のみを主体としてエンジン制御をおこない，離散時間極値探査制御を実現した．また，トルクデマンド制御では，吸気バルブリフト量の制御にスミスのむだ時間補償に基づくセルフチューニング制御を応用し，ロバストな制御を実現した．
Notes	研究種目：基盤研究(C) 研究期間：2007～2008 課題番号：19560453 研究分野：工学 科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_19560453seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

様式 C -19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(C)
研究期間：2007～2008
課題番号：１９５６０４５３
研究課題名（和文）　極値制御方式を用いたエンジン・パワートレインの実用的制御

研究課題名（英文）　Actual control of engine power train based on extreme control strategy

研究代表者
大森　浩充（OHMORI HIROMITSU）
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号：90203942

研究成果の概要：本研究では，連続可変動弁機構付きのＶ型６気筒 SI(Spark Ignition)エンジンを制御対象として，(1)エンジン始動制御，(2)トルクデマンド制御を実現する制御手法を開発し，ベンチマークテストを行いすべての設計仕様が満足されていることを確認した．エンジン始動制御では，吸気バルブリフト量のみを主体としてエンジン制御をおこない，離散時間極値探査制御を実現した．また，トルクデマンド制御では，吸気バルブリフト量の制御にスミスのむだ時間補償に基づくセルフチューニング制御を応用し，ロバストな制御を実現した．

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
2007 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2008 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総　計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：工学
科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学
キーワード：エンジン始動制御，トルクデマンド，極値制御，セルフチューニング制御

１．研究開始当初の背景

近年自動車の電子制御が急速に進み，制御対象はエンジンのみならず，車両全体に及びつつある．1970 年代後半に点火時期制御や燃料噴射制御など，エンジン制御が部分的に電子化されたのを皮切りに，1980 年代にはエンジン制御全般が電子制御化された．また，1990 年代には変速機との協調制御などが適用され始め，さらに動力系に対して 1990 年代後半，エンジンとモータを搭載するハイブリッド車が量産されるに至った．一方，ABS やトラクションコントロールなどの車両運動に関する電子制御も進み，現在ではエンジン，ブレーキ，ステアリングなどを協調して電子制御する，車両統合制御システムの研究が盛んに行われ，実用化されている．車両統合制御システムでは，マスターとなる車両統合コントローラが，安全性，環境性，動力性，快適性などの観点により，エンジン・変速機・ブレーキなどに対し，ネットワークを介して指令を出力し，統合的に制御を行っている．ネットワーク上では駆動トルク，制動トルクなど，「トルク次元」での通信が行われるため，エンジンを，駆動トルクを発生する

ためのアクチュエータとみなしている．したがって，エンジン制御の構成を，エンジンのトルク管理に主眼をおいた，「トルクデマンド制御」に変更する必要があり，トルクを高精度に制御する重要性が増している．この研究では，エンジンの始動制御と同様に吸気バルブリフト量の役目に注目し，エンジンのトルクデマンド制御における制御手法について提案する．

２．研究の目的

制御対象は 3.0LV 型 6 気筒の SI エンジンであり，16 入力，5 出力のシステムである．入力はスロットル角，各気筒毎の点火時期，各気筒毎燃料噴射量，吸気バルブ位相角度，排気バルブ位相角度，吸気バルブリフト量からなり，出力はエンジン速度，スロットル通過空気流量，クランク角，左バンク空燃比センサ出力，右バンク空燃比センサ出力からなる．始動制御では空燃比をフィードバックできなかったがトルクデマンド制御では空燃比をフィードバック信号として観測できる．エンジンの入出力関係は非線形システムとして定式化する．ここで考える制御目的は下記の 3 点である．

・軸トルクが 0.5 秒以内に目標値±10Nm に落ち着くこと．
・軸トルクが目標値に漸近すること．
・目標値がステップ変化しても上記を満たすこと．

３．研究の方法

提案手法では吸気バルブリフト量に着目し，エンジンの軸トルクを制御する．点火時期は MBT に設定することで燃料の持つ化学エネルギーを最大限にトルクに変換する．スロットル角は全開にし，吸気バルブ位相角を最大限に進角することでポンプ損失の低減を図る．また，排気バルブを最大限に遅角することで，オーバーラップを最大にし，内部 EGR を増加させることによって排気の改善効果も期待できる．燃料噴射量制御では左右バンクの空燃比がフィードバック可能なことから PI 補償を加えることで，筒内吸入空気量の推定誤差による空燃比の理論空燃比との定常偏差を無くす．さらに，スミスのむだ時間補償を用いたセルフチューニング制御（STC)によってエンジンのトルク制御を行う．

(1) 軸トルクの推定

エンジンの軸トルクはフィードバックできない値である．従ってエンジンのトルクデマンド制御を行うためには軸トルクの推定が必要不可欠である．そこでフィードバック可能な値を用いてエンジンの軸トルクの推定を行う．

