

大規模データベースオンラインモデリングによる筒内吸入空気量の予測と SI エンジン始動制御への応用

小川 雅俊*・葉 怡君*・大貝 晴俊**

Estimation of the Mass of Air Intake to the Cylinder by Large Scale Database-based Online Modeling and Its Application for Cold Starting Control of SI Engine

Masatoshi Ogawa*, Yichun Yeh*, Harutoshi Ogai**

Abstract: In order to solve the global environmental protection and the energy depletion problem in recent years, the control technologies to improve the quality of engine in automobile are demanded. However, due to the developments of electrical and electronic mounting technology, advanced control of the power train has become possible. A new idea so called "Just-In-Time (JIT) modeling" have been developed which is a local modeling technique. To apply "JIT modeling" to a large amount of database online, "Large-scale database-based Online Modeling (LOM)" has been proposed. LOM is such a technique that makes the retrieval of "neighboring" data more efficient by using "stepwise method" and quantization. This paper presents an application of LOM for the cold starting control of Spark Ignition (SI) engine. It is necessary to calculate adequate the mass of air intake to the cylinder in the cold starting control. Therefore, LOM estimated the mass of air intake to the cylinder so that the desired engine speed in cold starting is controlled. Furthermore, an adequate fuel injection quantity is derived from the estimated mass of air intake to the cylinder and the fuel injection dynamic model.

Key Words: LOM, JIT modeling, dynamic modeling, engine cold starting control

1. 緒言

近年、計算機ハードウェアやデータベースシステム技術の発展に伴い、大量データの蓄積と高速検索が可能になったことなどを背景に、Just-In-Time^{1)~3)}(以後、JIT と略す。)モデリングとよばれる新しい考え方の局所モデリング手法が注目されている。これらは、観測したデータをそのままデータベースにあらかじめ蓄積しておき、システムの予測の必要が生じるたびに、現在のシステムの状態である要求点(Query)と関連性の高いデータをデータベースから近傍データとして検索し、検索したデータの出力を補間する局所モデルを構成して、要求点の出力を得るモデリング手法である。また、JIT モデリングは、観測データのさらなる蓄積が生じるたびにデータベースを更新し、対応していく方法である。

また、実プロセスの大規模なデータベースに JIT モデリングをオンラインで適用するにあたり、ステップワイズ法による実プロセスデータの位相空間の低次元化と、低次元化した位相空間の量子化による近傍検索の効率化と計算負荷の大幅な低減を図った手法として大規模データベースオンラインモデリング^{4)~9)}(Large-scale database-based Online Modeling, 以後、LOM と略す。)が提案されている。

本論文では、エンジン回転数制御を円滑に行なうために、データベースに基づく予測制御技術である LOM を応用する手法について述べる。理想的な空燃比を維持するためには、エンジン筒内に噴射される燃料噴射量を適切に導出する必要があり、そのためには将来の筒内吸入空気量の推定が重要となる。将来の筒内吸入空気量の推定については、スロットルを通過する空気量を積算し、推定するだけでは不十分であり、より適切に推定する手法が必要となる。そこで、本研究ではエンジン回転数制御を円滑に行なうために、エンジン筒内吸入空気量を推定する LOM システムの構築を行なうとともに、LOM を用いたエンジン制御系を設計する。LOM による予測方法は、データベースが更新されるため、将来的にデータベースの更新が可能となれば、従来のマップ関数による方法よりも経年変化や環境変化などに対応できる柔軟な予測が可能になると考えられる。また、これまで LOM では高炉^{4)~8)}や工業炉⁹⁾、廃棄物処理プロセス¹⁰⁾のようなプロセスに適用する研究は報告されているが、エンジンを対象として筒内吸入空気量を予測し、それをエンジン制御に応用した研究はほとんど報告されていない。

ここでは、計測自動制御学会エンジン・パワートレイン先端制御理論調査研究会におけるエンジンベンチマーク問題¹¹⁾のエンジン冷間始動制御への適用例を通して、その LOM による筒内吸入空気量の将来予測手法およびエンジン始動制御手法を説明する。制御対象はエンジンベンチマーク問題の 6 気筒の V 型ガソリンエンジンシミュレータとし、そのシミュレータを用いて設計し

* 早稲田大学 情報生産システム研究センター
福岡県北九州市若松区ひびきの 2-7

** 早稲田大学大学院 情報生産システム研究科
福岡県北九州市若松区ひびきの 2-7

* Information, Production and Systems Research Center,
Waseda University

** Graduate School of Information, Production and
Systems engineering, Waseda University
(Received April 24, 2009)

た制御系の制御性能が確認される。

以下、本論文の構成を述べる。2章では、JITモデリングおよびLOMについて紹介する。3章では、制御対象と問題設定について述べる。4章では、LOMによる筒内吸入空気量の予測方法とその予測例について述べる。5章では、LOMを応用したエンジン制御系の設計とその制御シミュレーションについて述べる。6章で本論文の結言を述べる。

2. 大規模データベースオンラインモデリング

(LOM: Large scale database-based Online Modeling)

大規模オンラインデータベースモデリングの基本的な考え方はJITモデリングに基づいている。本章では、まずJITモデリングについて説明する。

2.1 Just-In-Timeモデリング

JITモデリング¹⁾⁻³⁾では、制御あるいは予測の対象システムは非線形かつ動的なシステムであり、

$$\mathbf{y}(t+p) = f\{\mathbf{y}(t), \mathbf{y}(t-1), \dots, \mathbf{y}(t-n_y), \mathbf{u}(t-d), \mathbf{u}(t-d-1), \dots, \mathbf{u}(t-d-n_u)\} \quad (2.1)$$

