

プラントの操業最適化に貢献するソフトセンサ

Soft Sensor-Systems for Optimizing Plant Operation

田中 雅紀 TANAKA, Masaki

加藤 泰輔 KATO, Taisuke

村上 賢哉 MURAKAMI, Kenya

近年、生産性向上を目的にプロセス産業のDX推進に向けた取組みを進める企業が増えている。富士電機は、温度・圧力などのデータを用いてリアルタイムに品質を推定できるソフトセンサの技術開発を進めている。このたび開発したソフトセンサ構築ツールにより、従来は難しかった高精度な数式モデルを効率よく作成し、実装することができる。プロセスシミュレータを用いて、本ツールで構築したソフトセンサによるリアルタイム計測が難しい品質値の推算と、当該推算値に基づく制御のシミュレーションにより、原単位低減などによりコスト削減が期待できることを確認した。

In recent years, an increasing number of companies have been promoting DX initiatives in industrial processes in order to improve productivity. Fuji Electric has been developing technology for soft sensors that can estimate quality in real time using temperature, pressure, and other process data. Our newly implemented soft sensor development tool enables efficient building and deployment of highly accurate numerical models that have been difficult in the past. The performance of the soft sensors was verified with a process simulator. The new soft sensor built with our tool is able to estimate quality values that have been difficult to measure in real-time and improve plant control, resulting in reduced specific consumption and lower costs.

1 まえがき

近年、産業界においては、製造工程の自動化や効率向上のため、DX（デジタルトランスフォーメーション：Digital Transformation）を推進する流れが強まってきている。⁽¹⁾化学や鉄鋼などのプロセス産業でも、社会や市場の変化とともに安全性の向上、環境負荷の低減、品質の安定化、コストダウン、作業負荷の低減といった課題解決のためデジタル化に向けた取組みを進める企業が増えている。⁽²⁾

プロセス産業においては現場のプラントオペレーションが重要であり、プラントの的確な状態把握によるオペレーターの適切な介入・制御が求められる。ソフトセンサは、このプラントの状態把握を支援することでプロセス産業におけるプラントオペレーションを革新しDXを促進する手段となる。

2 ソフトセンサ

2.1 ソフトセンサとは

ソフトセンサとは、製造プラントの安全・安定な操業と品質の維持管理を目的としたものであり、高い関心が寄せられている。

プロセス産業においては、製品の成分濃度などの重要な品質値の計測は、現在でもサンプリングによるラボ分析などにより行われることが多く、結果を得るまでに時間がかかり、高コストであることが問題となっている。一方で、プロセス中の温度や圧力データはリアルタイムかつ安価に計測できるため、この温度や圧力などのデータと品質値との間に相関があれば、リアルタイムに品質を推定できる。ソフトセンサとは、このような容易に測定できる温度や圧力などの説明変数から目的変数である品質値を推定する数

式モデルのことである。⁽³⁾⁽⁴⁾ソフトウェアとして実現されるためソフトセンサと呼ばれている。

2.2 ソフトセンサの役割と効果

ソフトセンサの適用により次のような効果が見込まれる。

- 図1に示すように、従来、オペレーターは現在の品質が不明な状態でプラント運転を行っており、確信を持ったオペレーションが難しかった。ソフトセンサにより現在の品質推定値がリアルタイムに分かれれば、オペレーターはそれを根拠に適切なプラント運転や介入が可能となる。
- リアルタイムに分かる品質推定値に基づいて、従来の品質が不明確であることを前提としたマージンを減らすことができるので、ムダが減って品質改善や省エネルギーにつなげることが可能になる。
- 計測機器で目的とする品質値を連続測定できる場合も、ソフトセンサを併用することでソフトセンサを計測機器の測定値の異常検出にも利用できる。

2.3 ソフトセンサの課題

2.2節のような効果を得るためには精度の高いソフトセンサを効率的に構築して実装することが必要である。

ソフトセンサを使ってプロセスの品質値を精度良く推定するためには、適切な説明変数の組合せを用いて適切な数式モデルとパラメータを適用しなければならない。それらの最適な組合せを多数の候補の中から選び出すことが必要であるが、従来は人手により試行錯誤を重ねるしかなかったため膨大な工数を要していた。この構築に係る作業を大幅に効率化することがソフトセンサを実用化する上での大きな課題である。

