

E-Smart MPC

制御盤の中に納まる 最適制御AI コントローラ

製品コンセプトブック



産業用 Raspberry Pi 5 ベースの小型・堅牢筐体

PID制御より賢く、 強化学習より実用的。

モデル予測制御（MPC）と機械学習を融合したProxima Technology独自の最適制御AI「Smart MPC」を、そのまま製造現場へ。

- 実機で収集できるデータ量で最適制御を学習
- 多変数・むだ時間・制約条件に強い
- 特に多変数システム導入調整工数が大幅に削減
- PLCとブラウザだけで導入が完結
- 学習も制御もエッジ単体で実行（クラウド不要）

Contents

1 製品コンセプト	2
1.1 制御手法のポジショニング	2
2 製造現場が直面する制御の課題	2
2.1 制御手法の比較	3
3 コア技術：Smart MPC	3
3.1 学習するモデル予測制御	3
3.2 未来を予測して制御する	3
3.3 オンライン学習で使い続けるほど現場に馴染む	4
4 システム構成	4
4.1 扱う信号	4
4.2 製品仕様	5
5 すべてがブラウザで完結するGUI	5
6 導入から運用までの5ステップ	10
6.1 Step 1：接続と初期設定	10
6.2 Step 2：ステップ入力による応答確認	11
6.3 Step 3：初期学習データ収集（M系列加振）	11
6.4 Step 4：Smart MPC 事前設定と制御開始	11
6.5 Step 5：コスト係数による挙動の作り込み	12
7 安全性を最優先した設計	13
8 実証事例と適用領域	13
8.1 多入力多出力温調システムによる実証	13
8.2 適用領域	14
9 まとめ・お問い合わせ	14

1 製品コンセプト

E-Smart MPCは、モデル予測制御（MPC: Model Predictive Control）と機械学習を組み合わせた独自の最適制御AI「Smart MPC」を、制御盤に収納可能な産業用エッジデバイスに実装した最適制御AIコントローラです。コンセプトは、「**モデル予測制御の民主化**」です。名称の「E」は次の3つを表しています。

Edge（エッジ）

学習・予測・最適化のすべてをエッジ単体で実行。クラウド接続は不要で、プロセスデータは外部に出ません。

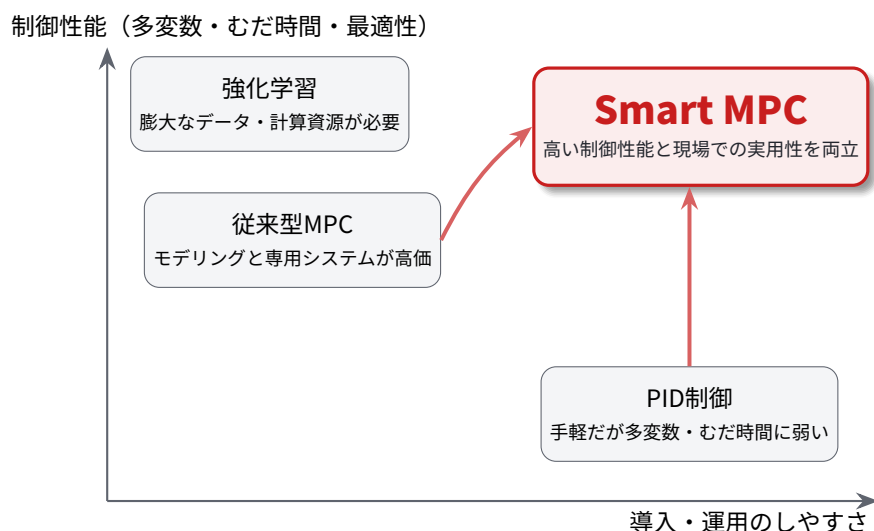
Embedded（組込）

制御盤収納サイズ・DC24V電源・動作温度 $-20 \sim 60^{\circ}\text{C}$ 、ファンレス。既存の制御盤にそのまま組み込めます。

Economical（経済性）

高価な専用MPCシステムや大規模計算資源を不要にし、先進制御の導入コストを大幅に低減します。

1.1 制御手法のポジショニング



▲ Smart MPC の位置づけ：従来型MPC・強化学習の性能と、PID並みの手軽さを両立

2 製造現場が直面する制御の課題

1. PID制御の限界

- むだ時間（遅延）を含むプロセスで性能が低下
- 多変数制御で相互干渉が発生し不安定化しやすい
- 拘束条件を制御則で直接扱えない
- 非線形システムでは調整が困難

2. 調整にかかる負担

- 1プロセスあたりの調整に長時間を要する
- 最適化が熟練エンジニアの経験に依存
- 経年劣化・環境変化のたびに再調整が必要

3. 先進制御のハードル

- 強化学習は学習データと計算資源の確保が課題
- 従来MPCは専用システムが高額で専門知識も必要
- 産業用PC・サーバーの設置スペース確保が困難

E-Smart MPC はこれらの課題を現場レベルで解消するために設計されています。 わずか数十分～数時間程度のデータ量*で最適制御を学習し、制御盤にそのまま収まる省スペース設計。環境変化に自動適応するオンライン学習により、メンテナンスの手間を削減します。（*データ量は制御対象の応答時間などの動特性に依存します）