(2) 吸気バルブリフト量制御

吸気バルブリフト量を用いたトルクデマンド制御では上で述べたトルク推定器の推定トルクを目標値に制御することを考える．制御手法はエンジンサイクルによって発生するむだ時間の影響を考え，スミスのむだ時間補償を用いたセルフチューニング制御である．以下ではまず，吸気バルブリフト量と推定軸トルクの関係を表す数式モデルを導出し，吸気バルブリフト量コントローラをスミスむだ時間補償器を用いて設計する．

(3) 燃料噴射制御

トルクデマンド制御における燃料噴射制御では逆モデルによるフィードフォワード（FF）制御に PI 補償を加えたものである．逆モデルによる FF 制御は燃料の基本噴射量を決めるもので，構造は始動制御で述べたものと同じである．始動制御では空燃比をフィードバックできなかったが，トルクデマンド制御では左右バンク空燃比がフィードバック可能である．そこで，新たに PI 制御を加える．このことによって，筒内吸入空気量の推定誤差などによる空燃比の理論空燃比からの定常偏差を無くす効果が期待できる．

４．研究成果

本研究ではエンジンの始動制御とトルクデマンド制御の 2 つのベンチマーク問題に取り組んだ．

まず，エンジンの始動制御では，従来，スロットル角，点火時期，燃料噴射量の 3 種類の制御入力をもとに制御系を設計していたが，1.5 秒という僅かな時間でエンジンをオーバーシュートなく目標エンジン速度に漸近させることは容易ではなかった．なぜなら，スロットル角を用いた制御では，エンジン始動時において吸気室の圧力が高くなり，十分な吸気負圧を得ることができないからである．そのため，従来法ではスロットル角を最初は完全に閉じた状態にし，短時間で吸気室の圧力を下げることでエンジン速度のオーバーシュートを最大限に抑制する必要があった．しかしながら，1.5 秒以内に十分な吸気負圧を得ることが困難であり，結局オーバーシュートの低減には点火時期に頼るところが大きかった．従来法では点火時期を極端に進角させることによって，エンジンの出力トルクを低下させることでオーバーシュートを低減させていた．点火時期によるオーバーシュートの抑制はそれなりの効果はあるものの，極端な点火時期の進角はエンジンノックにつながる可能性がある．また，エンジン速度の大きな振動を引き起こし，ドライバ

への不快感につながる．さらに，燃料の燃焼エネルギーを効率よくトルクに変換できないことから燃費の悪化を引き起こす．

このような問題を解決するために近年注目されている可変動弁機構を積極的に活用したエンジン始動制御を提案した．提案法では特にエンジンの吸気バルブリフト量に着目し，吸気バルブリフト量によってエンジン速度を制御した．スロットル角主体の制御よりも吸気バルブリフト量主体の制御を行うことで，エンジン始動時の筒内吸入空気量を最初から減らすことができ，オーバーシュートを低減することができると考えたからである．また，吸気バルブリフト量以外の制御入力は燃費を考慮して設定した．スロットル角をフルスロットルとし，吸気バルブ位相角を進角させることでポンプ損失の低減を図り，点火時期を MBT に設定することで燃料の燃焼エネルギーを最大限に活用することで，燃費向上を狙った．

具体的な制御手法としては**離散型極値探索制御**をエンジンの吸気バルブリフト量制御に応用した．離散型の極値探索制御を応用した理由はエンジンの特性を考慮しやすいからである．本研究で扱ったエンジンは 6 気筒エンジンであり，各気筒の位相が 120°毎にずれて吸気を行うためこの期間をサンプル時間にすれば良い，また吸気からトルク発生までの時間は 4 サンプルであることから，摂動信号と評価関数の出力信号を 4 サンプルずらして相関をとることで，極値の探索方向を決めた．

その結果，エンジン速度のオーバーシュートをほぼ無くすことに成功し，エンジン速度の振動も無くなった．従来は 800rpm 程度までのオーバーシュートが見られたことから大幅に改善されたといえる．また，エンジンの始動完了時間も従来の 1.3 秒から 0.5 秒へと大幅に改善された．さらに，燃料噴射量も約半分にできた．これにより，エンジンの始動性はもとより燃費向上にも大きく貢献できる．

次に，エンジンのトルクデマンド制御について述べる．トルクデマンド制御ではこれまで一般的にマップを主体とした制御が広く用いられている．このマップ主体の制御では演算負荷が小さく，フィードフォワード特有の速応性を有するという利点がある．しかし，マップを作成するのには開発するエンジンごとに膨大な時間と労力が必要であるし，エンジンの製品間のバラツキや経時変化を考慮していないことから要求トルクの制御精度の悪化を招く恐れがある．