さらに、構築したソフトセンサを実プラントで運用する

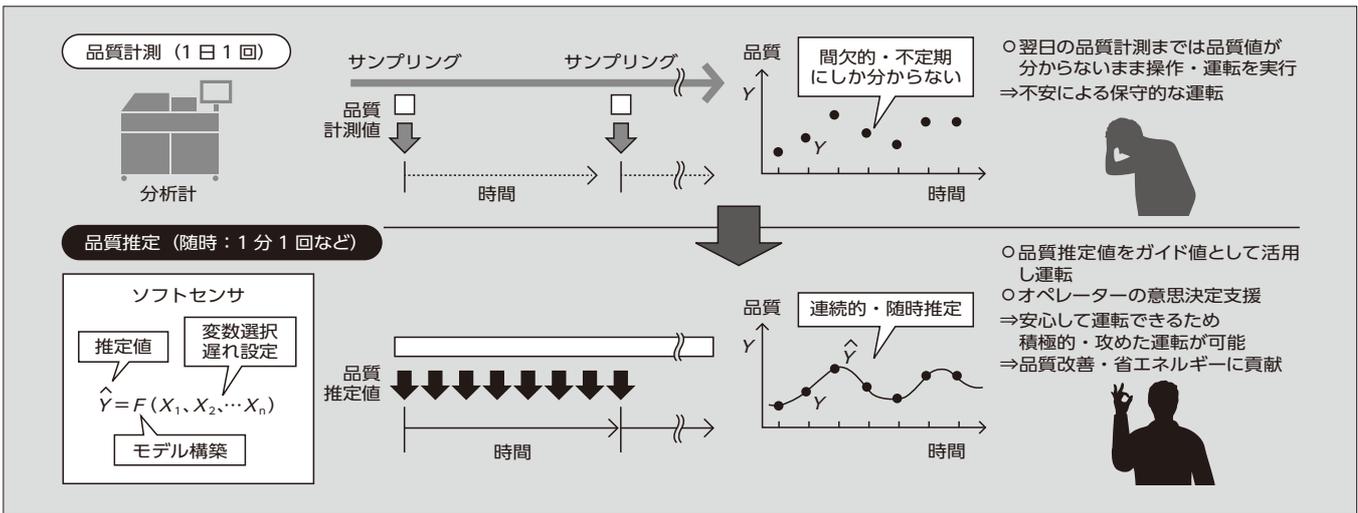


図1 ソフトセンサの効果

ためには、測定された温度や圧力などの説明変数を入力して数式モデルに基づいて計算し、目的変数である品質推定値を出力するシステムが必要となるのに加えて、実プロセスの状態が変化することに応じて、ソフトセンサの数式モデルのパラメータなどを更新していく仕組みも備えていなければならない。

3 ソフトセンサ構築ツール

3.1 ソフトセンサ構築ツールの概要

これまでの人手による試行錯誤を不要とし、高精度のソフトセンサを効率的に構築できるツールを開発した。このソフトセンサ構築ツールは、独立行政法人 日本学術振興会 プロセスシステム工学第143委員会ワークショップ No.32 “ソフトセンサー実装” (代表幹事: 船津公人) において大学、化学会社の品質管理・生産管理部門、エンジニアリング会社および富士電機により開発されたものである。この中で、従来のソフトセンサ構築において大きな課題であった、説明変数や数式モデルの種類とパラメータの最適な組合せを選び出す一連のプロセスの標準化と自動化を実現した。こうして実現した一連のプロセスを 3.2 節に示す。

3.2 ソフトセンサの構築から運用までの流れ

図2に示したソフトセンサの構築から運用までの流れを次に説明する。

(1) データ収集

ソフトセンサの構築に使用するデータを収集する。収集するデータは、推定対象である製品品質などの目的変数と、目的変数に影響を及ぼす可能性のあるプロセスデータなどの説明変数の双方を取得する必要がある。

(2) データの前処理

収集した説明変数のデータには、外れ値や異常値、ノイズが含まれている場合がある。これらは適切なソフトセンサの構築を妨げる要因となるため、外れ値や異常値の除去、移動平均化によるノイズ除去などデータの前処理を実施す

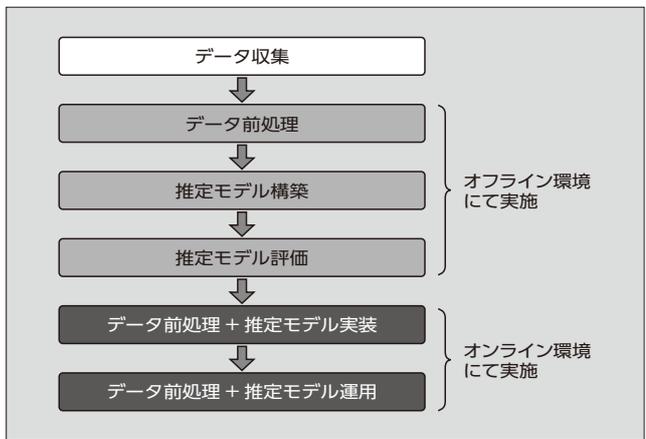


図2 ソフトセンサの構築から運用までの流れ

る。

(3) ソフトセンサの構築と評価

説明変数から目的変数を推定する数式モデルには、部分的最小二乗法 (PLS: Partial Least Squares) やサポートベクター回帰 (SVR: Support Vector Regression)、プロセスの状態変化に応じ逐次自動で数式モデルを更新する JIT (Just-In-Time)-PLS などの回帰手法を筆頭に複数の手法が候補となる。これらの数式モデルと説明変数の組合せからなる複数のソフトセンサの候補を構築し、それぞれの推定精度を比較して評価する。

(4) ソフトセンサの実装

評価結果に基づいて目標精度が達成できるソフトセンサを選択し、これをオンライン環境に設置した演算用 PC に実装する。

(5) ソフトセンサの運用

説明変数として使われるプロセスデータはリアルタイムに測定され、プロセスを制御する制御システムのデータサーバに格納される。演算用 PC は制御システムのデータサーバから取得した説明変数をソフトセンサに入力し、出力される推定結果を制御システムのデータサーバに書き込んで推定値を制御システムに受け渡す。

(6) ソフトセンサの再構築

時間の経過とともに、例えば配管内にスケール（付着物）が蓄積していくなど、プラント設備の特性が変化して推定モデルと差異が生じることでソフトセンサの推定性能が低下する場合がある。推定性能低下が許容できない段階になる前に、ソフトセンサの再構築を行う。ソフトセンサの再構築は、データ収集、データの前処理、ソフトセンサの構築と評価の手順を再度行うことで実現される。

3.3 ソフトセンサ構築ツールの構成

ソフトセンサ構築ツールのシステム構成例を図3に示す。この構築ツールには、3.2節で述べた一連の処理を標準化し自動化する仕組みを組み込んでいる。本ツールはオフラインツールとオンラインツールの二つのソフトウェアで構成される。

(1) オフラインツール

オフラインツールは、ソフトセンサを作り上げるために使われる。

あらかじめ入力された目的変数と説明変数候補のデータに対して、検討対象とするデータの範囲（期間）や説明変

数候補の選択、遅れ時間の範囲や候補となる数式モデルの種類や条件などを設定すると、学習用データを用いて当該設定条件ごとの複数の数式モデル候補が生成される。この各数式モデル候補をテスト用データに適用して目的変数値が推定され、候補ごとの推定性能の評価指標である二乗平均平方根誤差（RMSE：Root Mean Squared Error）と決定係数 R^2 が算定される。これらの処理が自動的に行われた上で、これらを比較して最も性能の良い数式モデル、すなわちソフトセンサが選定される。目的変数や説明変数のデータ入力や選定されたモデルの情報はテキストファイル形式でやり取りされる。

このオフラインツールの機能一覧を表1に示す。

(2) オンラインツール

オンラインツールは、実プロセスでソフトセンサを運用する際に使われる。

あらかじめオフラインツールから入力されたモデル情報に基づく数式モデルを使って、プラントの制御システムのデータベースから逐次読み込まれる説明変数データから目的変数である製品品質の推定値を推算する。このように、オフラインツールで選定したモデルを直ちに実プラントで

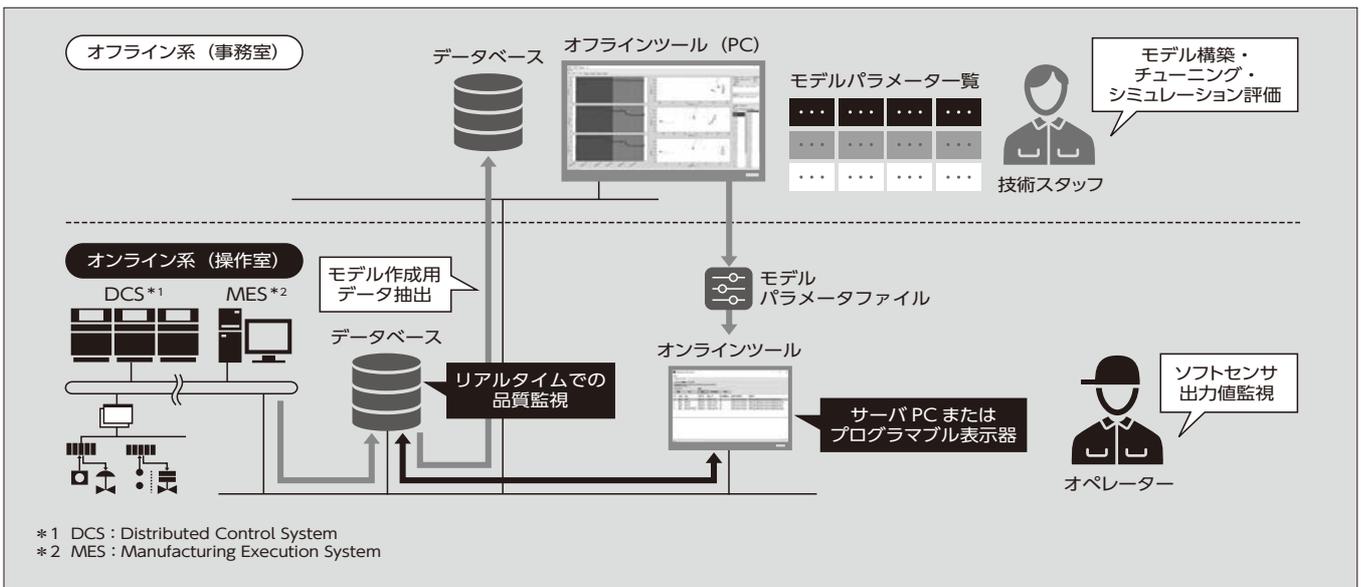


図3 ソフトセンサ構築ツールのシステム構成例

表1 オフラインツールの機能一覧

No.	機能説明	備考
1	実績データ読み込み（説明変数、目的変数）	—
2	サンプル選択（学習用、テスト用）	—
3	変数選択、最大遅れ設定	—
4	学習用データでの変数選択・モデル構築・性能評価	—
5	テスト用データでの推定性能評価	RMSE*1、 R^2 *2
6	探索候補とする全ての選択変数・モデルについて計算・列挙	—
7	モデルファイル出力	—

*1 RMSE：二乗平均平方根誤差
*2 R^2 ：決定係数

表2 オンラインツールの機能一覧

No.	機能説明	備考
1	モデルファイル読み込み	—
2	推算開始・停止（モデルごと）	複数モデル可
3	ヒストリアンデータ（瞬時値）入力	毎周期
4	ヒストリアンデータによりモデル計算により推算値算出・出力	毎周期
5	結果表示・保存	毎周期

運用することができる。推算された品質値はプラント制御システムのデータベースに書き込まれ、オペレーターがいつでも確認することができる。

オンラインツールの機能一覧を表2に示す。

これらのツールを利用することにより、ソフトセンサを構築する手順には試行錯誤を伴わず、標準化することができる。ソフトセンサの構築から運用までを簡便かつ迅速に行うことができるので、人手で行う場合に比べてエンジニアリング工数が大きく削減できる。

4 ソフトセンサ構築ツールの適用事例

4.1 対象プロセス

開発したツールを使って構築したソフトセンサの効果を検証するため、独立行政法人 日本学術振興会 プロセスシステム工学第143委員会ワークショップ No.27 “プロセス制御技術”で開発された酢酸ビニルモノマー（VAM：Vinyl Acetate Monomer）⁽⁵⁾⁽⁶⁾製造プロセスのシミュレータによって生成されたデータを使用した。このシミュレータは、実プラントに近い環境でシミュレーションが行えるように構築されたものであり、今回のような品質推定や、制御などのベンチマークモデルに利用できる。

図4に示すVAM製造プロセスは、原料としてエチレン（ C_2H_4 ）、酢酸（ CH_3COOH ）、酸素（ O_2 ）が投入され、反応、気液分離、吸収などの処理を経て蒸留塔にて分離精製され、VAMを製品として取り出す。ここで、目的変数である蒸留塔の底部の水分濃度を温度、圧力、流量の49個の説明変数を用いて推定する。この水分濃度はリアルタイム計測が難しく、従来は手分析によるサンプリング計測が一般的であった。

4.2 検証結果

4.1節のVAM製造プロセスのシミュレーションデータ

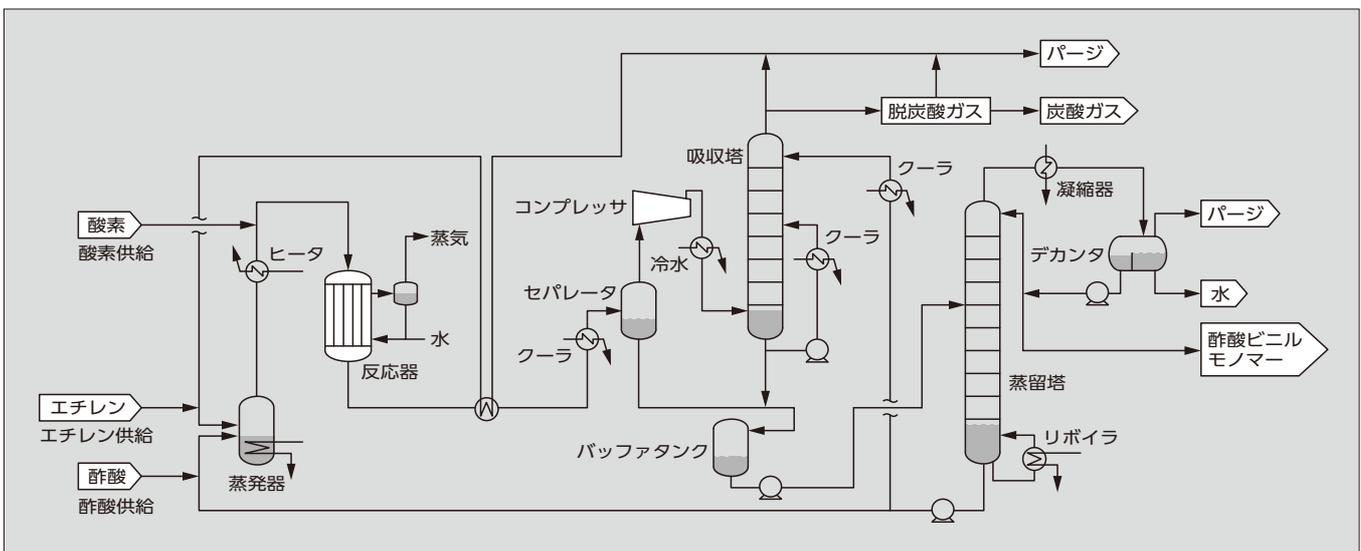


図4 酢酸ビニルモノマー (VAM) 製造プロセス (訳語は富士電機にて作成)

を用いて、データ前処理から推定モデル評価までを実施した。このデータでは、説明変数は1分単位のデータであるが、目的変数は1日に1回計測されたもので取得タイミングが異なる。開発したツールでは目的変数と同じ時刻に取得された説明変数の特定と選択を自動的に行うことができる。また、推定モデル構築においては、数式モデルの種類の候補として、PLS、SVR、JIT-PLSの各数式モデルに調整係数を設けて、数十種類の組合せを候補とした。図5にソフトセンサ構築ツールによる工程削減の内訳を示す。推定モデルの評価までを従来の人手による試行錯誤により処理した場合に比べて、本ツールを利用することにより約1/3の期間で実施することができた。

今回の検証では、ソフトセンサの数式モデルとしてJIT-PLSが選定された。図6にソフトセンサ構築ツールによる最適化例を示す。従来の人手により構築する場合には採用されることが多かったPLSによるソフトセンサと性能を比較したところ、推定誤差であるRMSEが、従来法(PLS)で0.46%、最良結果(JIT-PLS)で0.26%となり、本ツールで構築したソフトセンサの方が推定精度が高くなる結果となった。

4.3 ソフトセンサの適用によるコスト削減効果⁽⁸⁾

4.1節のVAMシミュレータにより、検討対象としたVAM製造プロセスに今回構築したソフトセンサを適用し

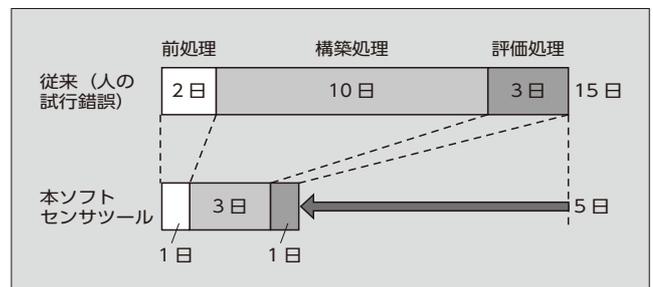


図5 ソフトセンサ構築ツールによる工程削減の内訳

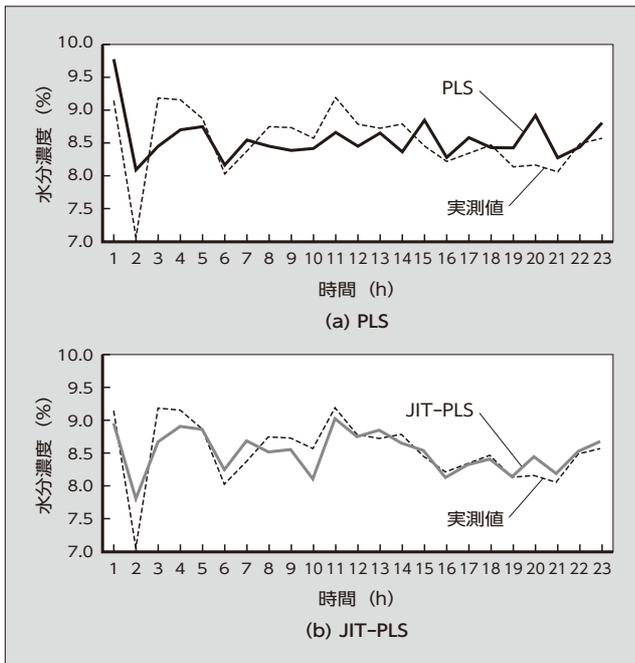


図6 ソフトセンサ構築ツールによる最適化例

た場合の改善効果を生シミュレーションにより試算した。従来は蒸留塔底部の水分濃度をリアルタイムで計測できなかったため、直接これを制御することができず安定化に時間がかかっていた。これに対し、ソフトセンサを用いれば水分濃度のリアルタイム推定が行え、この推定値に基づいて塔底部のリボイラでの水分濃度の直接制御と、それによる早期安定化が可能となる。その結果、当該水分濃度を安定して低減でき、それに伴う蒸発器・反応器の供給蒸気量・原材料原単位の低減などにより年間で8百万円に相当するコスト削減が期待できることが分かった。また、前述のリボイラの制御に悪影響を与えるようなソフトセンサの推定値の異常も発生しなかった。

5 あとがき

プラントの操業最適化に貢献するソフトセンサについて述べた。本技術により、既設の制御システムにもソフトセンサを容易に導入することができ、ソフトセンサの推定値により制御を最適化することで、プラントにおける製品品質の安定化、省エネルギー、安全性の向上、オペレーターの負荷低減、環境負荷低減などを実現し、生産性向上に貢献できると考える。また、富士電機の監視制御システム「MICREX-VieW FOCUS Evolution」に実装されているプラント情報管理システム (PIMS : Plant

Information Management System) と連携することで、既存のプラント操業支援パッケージソフトウェアとのシームレスな統合が可能である。プラント操業を支援する機能を拡張して、お客様のプラントオペレーションの革新に貢献する所存である。

参考文献

- (1) デジタルトランスフォーメーションを推進するためのガイドライン. Ver.1.0. 経済産業省. 2018.
- (2) 2022年版ものづくり白書. 経済産業省. 2022.
- (3) 加納学. 仮想計測技術の開発. 計測と制御. 2012, vol.51, no.9, p.845-852.
- (4) 船津公人. 仮想計測技術の現状と課題. 化学工学. 80(12), 2016, p.764-768.
- (5) Machida, Y. et al. Vinyl Acetate Monomer (VAM) Plant Model: A New Benchmark Problem for Control and Operation Study, Dynamics and Control of Process Systems, including Biosystems (DYCOPS-CAB2016).
- (6) オメガシミュレーション, <https://www.omegasim.co.jp/>, (参照 2023-02-28) .
- (7) 船津公人, 金子弘昌. ソフトセンサー入門 (基礎から応用研究例まで). コロナ社. 2014.
- (8) 金尚弘ほか. ソフトセンサー設計ツールの機能紹介. 化学工学. 87(4), 2023, p.171-174.



田中 雅紀

化学分野の計測制御システムのビジネス開拓業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ インダストリー事業本部プロセスオートメーション事業部技術第二部主査。化学工学会会員、化学工学会誌編集委員。



加藤 泰輔

産業オートメーション向け製品の商品企画業務および産業用ネットワークの標準化業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ インダストリー事業本部事業統括部グローバルビジネス戦略室主任。



村上 賢哉

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デジタルプラットフォームセンター AI 研究部主査。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。