で表わされる回帰モデル式で与えられると仮定する。ここで、 $\mathbf{u}(t)$ は時刻 t における対象システムの制御入力ベクトル、 $\mathbf{y}(t)$ は時刻 t における対象システムの観測出力ベクトル、 n_u は制御入力ベクトルの次数で、 n_y は観測出力ベクトルの次数、 p は予測時間、 d はむだ時間、 f は未知の非線形関数である。このとき、対象システムの入力ベクトル \mathbf{x}^k と出力ベクトル \mathbf{y}^k は、

$$\mathbf{y}^k = \mathbf{y}(k+p) \quad (2.2)$$

$$\mathbf{x}^k = f\{\mathbf{y}(k), \mathbf{y}(k-1), \dots, \mathbf{y}(k-n_y), \mathbf{u}(k-d), \mathbf{u}(k-d-1), \dots, \mathbf{u}(k-d-n_u)\} \quad (2.3)$$

で再定義する。ここで、対象システムからデータサンプリング可能な離散化時間を k と定義し、 \mathbf{x}^k と \mathbf{y}^k の組み合わせ $(\mathbf{x}^k, \mathbf{y}^k)$ をシステムの状態変数の一組としてデータセットと定義する。データセットはシステムの位相または相とよばれ、対象システムのとりうる位相全体を位相空間(Topological Space) T または相空間とよぶ。データセットが、時間推移に伴い $(\mathbf{x}^1, \mathbf{y}^1), (\mathbf{x}^2, \mathbf{y}^2), \dots$ のように対象システムから大量に取得され、データセット集合 $\{(\mathbf{x}^k, \mathbf{y}^k)\} (k=1, 2, \dots)$ としてデータベースに蓄積される。このとき、JITモデリングは予測や制御の要求のために蓄積されている $\{(\mathbf{x}^k, \mathbf{y}^k)\}$ から非線形関数 f を求めることに相当する。

たとえば、予測が必要となったとき、現在のシステムの状態 $(\mathbf{x}^{k_q}, \mathbf{y}^{k_q})$ は要求点(Query)とよばれ、この要求点に類似した近傍データセット $\{(\mathbf{x}^{k_i}, \mathbf{y}^{k_i})\} (k_i < k_q)$ を過去の観測データ集合から選出する。得られた近傍データセットからその出力を補間する局所モデルを構成し、

局所モデルを用いてシステムの出力 \mathbf{y}^{k_q} を予測する。その後、その局所モデルを廃棄し、次の予測では新たに観測データが更新されたデータ集合から近傍データセットを選出し、予測を行なう。

2.2 LOM

JITモデリングは、データベースから要求点の近傍データセットを検索するためにすべてのデータセットに対して距離を測り、順序付ける処理を、予測の都度実行する必要がある。そのため、多くの入力変数やデータセット数を伴う大規模データベースでは計算負荷の増大という問題が発生する。

そこで、LOM⁴⁾⁻⁹⁾では、JITモデリングを大規模な実プロセスのデータベースに適用するにあたり、ステップワイズ法による実プロセスデータの多次元位相空間の低次元化と低次元化した位相空間の量子化による近傍検索の効率化を行ない、計算負荷の大幅低減を図っている。LOMの概念図をFig.1に示し、その手順をつぎに示す。

- 1) あらかじめ観測データを大規模データベースに蓄積する。
- 2) ステップワイズ法によってLOMの予測に有用な変数を選択する。
- 3) 現在のシステム状態である要求点ベクトルデータを取得し、要求点データと観測データの両者を量子化し、量子化データベースを構成する。
- 4) 量子化データベースから要求点データと類似した過去の近傍データを取得する。
- 5) 近傍データから局所モデルを構成し、モデルに基づく予測や制御を行なう。
- 6) 局所モデルは予測の都度廃棄する。

LOMでは、JITモデリングの概念に、ステップワイズ法による変数選択、観測データと要求点ベクトルデータの量子化、量子単位での近傍データセットの検索が加わっている点が特徴である。

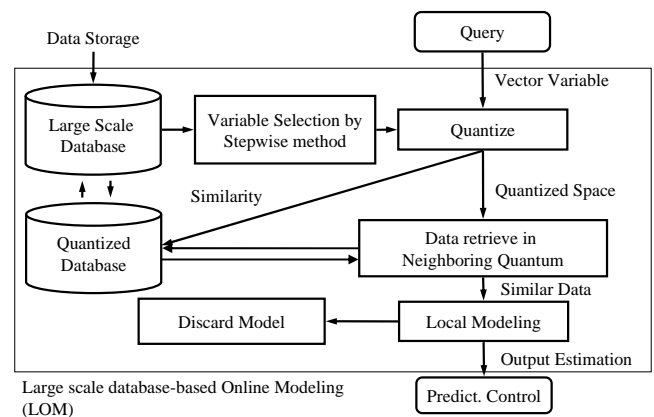


Fig. 1 Schematic diagram of LOM⁴⁾⁻⁶⁾

2.3 ステップワイズ法

ステップワイズ法とは、回帰モデルにおいてできるだけ説明変数の数を少なくし、かつ観測値と出力の予測値の差の平方和（残差平方和）を実用に耐えうるほど小さいものとするために、ある検定基準を設けて説明変数の追加と除去を繰り返しながら、回帰モデルの説明変数を選択する方法である。アルゴリズムの詳細は文献11)を参照されたい。ステップワイズ法では、入力変数のモデルへの採用判定の基準としてF値が用いられる。

ステップワイズ法は、大規模プロセスのデータベースに対して、その予測処理の計算負荷を低減するために、また、予測対象の変数に対して関連性の低い入力変数による予測精度悪化を防ぐために、予測対象の変数に対して関連性の高い入力変数だけに絞り込み、絞り込まれた変数によって \mathbf{x}^k を構成するために用いられる。ステップワイズ法によって予測対象に対しての関連性の高さを示す各入力変数のF値が計算される。