この問題を考慮して提案法では，**スミスのむだ時間補償**に基づいた制御法を提案する．ここでも，始動制御と同様に，可変動弁機構における吸気バルブリフト量の制御に重点を置いた．なぜなら，エンジンのトルクを決める量は本質的に筒内吸入空気量であり，筒内吸入空気量は吸気バルブリフト量で制御するのが一番効率的であると考えたからである．エンジンのトルクを吸気バルブリフト量で制御できれば他の入力を始動制御のように燃費を重視した設定にすることで燃費向上も見込める．そこで，本研究ではスミスのむだ時間補償を用いたセルフチューニング制御を吸気バルブリフト量制御器として提案した．この方法はエンジンの吸気からトルク発生までのむだ時間を陽に考慮した制御をスミスのむだ時間補償器で行う一方，補償器内のパラメータを**オンラインで同定**した値を基に調整するものである．コントローラ内のパラメータを適応的に変えることによって，燃料の特性，外部環境の変化，空燃比精度，吸気バルブの製品間のバラツキ，エンジンの経時変化といった様々な状況にもロバストな制御系を構成できる．また，トルクデマンド制御を行うに当たって，エンジンの軸トルクの推定が必要になったが，簡単な数式モデルに基づいた推定器も提案した．さらに，燃料噴射コントローラでは逆モデルによるフィードフォワードに **PI 補償**を加えることで空燃比の定常偏差を改善した．

結果として，目標軸トルクのステップ変化に対しても 0.5 秒以内に目標値$¥pm 10$Nm に推定軸トルクを到達させることができ，最終的に目標値に漸近させることもでき，制御目標を達成できた．すなわち，提案手法により要求トルクを素早く実現できることが示せた．

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 7 件）

① Shigehiro Sugihira, Noriaki Sato, Hiromitsu Ohmori, Adaptive Torque Demand Control of SI Engine with a Continuous Variable Valve Train, Proceedings of ICCAS-SICE 2009, Fukuoka International Congress Center, Fukuoka, Japan, August 18-21, 2009.「掲載決定」査読有

②Shigehiro Sugihira, Hiromitsu Ohmori, Model Based Starting Control of SI Engines via Adaptive Feedback Linearization, Proceedings of SICE Annual Conference 2008, The University Electro-Communications, 842/847, Japan, August 20-22, 2008. 査読有

③Shigehiro Sugihira, Hiromitsu Ohmori, Design of Starting Controller for Spark Ignition Engines Based on Adaptive Feedback Linearization, Proceedings of the 27th Chinese Control Conference, 566/571, Kunming, Yunnan, China, July 16-18, 2008. 査読有

④Shigehiro Sugihira, Hiromitsu Ohmori, Starting Speed Control of SI Engine Based on Extremum Seeking Control, Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control, 1036/1041, Seoul, Korea, July 6-11, 2008. 査読有

⑤Shigehiro Sugihira, Hiromitsu Ohmori, Starting Control of SI Engine Based on Adaptive Feedback Linearization, Proceedings of International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes(AdCONIP) 2008, 133/138, Jasper, Alberta, Canada, May 4-7, 2008. 査読有

⑥北園真也, 市川晃次, 大森浩充, 極値探索制御を用いたスロットル角制御手法とＳＩエンジン始動制御への応用, 計測自動制御学会 計測と制御, 47-3, 210/214, 2008. 査読有

⑦ Shigehiro Sugihira, Kouji Ichikawa and Hiromitsu Ohmori , Starting Speed Control of SI Engine Based on Online Extremum Control, SICE Annual Conference 2007, CR-ROM 1A01-1, 2007 年 9 月 20 日, Kagawa University, Takamatsu, 2007. 査読有

〔学会発表〕（計５件）

①杉平成広, 大森浩充, フィードバック線形化と適応制御手法に基づく SI エンジン始動制御, 電気学会平成 20 年電気学会全国大会シンポジウム, 2008 年 3 月 19 日, 福岡工業大学, 福岡. 査読無

②北園真也, 杉平成広, 大森浩充, 極値探査法を応用したＳＩエンジン始動制御, 計測自動制御学会 第 8 回制御部門大会, 2008 年 3 月 5 日, 京都大学吉田キャンパス. 査読無

③杉平成広, 大森浩充, 適応フィードバック線形化に基づく SI エンジン始動制御, 計測自動制御学会 第 8 回適応学習制御シンポジウム 2008 年 1 月 28 日 九州工業大学戸畑キャンパス 附属図書館 4 階ＡＶホール. 査読無

④北園真也, 市川晃次, 大森浩充, 極値探索制御を用いたスロットル角制御手法と SI エンジン始動制御への応用, 計測自動制御学会 第 36 回制御理論シンポジウム, 2007 年 9 月 6 日, ライフォート札幌, 札幌市. 査読無

⑤北園真也, 市川晃次, 杉平成広, 大森浩充, 極値制御方式によるスロットル角制御, 計測自動制御学会制御部門エンジンパワートレイン先端制御理論調査研究会, 2007 年 6 月 22 日, 上智大学中央図書館 L812 室、東京, 2007.査読無

６．研究組織

(1)研究代表者

大森　浩充（OHMORI HIROMITSU）

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：90203942

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし