

エッジコントローラで動作するモデル予測制御

Model Predictive Control Implemented in an Edge Controller

丹下 吉雄 TANGE, Yoshio

桐生 智志 KIRYU, Satoshi

松井 哲郎 MATSUI, Tetsuro

省エネルギー化や多品種少量生産などの要求に応えるため、プラントのオートメーションにおいて、よりきめ細やかな運用を低コストで実現することが求められている。従来は、高性能な計算機を用いて運用されてきたモデル予測制御(MPC)を、富士電機のPLC「MICREX-SX」で実行できるようにしたエッジ型MPCを開発した。運転データからのMPC用のモデル同定と最適ゲインの可視化をオフラインで行うことにより、オンライン制御では、安定した高度制御を実現できる。さらに、PLCの柔軟性と信頼性を生かし、現場に容易に導入できる。

In order to meet the demands of energy savings and high-mix, low-volume production, plant automation is required to achieve much thorough operation at lower costs. Fuji Electric has developed edge-controller-based model predictive control (MPC) that can be implemented in our “MICREX-SX” PLC although MPC had conventionally been performed on a high-performance computer. By performing offline MPC model identification and optimum gain visualization using operating data, it can perform stable online control. Furthermore, the flexibility and reliability of the PLC makes it easy to use MPC on the shop floor.

① まえがき

省エネルギー化および温室効果ガス削減に関する社会的要求の高まりや、さまざまなニーズに応じた多品種少量生産に対応するため、プラントのオートメーションにおいても、よりきめ細やかな運用が必要となってきている。本稿では、きめ細やかな運用の実現に貢献する、エッジコントローラで動作するモデル予測制御(MPC: Model Predictive Control)について述べる。

② バッチ式プロセスにおける課題と富士電機の取り組み

プロセス系のプラント運転には、主にバッチ式と連続式があり、多品種少量生産に対する融通の良さから、現状の多くがバッチ式を採用しているといわれている。バッチ式制御では、ある目標値のプロファイルに沿った運転や、外乱に対する一定値の運転が行われている。

特に、望ましい品質を達成する過去の代表的なバッチデータをゴールデンバッチと呼び、そのプロファイルが目標値に用いられている。一方で、バッチごとの運転状態にばらつきがあると、ロット品質が安定しないため、バッチ間の品質の違いを検出したり、ばらつきを抑制したりすることが課題である。

富士電機は、これまで、バッチ多変量統計的プロセス管理(MSPC: Multivariate Statistical Process Control)と呼ぶバッチ間のプロファイル差に基づく異常検知技術を開発してきた。

制御に関しては、従来、バッチ式プラントを運転する際は、古典的なPID(Proportional-Integral-Differential)制御や、モデルを使って予測を行うMPCが用いられてき

た。しかし、これらには次に示すような課題があった。

(a) PID制御のパラメータ調整が難しく、プロファイルの初期と後期でゲインを変える(ゲインスケジューリング)などの工夫が必要である。

(b) MPCは、最適化に伴う計算が複雑であるため、高性能な計算機が必要である。

バッチ式のプロセス制御向けに、現場でも容易に設置できるエッジ型コントローラ上で高性能な制御が可能なMPCが実装できれば、顧客課題の解決につながると考えられる。そこで、富士電機のプログラマブルコントローラ(PLC: Programmable Logic Controller)である「MICREX-SX」⁽²⁾や、分散型制御システム(DCS: Distributed Control System)である「MICREX-View XX(ダブルエックス)」⁽³⁾に搭載可能な、新しいエッジ型MPCを開発し、高性能な専用計算機や複雑なネットワークの取り回しを必要とせず、低コストで現場に導入できる制御機能を実現した。

③ エッジ型MPCの構成技術

開発したエッジ型MPCは、オフライン支援系とオンライン制御系で構成される(図1)。オフライン支援系で事前のモデル同定(予測のためのプロセスモデルを作成すること)と最適ゲイン設計を行うことにより、オンライン制御系の計算量を大幅に削減し、PLCなどのエッジコントローラでは、オフライン支援系で同定したモデルと最適ゲインを用いた高速な制御アルゴリズムを動作させる。

3.1 オフライン支援技術

MPCの実行に当たっては、予測のためのプロセスモデルが必要である。従来はプロセスモデルを作成するために

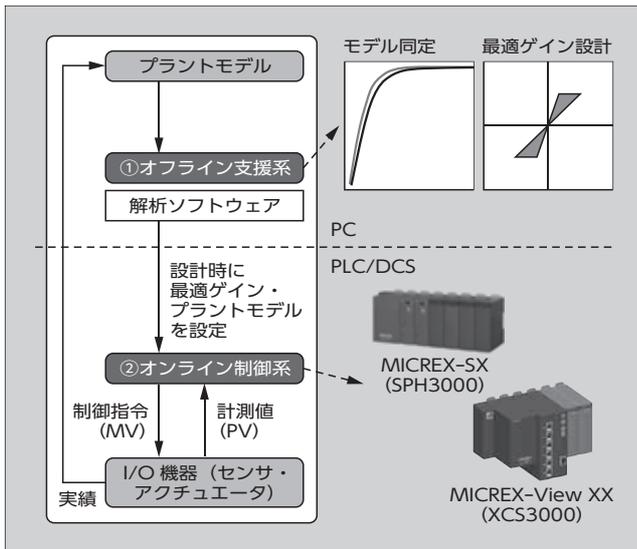


図1 エッジ型 MPC の構成技術

ステップ応答試験など運用に影響する試験が必要であった。今回、ステップ応答試験などを実施することなく、現状の運転データからモデル同定が可能な技術を開発した(図2)。過去のバッチデータから、制御量、操作量、計測可能な外乱などを用いてモデルを同定することができる。

一例として、温度制御の場合、制御量(PV: Process Variable)は温度、操作量(MV: Manipulative Variable)は熱媒体の流量調節弁開度、計測可能な外乱(DV: Disturbance Variable)は外部温度などが考えられる。

従来の MPC では、現在から所定の期間の未来を制御周期ごとに予測し、制御量(PV)が適切な軌道になるような操作量(MV)を最適化演算によって求める。未来の期間が毎回移動していくさまが地平線に似ていることから、

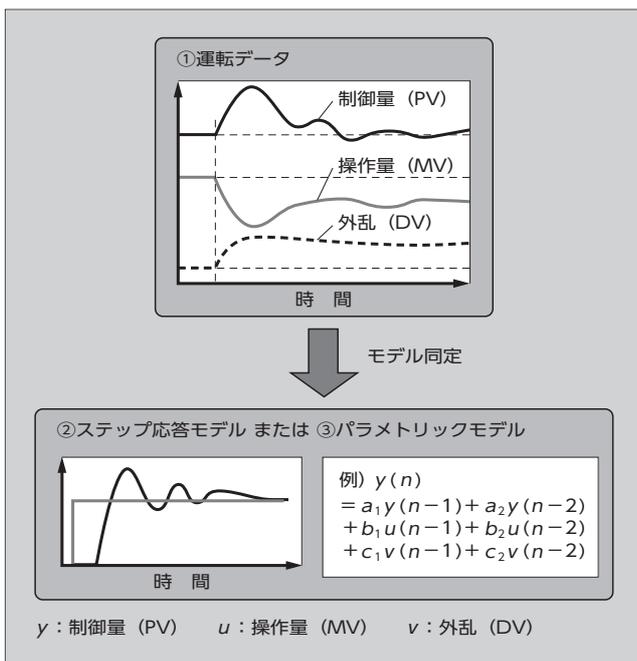


図2 モデル同定技術

予測ホライズン(未来を計算する長さに相当)あるいは後退ホライズンと呼ばれる。最適化演算は、代表的な数値計画法の一つである2次計画法などの行列演算が用いられてきた。このように、複雑な計算を行う MPC を、エッジコントローラ上で実現するには、次に示すような課題があった。

- (a) CPU 性能とメモリ容量に制約があり、複雑な計算ができない。
 - (b) 安定した演算時間で毎回計算を終える必要がある。
- このような課題を克服する手法として、エッジ型 MPC では、オフラインで事前に最適ゲインを計算する方式を採用した。

最適ゲインの計算の際は、プロセスモデルと制御仕様を指定し、数式処理技術によって、最適なゲイン、すなわち制御仕様を満たす操作変化量の領域を可視化する(図3)。制御仕様は、目標値からの偏差が予測ホライズン中にどのように収束するかとの条件と、操作変化量の上下制限を与える。さらに、プロセスモデルの候補を複数用意し、それらのモデルに対する最適ゲインを可視化して重ね合わせることで、モデル変化に柔軟に対応できるゲインを設計することもできる⁽⁴⁾。

3.2 オンライン制御技術

オンライン制御系では、オフライン支援系で事前に設計した最適ゲインと、プロセスモデルとを使ってフィードバック制御を行う。図4に示すように、現在から所定の未来までの制御量の変化を予測し、現在の目標値からの偏差を未来の目標値からの偏差へと補正した補正偏差を計算

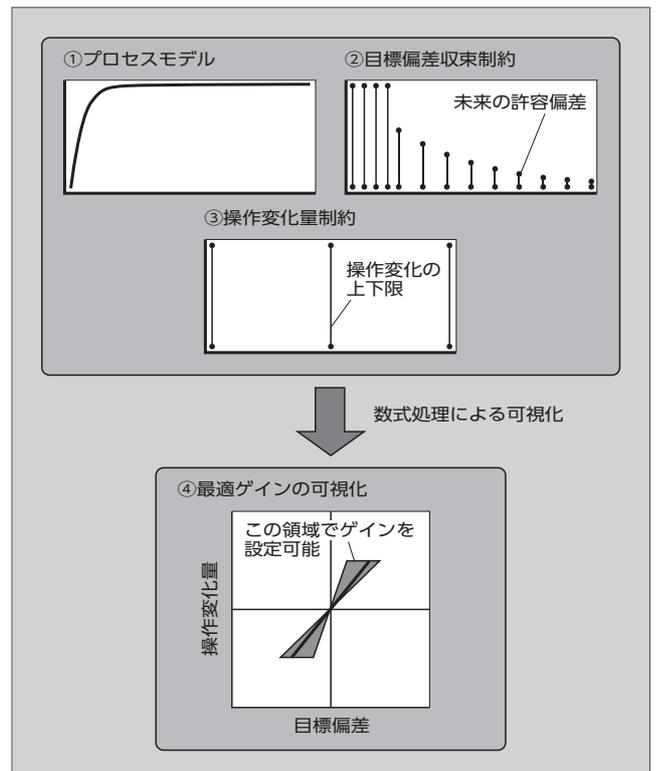


図3 最適ゲイン可視化技術

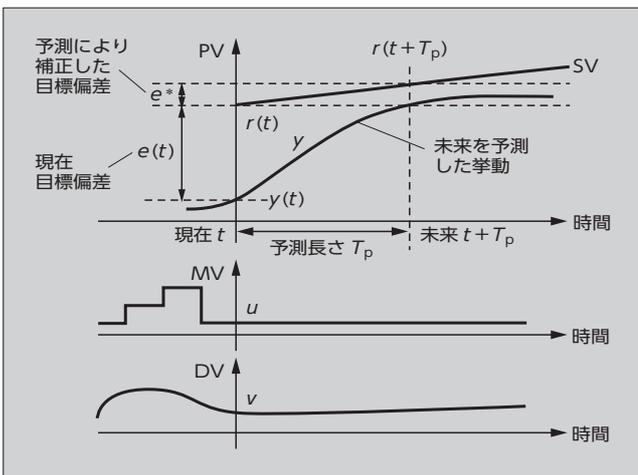


図4 予測による補正

する。補正偏差の計算の際は、現在時刻 t までに観測した操作量 (MV) と計測可能な外乱 (DV) の情報を用いる。また、操作量 (MV) には、1 制御周期における変化量の上限と下限、また、操作量自体の上限と下限をそれぞれ独立に設定でき、操作量 (MV) の急激な変化を抑制したり、動作範囲を制限したりできる。

オンライン制御系の機能を、IEC 61131-3 規格に対応した FB (ファンクションブロック) として実装した。IEC 61131-3 は、1993 年に IEC SC65B/WG7/TF3 により制定され、日本では、1997 年に JIS B 3503 として規格化されている。本規格に対応することのメリットを次に示す。

- (a) 既存の制御プログラム資産との結合が簡単にできるので、開発を効率的に行うことができる。
- (b) すでに普及している PLC や I/O モジュールなどのハードウェアや PLC 開発ソフトウェアで開発が可能である。
- (c) 標準規格として継続的な互換性が期待できる。

実装した FB は、各種の通信プログラムや制御ロジックなど、既存の IEC 61131-3 規格に準拠した制御プログラムの資産と容易に連携することができる。図 5 に示すように、IO 通信を行う処理を従来資産のまま、演算処理部を PID-FB から MPC-FB へと入れ替えるプログラム構成も可能である。

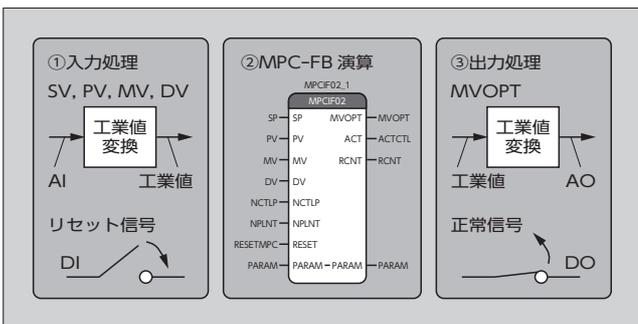


図5 プログラムの構成例

4 制御上の特徴

4.1 システム構成の柔軟性

エッジ型 MPC は、「MICREX-SX SPH3000」および「MICREX-VieW XX XCS-3000」上に搭載できる。新設のシステムにおいて、これらの PLC や DCS に搭載できるのはもちろんのこと、図 6 に示すように、既設の制御システムの近くにある増設盤に設置した、これらの PLC や DCS に搭載して連携を図ることもできる。

また、他社製のシステムなど、プログラムの改造が困難な既設システムとの連携をするデータの受渡し (通信) を行う。

4.2 制御性能の向上

エッジ型 MPC では、図 4 に示したように、未来の応答をモデルに基づいて予測し、目標値からの偏差を収束させる操作量を計算する。未来の応答に基づく制御では、次に示す利点がある。

- (a) 時定数が長いプロセスなどにおいてすぐに現れない影響を考慮できる。
- (b) PID 制御が苦手とするムダ時間 (操作量を変化させてから制御量に変化し始めるまでにかかる時間) のあるプロセスに対応できる。
- (c) 直近の変動に過度に左右されず、操作量の急激な変化が低減できる。

また、エッジ型 MPC では、従来の最適化演算に基づく MPC と比べ、次に示す利点がある。

- (a) タイムラグのない応答ができる。
- (b) 最適化に伴う繰返し演算がないため、計算時間が安定しており、一定の演算時間で実行できる。
- (c) 離散操作量も含めた予測ができるので、弁の全閉・全開といったオンオフ操作しかできない場合にも対応が可能である⁽⁵⁾。

図 7 にエッジ型 MPC の演算時間を示す。例えば、100 ms 以内に計算を完了させたい場合は、予測ホライズンは 100 ステップ (1 ステップは制御周期の長さに相当) まで、700 ms 以内に計算を完了させたい場合は、予測ホライズンは 300 ステップまで対応可能である。

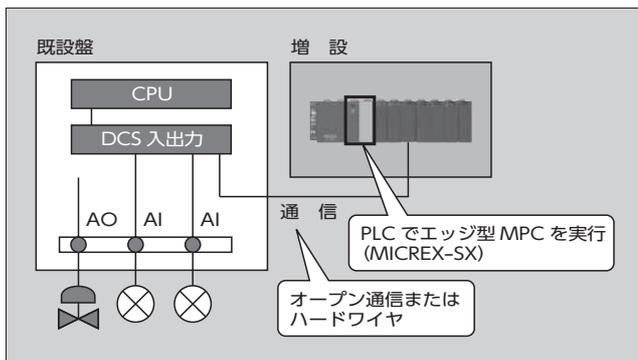


図6 他社の制御システムとの連携例

したがって、実用の場面では、図7から予測ホライズンのステップに関するエッジ型 MPC の演算時間を参考に、その時間を上回る制御周期が数百 ms から数 min 程度のプロセスにおいて適用できる (図8)。

図9に化学反応炉の構成例を示す。化学反応炉の反応温度は精密に制御する必要がある。このため、バッチ式プロセスの場合には、反応熱に起因する外乱の影響を抑え込む必要がある。時定数は、数分から数時間にわたる場合があり、MPCによる予測が有効である。エッジ型 MPC では、300 min 先までの未来を予測し、制御周期を 1 min とする制御を、予測ホライズンを 300 ステップとした場合、300 min 先までの未来を予測しつつ、演算時間 700 ms で実行できる。

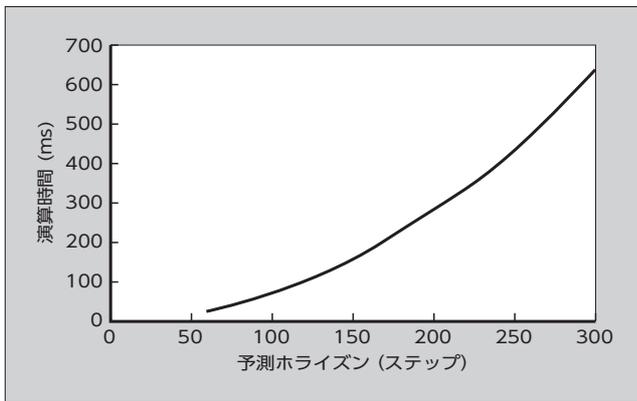


図7 エッジ型 MPC の計算所要時間例

4.3 安定性・保守性

エッジ型 MPC では、コントローラ上で最適化問題を解く必要がなく計算時間が毎回安定しているため、制御周期を一定に保つことができる。このことは、図5に示したように IO 処理やロジック処理、オペレータ操作に応じた処理などの即応性が必要な処理と連動する際に重要である。

プラント設備を 10 年、20 年と継続して安定運用するために、富士電機は、PLC や DCS に 24 時間操業を前提とした高耐久性のモジュールを用意している。加えて、二重化機能などを用いることで、より信頼性の高いシステムが構築できる。その上で、コントローラを適宜保守していくことが重要である。

また、MPC-FB は、国際規格として長い実績がある IEC 61131-3 規格に対応した FB であることから、既設 PLC 更新において、ソフトウェア資産のマイグレーションにも対応できる。

5 想定ケースでの性能検討

プロセスモデルをデータから同定して、エッジ型 MPC を一定目標値に追従させる制御に適用するケースを示す。図10に示すようなフィードバックループにより、外乱 (DV) に対し、制御量 (PV) を一定の目標値 (SV: Setting Value) に保つことが目的である。

MPC では、事前に同定したプロセスモデルが必ずしも

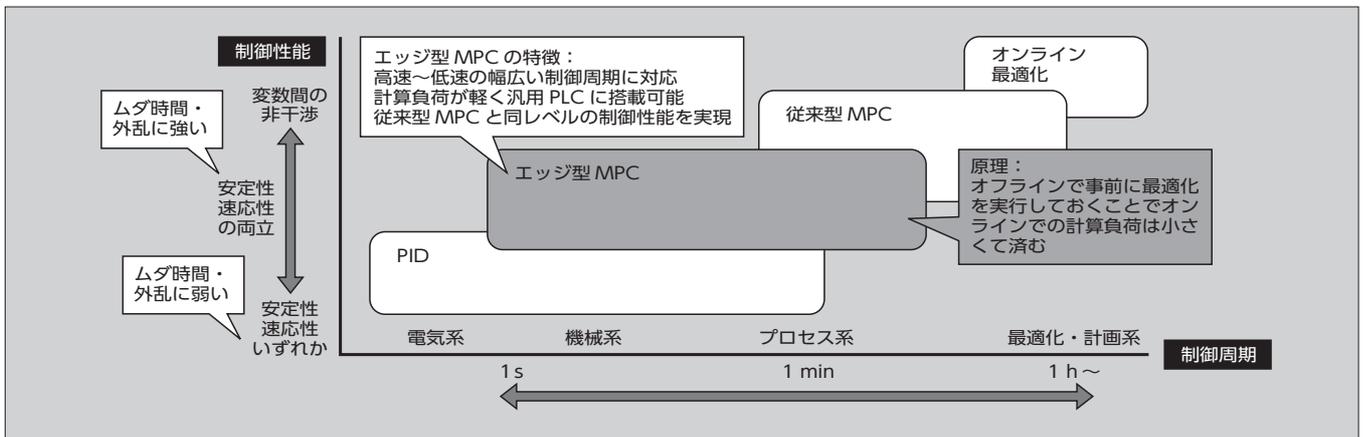


図8 エッジ型 MPC の適用範囲

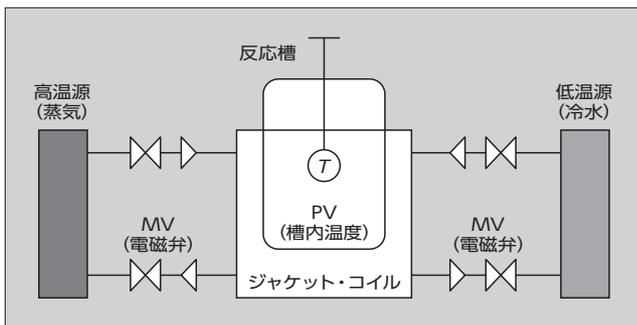


図9 化学反応炉の構成

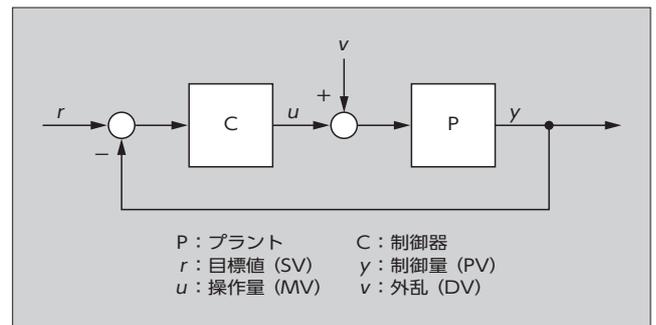


図10 フィードバックループの例

特集 自動化と省エネルギーに貢献する計測・制御ソリューション

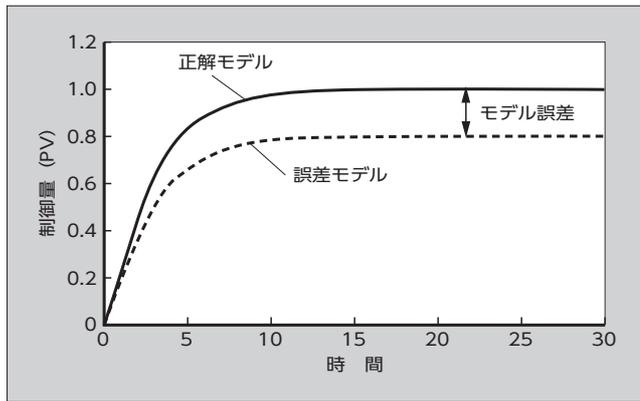


図 11 正解モデルと誤差モデルのステップ応答

正しいとは限らない。そこで、次に示す二つのケースを想定して目標値への追従性を検討した。

- (a) 正解のモデルに基づいて設計したケース
- (b) 正解モデルとは誤差のあるモデル（誤差モデル）に基づいて設計したケース。

図 11 に、正解モデルと誤差モデルのステップ応答の差異を示す。

また、ベトラーク法に基づくパラメータ調整（一巡伝達関数のモデルマッチングに基づく調整）を行った PID 制御を、エッジ型 MPC の比較対象として設計した。

図 12 に、各ケースで設計した制御器を適用した場合の外乱応答を比較した結果を示す。図 12 (a)の正解モデルに基づいた設計の場合においても、図 12 (b)の誤差モデルに基づいた設計の場合においても、MPC が PID を上回る外

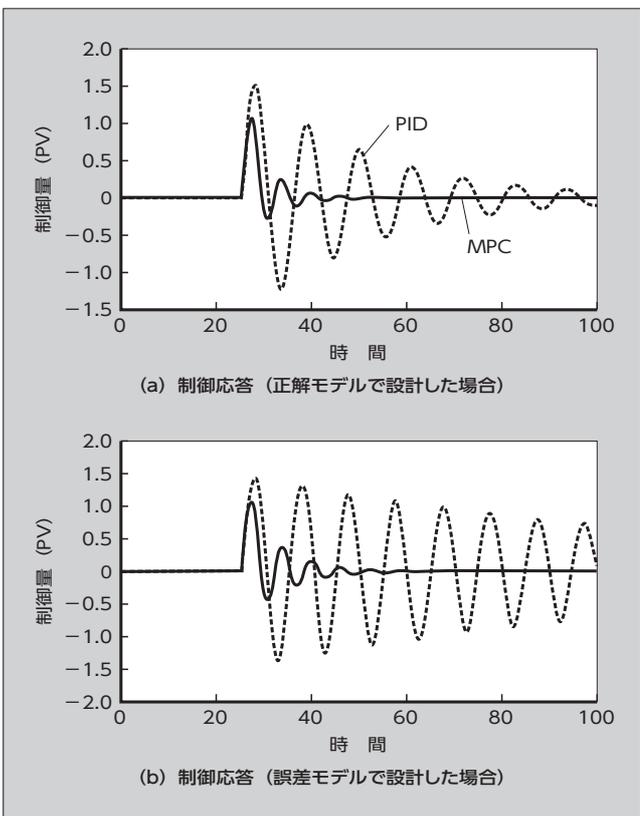


図 12 想定ケースでの外乱応答比較

乱抑制性能を達成している。すなわち、ある程度のモデル誤差があっても、エッジ型 MPC が十分な外乱抑制性能を発揮できているといえる。

6 あとがき

エッジコントローラで動作するモデル予測制御について述べた。富士電機で標準的なベトラーク法による PID 制御に対して、予測に基づく制御により大幅な性能改善が期待できる。事前に、運転データからの MPC 用のモデル同定と最適ゲインの可視化をオフラインで行うことにより、オンライン制御では、安定した高度制御を実現できる。

PLC や DCS を現場の制御盤に設置する形態で利用することができ、少ない設備改造で導入が可能である。

IoT 技術によるプラント操業の安定化・高度化を実現するニーズは今後ますます増加していくと考えられる。富士電機のコントローラ製品上で高度制御を実現するアイテムとして、化学プロセス、医薬品製造をはじめとする高精度制御が求められる分野への適用を推進していく所存である。

参考文献

- (1) 松井哲郎ほか. IoTソリューションを支える数理応用技術. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.3, p.198-203.
- (2) 石井靖. 機械制御から高度なモーション制御まで実現する統合コントローラ「MICREX-SXシリーズ」. 富士電機技報. 2014, vol.87, no.1, p.54-58.
- (3) 永塚一人ほか. 進化する監視制御システム「MICREX-VieW XX (ダブルエックス)」. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.3, p.186-192.
- (4) 丹下吉雄ほか. 数式処理と時間応答に基づくロバスト制御ゲイン設計に関する考察. 平成30年電気学会全国大会. 2018, p.372-373.
- (5) 丹下吉雄ほか. 離散操作量に対応したエッジ型モデル予測制御. 平成31年電気学会全国大会. 2019, p.71-72.



丹下 吉雄

プラント制御技術・EMS 技術・数理アルゴリズムの産業応用に関する研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベーション研究所 AI ソリューションセンター AI 研究部主任。計測自動制御学会会員、電気学会会員。



桐生 智志

数値アルゴリズムの産業応用に関する研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベーション研究所 AI ソリューションセンター AI 研究部。電気学会会員。



松井 哲郎

各種産業システムへの最適化・予測・診断技術の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部デジタルイノベーション研究所 AI ソリューションセンター AI 研究部長。電気学会会員、計測自動制御学会会員。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。