2.4 位相空間の量子化と近傍検索

まず、入力ベクトル \mathbf{x}^k を構成する各入力変数の取りうる入力空間を量子数で量子化し、量子 \mathbf{X}^k を次式のように定義することで \mathbf{x}^k の分類を行なう。

$$\mathbf{X}^k = Z(\mathbf{x}^{k_i}), (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2.4)$$

ここで、 $Z(\cdot)$ は量子化演算子、 n は同一量子 \mathbf{X}^k に属するデータ数とする。このとき、量子化によって \mathbf{X}^k は \mathbf{x}^{k_i} が1次元では区間、2次元では長方形、一般には超直方体となるが、超直方体の中心座標で表わされる。

続いて、量子 \mathbf{X}^{k_i} と \mathbf{X}^{k_j} の相似度 $S(k_i, k_j)$ を

$$S(k_i, k_j) = \|\mathbf{X}^{k_i} - \mathbf{X}^{k_j}\|_{\infty} \quad (2.5)$$

と定義する。ここで、 $\|\cdot\|_{\infty}$ は無限大ノルムである。このとき、要求点ベクトル \mathbf{x}^{k_q} を含む量子を \mathbf{X}^{k_q} とし、 \mathbf{x}^{k_q} の近傍を

$$\Omega_q = \left\{ \mathbf{X}^{k_p} \mid S(k_q, k_p) = \min_{\mathbf{X}^{k_q} \in \mathbf{T}} S(k_q, k_p) \right\} \quad (2.6)$$

と定義する。ここで、 \mathbf{T} は位相空間を表わし、 \mathbf{X}^{k_q} の取りうる状態空間である。

位相空間の量子化幅の決定方法はいくつかの方法が考えられる。量子化を導入することによって相似度 $S(k_i, k_j)$ は離散値となる。説明のために入力変数が2次の場合を考え、その要求点の近傍量子を Fig.2 に示す。このとき、 \mathbf{x}^{k_p} が中央に存在し、その \mathbf{x}^{k_p} を含む量子は \mathbf{X}^{k_p} であり、その周辺の量子が近傍 Ω_q である。近傍を検索するには、まず要求点ベクトルを含む同一量子、隣の量子というように量子化データベース上で単純かつ効率的に検索できる。

位相空間の量子化幅の決定方法はいくつかの方法が考えられる。適用例では、一様均等分割法を用いる。

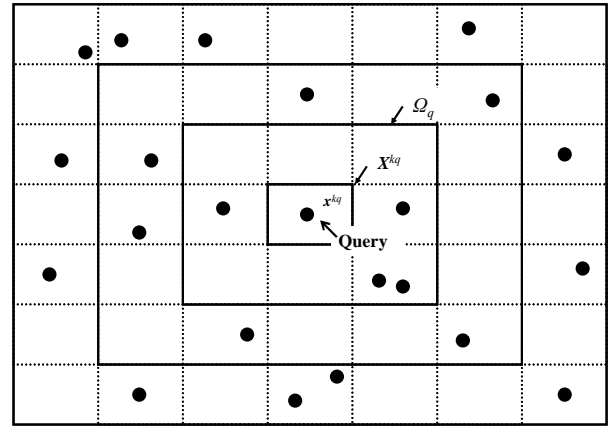


Fig. 2 Neighbor quantum of query in 2-dimensional input variables ⁴⁾⁻⁶⁾

3 制御対象および問題設定

3.1 制御対象

計測自動制御学会制御部門エンジン・パワートレイン研究会では、先進制御理論によるエンジン・パワートレイン制御の高性能化を促進するため、エンジン始動制御をベンチマーク問題として設定し、ガソリンエンジンモデル(SI エンジンモデル)¹²⁾を提供している。本研究では、SI エンジンモデルを制御対象と設定する。SI エンジンモデルは、6気筒を有するV型ガソリンエンジンモデルであり、そのエンジンモデルは、

$$\frac{d}{dt} \xi(t) = g(\xi(t), v(t)), \quad \xi(0) = \xi_0 \quad (3.1)$$

$$\psi(t) = h(\xi(t), v(t)) \quad (3.2)$$

と数式表現される。ここで、 $\xi(t) \in R^n$ はモデルの状態、 $v(t) \in R^{13}$ はモデルの入力、 $\psi(t) \in R^2$ はモデルの出力である。入力はスロットル角、各気筒ポート燃料噴射量、各気筒点火時期の $13(1 + 2 \times 6)$ 入力であり、出力はエンジン回転数とスロットル通過空気流量の2出力である。

対象とするエンジンモデルによる Matlab/Simulink のエンジンシミュレータが Fig.3 に示される。このシミュレータは、エンジンモデル、コントローラ、スタータの3つのサブシステムから構成されている。

ここで、エンジンサブシステムの入力として、sa は各気筒点火時期、fi は各気筒燃料噴射量、および dth はスロットル角度である。その出力として、mt はスロットル通過空気流量、st は各気筒クランク角、rps はエンジン回転数である。制御系設計に利用できる情報は、スロットル通過空気流量 mt、各気筒クランク角 st、およびエンジン回転数 rps の3つである。

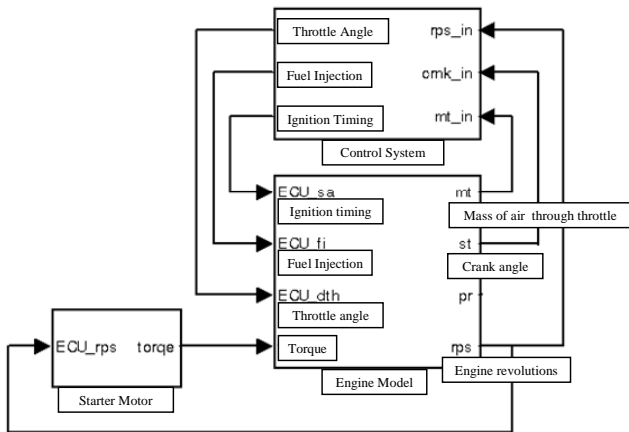


Fig. 3 Configuration of Spark Ignition Engine Simulator

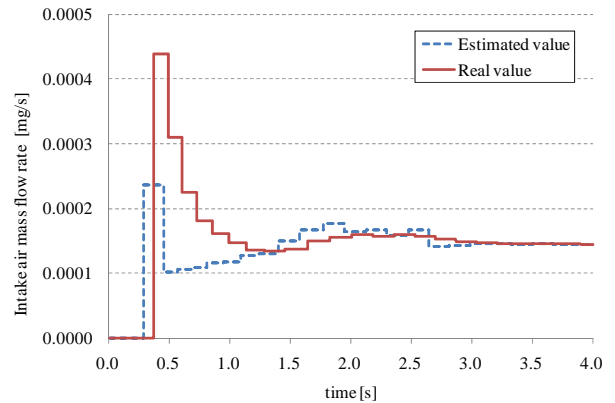


Fig. 4 Measured value and estimated value of the mass of air intake to cylinder by integrating the mass flow rate through throttle

3.2 問題設定

つぎの制御仕様を満たすことが求められる。

- 1) エンジン回転数がエンジン始動後1.5秒以内に 650 ± 50 rpmに到達すること。
- 2) エンジン回転数のオーバーシュートを低減すること。
- 3) エンジン回転数の一時的な上昇や下降に対して、エンジン回転数が速やかに650rpm付近に復帰すること。
- 4) 制御入力にチャタリングを生じさせないこと
- 5) 燃料噴射量の積算値を最小とすること。

4. LOM による筒内吸入空気量の予測

4.1 筒内吸入空気量の予測方法

エンジン始動制御を実現するには、理想的な空燃比を維持し、エンジン筒内へ噴射される燃料噴射量を適切に導出する必要がある。燃料噴射量を決定する際に筒内吸入空気量は重要な要素となるため、将来の筒内吸入空気量を正確に推定することが課題となる。そこで、エンジン回転数制御を円滑に行なうために、筒内吸入空気量の予測に LOM を応用し、LOM を用いた制御系を設計する。

まず、スロットルを通過する空気量を積算して推定するだけでは将来の筒内吸入空気量の推定が不十分であることについて述べる。スロットル通過空気量の積算値から将来の筒内吸入空気量を推定すると、Fig.4 に示すように、実測値と予測値の間で誤差が生じる。特に、エンジン始動時の 0.3 秒から 1.2 秒において、実測値と予測値の値が異なっていることが確認される。

そこで LOM を用いて筒内吸入空気量の予測を行なうことにより正確な筒内吸入空気量を求めることを考える。

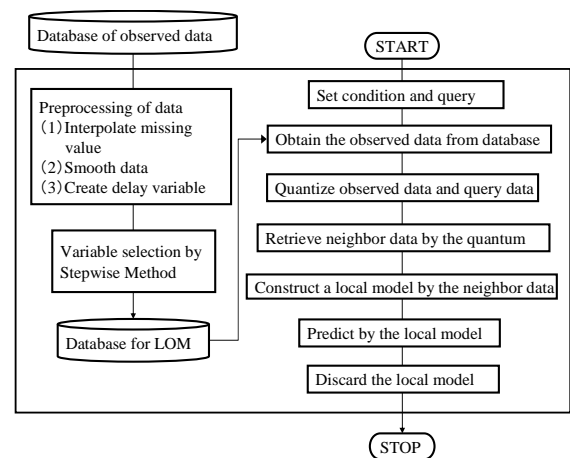


Fig. 5 Processing flow of LOM system in the engine control

エンジン筒内吸入空気量予測のための LOM システムの処理フローを Fig.5 に示す。以下、図中の左側の手順を説明する。

Step.1: 対象システムから得られる入出力データを収集し、観測データのデータベースを構成する。ここでは、エンジンベンチマーク問題の Matlab/Simulink のガソリンエンジンシミュレータを用いて、スロットル角を変化させて複数のケースの始動時のデータを取得した。取得したデータは、筒内吸入空気量、スロットル角、点火時期、スロットル通過空気流量、クランク角、エンジン回転数、および燃料噴射量の 7 変数である。筒内吸入空気量は予測対象 y^k である。

Step.2: データ取得時のサンプリング間隔は 0.5 ミリ秒とし、前処理として、0.01 秒の間隔で移動平均法による平滑化を施し、その後、改めて 0.01 秒間隔でサンプリングを行ない、最終的なデータ点数は 1890 点となった。 y^k を除くすべての観測変数について 0.1 秒まで 0.01 秒刻みで遅れさせた変数をそれぞれ作成する。たとえば、エンジン回転数であれば、現在から 0.01 秒前のエンジン回転数、0.02 秒前のエンジン回転数、0.03 秒前のエンジン回転数、..., 0.1 秒前のエンジン回転数をそれぞれ作

成し、変数の遅れ時間を考慮する。

Step.3: LOM の入力ベクトル \mathbf{x}^k を構成する入力変数は、スロットル角、点火時期、スロットル通過空気流量、クランク角、エンジン回転数、および燃料噴射量の 6 変数から、ステップワイズ法を用いて選択する。予測対象 y^k を 0.2 秒後の第 1 気筒の筒内吸入空気量として、対象データに対してステップワイズ法を施すことにより、予測対象 y^k に対して関連性の高いものから順に 9 項目の入力変数が選択された。このとき選択された入力変数を **Table.1** に示す。F 値（寄与率）は、予測対象 y^k に対する関連性の高さを示す。ここでは、計算負荷を低減するため、できる限り入力変数を削減することを考え、F 値が 30 以上の変数だけを選択するようにステップワイズ法における F 値の基準値を設定した。

たとえば、予測対象である 0.2 秒後の筒内吸入空気量は、F 値の高い 0.1 秒前の燃料噴射量、0.1 秒前のスロットル通過空気流量、0.04 秒前のスロットル通過空気流量などと関連性が高いことが **Table.1** から確認される。これらの選択された変数から LOM 用データベースを構成する。ここでステップワイズ法は予測の都度行なわれる処理ではなく、あらかじめ一度だけ行われる処理である。またステップワイズ法は対象システムに対応して、経年変化や特性変化の影響などを考慮するために定期的に行なう必要がある。

Table 1 Selected variables by Stepwise method

No.	Variable name	F value (Contribution)
1	Fuel injection before 0.1sec.	755
2	Mass flow rate through throttle before 0.1sec. (mt)	687
3	Mass flow rate through throttle before 0.04sec. (mt)	236
4	hennsumei	166
5	Mass flow rate through throttle before 0.07sec. (mt)	157
6	Fuel injection before 0.03sec.	93
7	Engine revolutions before 0.08sec.	92
8	Fuel injection before 0.07sec.	41
9	Present mass flow rate through throttle	33

Fig.5 の右側に位置する開始から終了までの処理は予測の都度行われる処理である。以下、その手順を説明する。

- (1) 予測時間、量子化数、取得する近傍データセット数などの設定情報と現在のシステムの状態である要求点ベクトルデータを取得する。
- (2) つぎに LOM 用データベースからステップワイズ法による低次元化を図った観測データを取得する。
- (3) 観測データと要求点ベクトルデータを(2.4)式に

より量子化し、量子単位での要求点ベクトルとデータセット間の相似度を(2.5)式によって求め、要求点の近傍データセットを検索する。

- (4) 得られたデータより、LOM の推定値を導出する局所モデルを構成する。
- (5) 局所モデルを予測の都度、要求点ベクトルとその近傍データセットから構成するため、一度用いた局所モデルは廃棄される。

本手法では局所モデルとして、重回帰モデルを用いる。すなわち、予測値 $\hat{y}_i^{k_p}$ が要求点ベクトル $\mathbf{x}_i^{k_p}$ から

$$\hat{y}_i^{k_p} = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i x_i^{k_p} \quad (4.1)$$

で算出される。ここで、回帰母数 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ は、最小二乗法により、要求点ベクトルと複数の近傍データセットから推定する。 m は入力変数の数 ($n_u + n_y$) である。

4.2 筒内吸入空気量の予測例

予測例として、ある要求点を選択し、LOM を用いて筒内吸入空気量の 0.5 秒後までを予測する。このとき、ステップワイズ法によって選択された 9 変数を用いて入力ベクトル \mathbf{x}^k を構成する。LOM の予測処理の際の量子化数を 100 とし、近傍データセットを 30 個取得し、局所重回帰モデルによって予測を行なった。

その予測値と実測値を **Fig.6** に示す。横軸は、0 の位置を現在の要求点時刻として、過去の 0.1 秒前から将来の 0.5 秒後までを表示している。横軸のマイナス記号は過去を意味する。現在のシステム状態に類似した近傍データセット（過去類似データ）を 30 箇所取得し、(4.1) 式の局所モデルに基づいて、予測値を生成している。**Fig.6** から予測値が将来の 0.2 秒後まで実測値とよく一致していることが確認される。一方で、0.2 秒後以降の予測では、徐々に予測精度も悪化していくことがわかる。さらに、別の要求点における予測例を **Fig.7** に示す。このときも同様に徐々に下降していく傾向が良好に予測されていることが確認される。

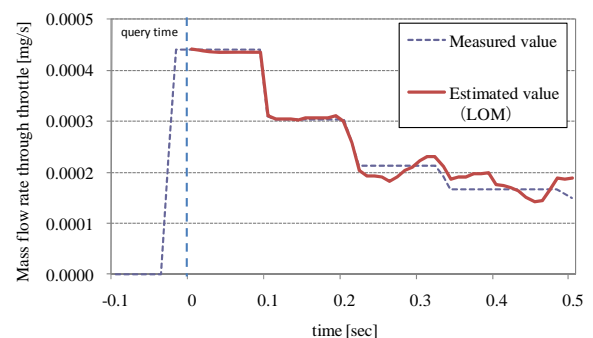


Fig. 6 Example 1 of measured value and estimated value of the mass of air intake to cylinder by LOM

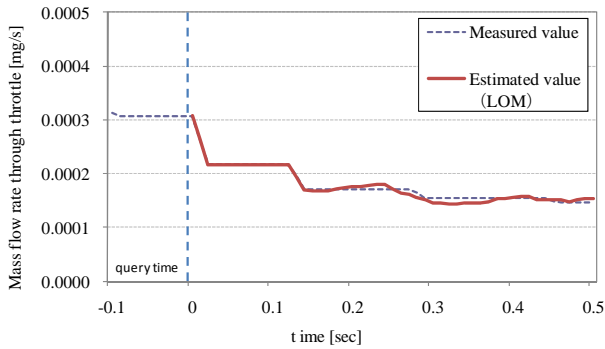


Fig. 7 Example 2 of measured value and estimated value of the mass of air intake to cylinder by LOM

4.3 筒内吸入空気量の予測精度

LOMによる筒内吸入空気量の予測精度を評価するため、要求点を無作為に変更して0.2秒後の筒内吸入空気量の予測を480回行った。このとき、LOMの予測処理における量子化数を100とし、近傍データセットを30個取得し、局所重回帰モデルによって予測を行なった。LOMによる予測値とエンジンモデルの実測値の散布図をFig.8に示す。図から大部分の予測値と実測値の傾向が類似しており、良好な予測を行なえていることが確認される。一部の予測値と実測値の値が異なっている箇所は、類似した近傍データセット（過去類似事例データ）が少ない箇所である。また、予測値と実測値の相関係数は0.986であり、LOMを用いて筒内吸入空気量の予測が十分に可能であることが確認される。

さらに、0.2秒後の筒内吸入空気量の予測を480回行った。その予測値と実測値の散布図をFig.9に示す。このときの予測値と実測値の相関係数は0.979であり、0.2秒後の予測においても十分な予測精度が得られていることが確認される。

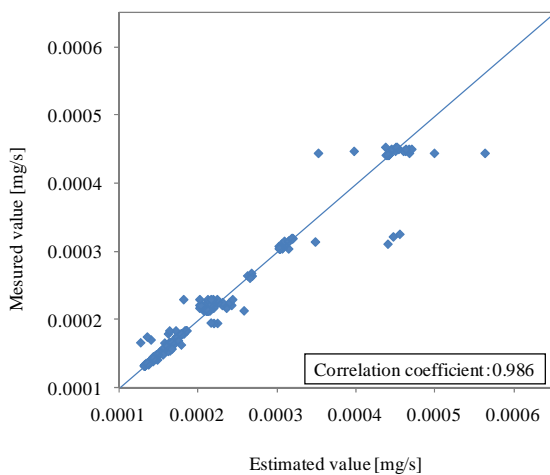


Fig. 8 Scatter diagram of measured value and estimated value of the mass of air intake to cylinder after 0.1 sec. by LOM

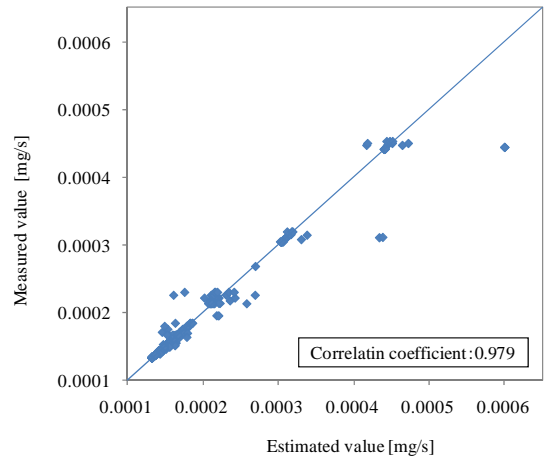


Fig. 9 Scatter diagram of measured value and estimated value of the mass of air intake to cylinder after 0.2 sec. by LOM

5. LOMを用いたエンジン始動制御系設計

5.1 コントローラの設計

エンジンベンチマーク問題のエンジン始動制御を実現するために、エンジンのスロットル角、点火時期、燃料噴射量の3つのコントローラを設計する。

5.1.1 全体のエンジン始動制御系

提案する制御系全体の概念図をFig.10に示す。スロットル角と点火時期はエンジン回転数の現在値と目標値の偏差に基づいてPID制御を行なう。ここで、点火時期については、エンジン回転数の状態に応じてPID制御の積分動作のパラメータを切り替える。燃料噴射量はLOMによって予測した各気筒の筒内吸入空気量と各気筒の燃料挙動逆モデルから求められる。

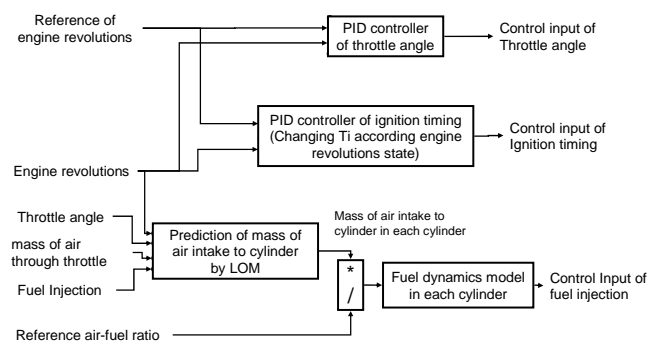


Fig. 10 schematic diagram of the whole control system

5.1.2 燃料噴射量コントローラ

本手法では、文献13)に記述されているSIエンジンの燃料挙動モデルを用い、その逆モデルの計算に必要な筒内吸入空気量の予測にLOMを用いる。筒内に吸入される燃料量は

$$f_{cr}(\kappa) = (1 - R)f_{inj}(\kappa) + (1 - P)f_w(\kappa) \quad (5.1)$$

で表現される。ここで、 f_{cr} は筒内吸入燃料量、 f_{inj} は燃料噴射量、 f_w は吸気管残存燃料量、 P は液膜燃料残留率、 R は噴射燃料付着率、 κ はサイクル数である。(5.1)式を f_i について整理すると

$$f_{inj}(\kappa) = \frac{f_{cr}(\kappa) + (1 - P)f_w(\kappa)}{1 - R} \quad (5.2)$$

の逆モデルが求まる。このとき、吸気管残存燃料量の推定値 f_w は

$$\hat{f}_w(\kappa) = Pf_w(\kappa - 1) + Rf_{inj}(\kappa - 1) \quad (5.3)$$

から導かれる。筒内吸入燃料量の推定値 \hat{f}_{cr} は

$$\hat{f}_{cr}(\kappa) = \frac{\hat{M}_{cf}}{\alpha_r} \quad (5.4)$$

より求める。ここで、 α_r は目標筒内吸入燃料量、 \hat{M}_{cf} は筒内吸入空気量の推定値である。目標筒内吸入燃料量は理論空燃比 14.7 に設定している。

本手法では、 \hat{M}_{cf} の予測に LOM を用いる。LOM を用いることによって以前のスロットル通過空気量の積算値による方法と比較して、より精度の高い予測を行なえると考えられる。また、本手法では、各気筒についてそれぞれ LOM による筒内吸入空気量の予測モデルと燃料挙動逆モデルの(5.3)式を準備し、各気筒の燃料噴射量の制御入力値を求める。

5.1.3 点火時期コントローラ

まず対象エンジンにおける点火時期と平均トルクの特徴について述べる。シミュレータから得られた点火時期と平均トルクの関係を図 11 に示す。このとき定常状態 2000rpm 付近に制御し、スロットル角は 90deg. に固定している。最大トルクを得られる点火時期は 20deg. BTDC 付近である。また、20deg. から 60deg. BTDC にかけて、エンジンから得られる正味トルクが徐々に減少することが確認される。したがって、点火時期はその特性から 20 から 50deg. BTDC の範囲を利用する。

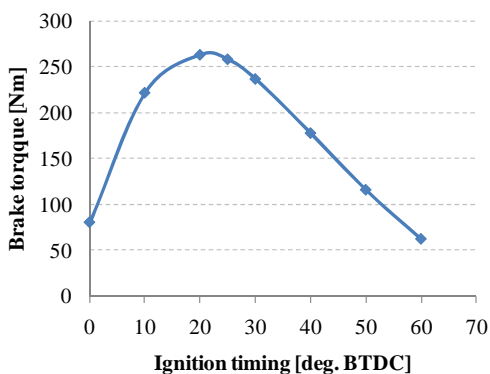


Fig. 11 Ignition timing characteristic

点火時期はエンジン回転数の現在値と目標値の偏差に応じて PID 制御で制御する。PID 制御のパラメータ調整は CHR 法に基づいて行なった。ここでは、エンジン回転数が目標値付近に「上昇前の状態」と「上昇後の

状態」の 2 つの状態に応じて、PID 制御の積分動作のパラメータ Ti についてだけ切り替えて使い分ける。「上昇前」と「上昇後」の 2 つの状態では、エンジン回転数の変動幅に大きな違いがあるため、Ti を切り替えて利用する。

5.1.4 スロットル開度コントローラ

スロットル開度もエンジン回転数の現在値と目標値との偏差を利用して PID 制御を用いる。ここでも PID パラメータは CHR 法に基づいて調整を行なった。

5.2 制御シミュレーション

前述の制御系によるガソリンエンジンモデル上での制御シミュレーションを実行したときの筒内吸入空気量のモデルの計測値と LOM による予測値を図 12 に示す。予測値は 0.01 秒ごとに将来の 0.1 秒後を予測している。以前のスロットル通過空気流量の積算による推定値 (Fig.4 参照) と比較して、予測精度が大幅に改善していることが確認される。局所的に激しい変動が一部で生じている現象は、0.01 秒ごとに逐次的に予測を行なうため、要求点と類似した過去の近傍データセットが十分に得られない箇所で良好な局所モデルを構成できないために生じている誤差と考えられる。しかしながら、筒内吸入空気量の傾向は類似しており良好な予測が行なえている。

さらに、上記の予測値を用いた制御系のシミュレーション結果として、エンジン回転数、スロットル通過空気量、スロットル角、燃料噴射量、空燃比、および点火時期をそれぞれ Fig.13 に示す。エンジン始動後にエンジン回転数が 650±50rpm 付近に到達していることが確認される。また、3 秒後には、微小な周期変動をほとんど生じさせずに約 650rpm に到達していることがわかる。エンジン始動直後は空燃比が理論空燃比 14.7 から離れているが、4 秒後以降では理論空燃比に近い値を維持していた。エンジン回転数が 1200rpm 付近までオーバーシュートとしている点は今後改善の余地があるが、LOM を用いた制御系によってエンジン始動制御が行えることが確認された。

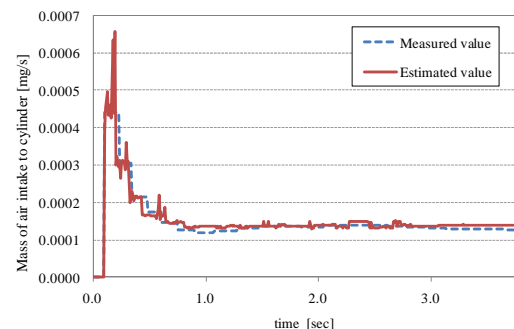


Fig. 12 Measured value and estimated value of the mass of air intake to cylinder by LOM

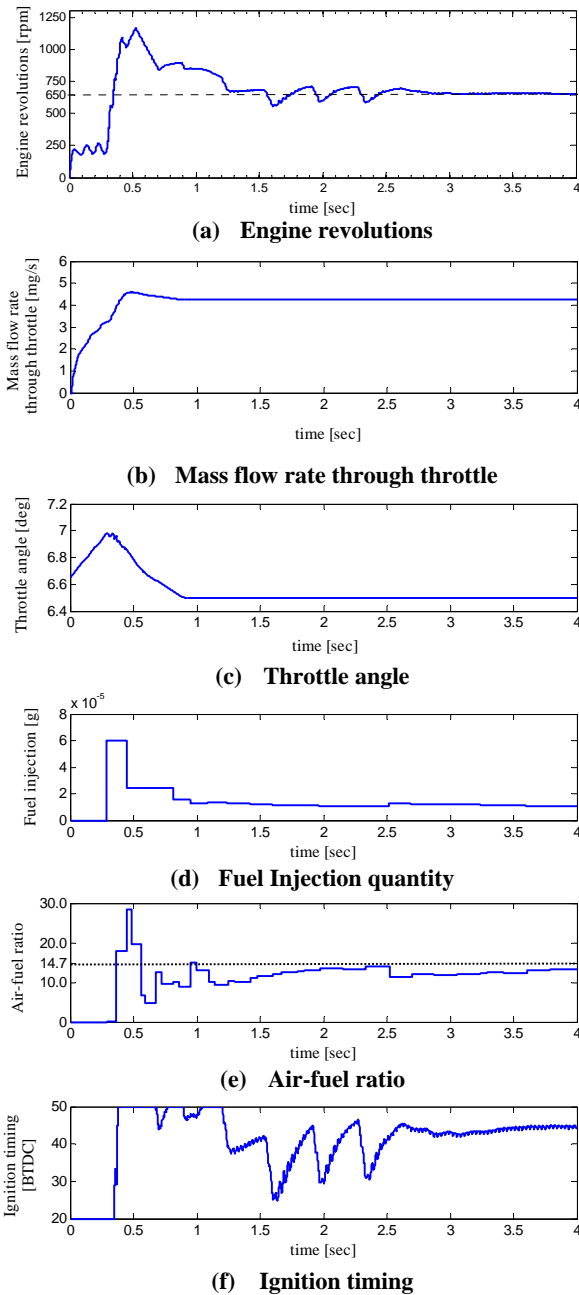


Fig. 13 Results of engine control simulation

6. 結言

本論文では、JITモデリングを実プロセスの大規模データに適用するにあたり拡張を図ったLOMを応用したエンジン始動制御系の設計について述べた。LOMはJITモデリングを実プロセスの大規模なデータに適用するにあたり、入力データの位相空間の低次元化と位相空間の量子化を図った手法である。ここでは、LOMのエンジン始動制御への応用例の一例として、エンジンベンチマーク問題のガソリンエンジン始動制御へLOMを適用する方法について述べた。

理想的な空燃比を実現するためには、筒内に吸入される空気量の推定も重要であり、スロットル通過空気流量を積算するだけでは良好な予測精度が得られないため、より適切な筒内吸入空気量の将来予測を行なう方法としてLOMを検討した。LOMにより将来の筒内吸入空気量の予測精度を評価した結果、予測が良好に行えることを確認した。

さらにLOMを用いたエンジン始動制御系を設計し、LOMを用いることにより、動的な筒内吸入空気量の予測精度も改善し、望ましいエンジン回転数の始動制御が実現できることを確認した。

今後の課題は、LOMの推定値に局所的に出現する変動を抑制する方法を検討し、さらに燃料挙動モデルにおけるパラメータを動的に同定することにより制御性能のさらなる改善を図ることである。

【参考文献】

- 1) A. Stenman, F. Gustafsson and L. Ljung: Just In Time Models For Dynamical Systems, Proc. of IEEE Int. Conf. on Decision and Control, 1115/1120 (1996)
- 2) 鄭, 木村: Just-In-Time モデリングによる圧延セットアップモデルの学習, 計測自動制御学会論文集, **37-7**, 640/646 (2001)
- 3) 牛田, 木村: Just-In-Time モデリング技術を用いた非線形システムの同定と制御, 計測と制御, **44-2**, 102/106 (2005)
- 4) 伊藤, 松崎, 大貝, 大館, 内田, 斉藤, 佐々木: 高炉操業における大規模データベースオンラインモデリング, 鉄と鋼, **90-11**, 59/66 (2004)
- 5) M. Ito, S. Matsuzaki, N. Odate, K. Uchida, H. Ogai and K. Akizuki: Large scale database Online Modeling for Blast Furnace, Proc. of IEEE Int. Conf. on Control Applications, 906/911 (2004)
- 6) M. Ito, S. Matsuzaki, H. Ogai, K. Mori, K. Uchida, S. Saito and N. Sasaki: Application of Large scale database-based Online Modeling of Blast Furnace operation, Proc. of 16th IFAC World Congress (2005)
- 7) 内田, 大貝, 伊藤: 大規模データベースオンラインモデリング-高炉への適用-, 計測と制御, **44-2**, 107/111 (2005)
- 8) 小川, 田島, 大貝, 立野, 伊藤, 松崎, 内田: 大規模データベースオンラインモデリングのクロスプラットフォームシステムの開発と高速化, 日本設備管理学会誌, **19-1**, 1/8 (2007)
- 9) 小川, 葉, 大貝, 立野, 内田: 大規模データベースオンラインモデリングの逐次予測システムの構築と工業炉プロセスへの応用, 計測自動制御学会産業論文集, **7-4**, 26/32 (2008)
- 10) 葉, 小川, 吉永, 大貝, 内田: 大規模データベースオンラインモデリングの廃棄物処理プロセスへの応用とガイダンス手法の提案, 計測自動制御学会産業論文集, **7-6**, 40/47 (2008)
- 11) 永田, 棟近: 多変量解析法入門, サイエンス社, 71/73 (2001)
- 12) 大島明: 自動車エンジン制御 SICE ベンチマーク問題, 計測と制御, **47-3**, 208/209 (2008)
- 13) 原田宏: 自動車技術シリーズ (2) 自動車の制御技術, 自動車技術会(編), 朝倉書店, 11/45 (1997)

[著者紹介]

小川 雅俊 (正会員)



2005年早稲田大学大学院情報生産システム研究科 情報生産システム工学専攻修士課程修了。2008年、同博士後期課程修了。博士(工学)。2007年より早稲田大学情報生産システム研究センター助手、研究助手として現在に至る。工業炉や自動車エンジンなどのモデリング、シミュレーション・制御技術の研究に従事。電気学会、システム制御情報学会などの会員。

葉 怡 君 (正会員)



2005年早稲田大学大学院情報生産システム研究科 情報生産システム工学専攻修士課程修了。2008年、同博士後期課程修了。博士(工学)。2008年より早稲田大学情報生産システム研究センター助手、現在に至る。廃棄物処理プロセスや交通流のモデリングとシミュレーション・制御技術の研究に従事。

大 貝 晴 俊 (正会員)



1974年早稲田大学工学部電気工学科卒業。76年東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年、新日本製鐵(株)入社。鉄鋼プロセス制御の開発に従事。2003年より早稲田大学大学院情報生産システム研究科教授。博士(工学)、プロセス制御、プロセスモデリング、シミュレーション技術などの研究に従事。電気学会、システム制御情報学会、人工知能学会、日本鉄鋼協会などの会員。