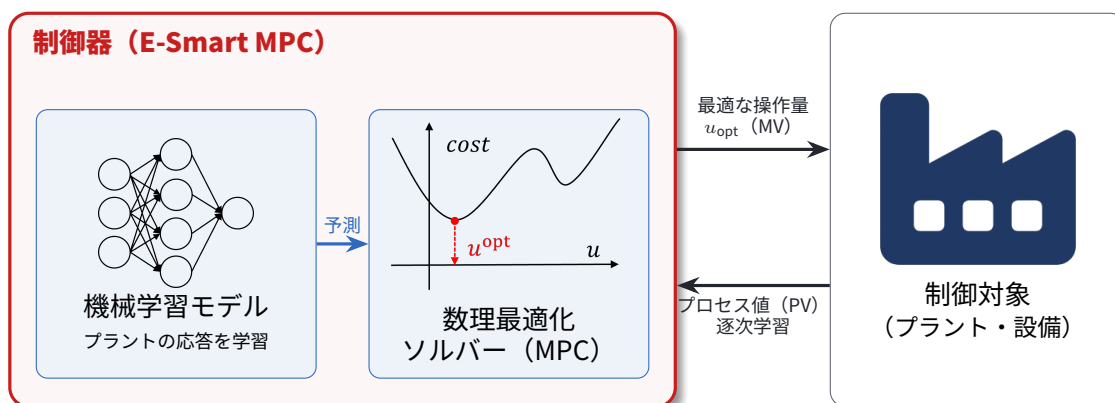
2.1 制御手法の比較

	PID制御	従来型MPC	強化学習	Smart MPC
多入力多出力（MIMO）対応	×	○	○	○
むだ時間への強さ	×	○	△	○
拘束条件の取り扱い	×	○	△	○
モデリングの自動化	—	×（人手）	○	○
学習に必要なデータ量	—	—	×（膨大）	○（少量）
計算資源	○（小）	△（中～大）	△（中～大）	○（エッジで可）
体系的なチューニング	×（勘と経験）	△	×	○（ガイド整備）

3 コア技術：Smart MPC

3.1 学習するモデル予測制御

Smart MPC は、モデル予測制御の長所（未来予測に基づく多変数最適制御・拘束条件の取り扱い・むだ時間への強さ）を引き継ぎつつ、最大の欠点である**モデリングの難しさ**を**機械学習で解決**します。制御器の内部には、プラントのダイナミクスを模倣する機械学習モデルと数理最適化ソルバーがあり、学習したモデルを用いて毎ステップ（例えば1秒ごと）最適な制御入力 u_{opt} を計算してプラントへ渡します。



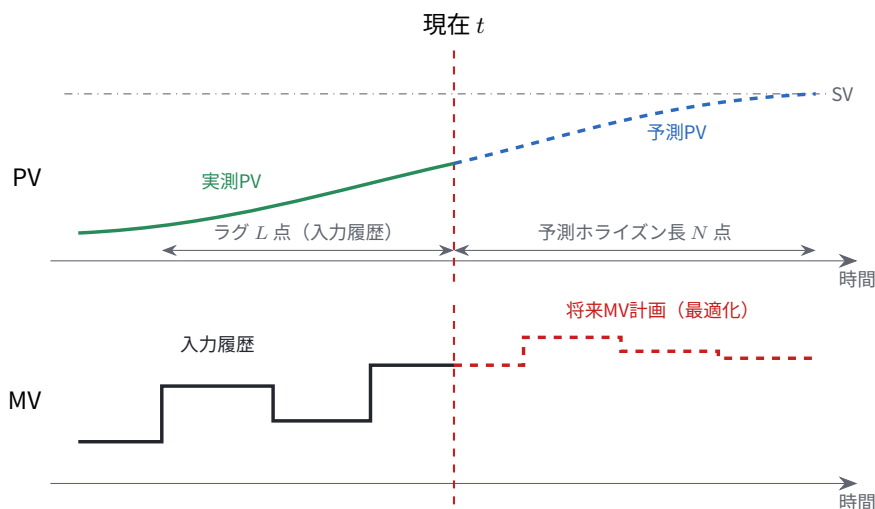
▲ Smart MPC のアーキテクチャ：学習と最適化を分離して解くことで、少ないデータで安定に学習

強化学習が「未来の予測」と「行動の最適化」をひとつの関数（Q関数等）に押し込めて一気に解こうとするのに対し、Smart MPC はこの2つを分離して個別に解きます。これにより学習が著しく簡単かつ安定になり、**倒立振子の実証実験では、従来の強化学習（例：DQN）が数百エピソードを要する課題を、わずか数エピソードで安定制御**できることを確認しています。

参考：Smart MPCによる倒立振子の振り上げ学習（<https://youtu.be/peQTAA1w0NY>）

3.2 未来を予測して制御する

Smart MPC は、過去の入出力履歴（ラグ）から学習モデルで将来のPVを予測し、予測ホライズンの範囲で最適なMV計画を立案します。この「予測してから動く」構造が、むだ時間の大きいプロセスでもハンチングやオーバーシュートを抑えられる理由です。



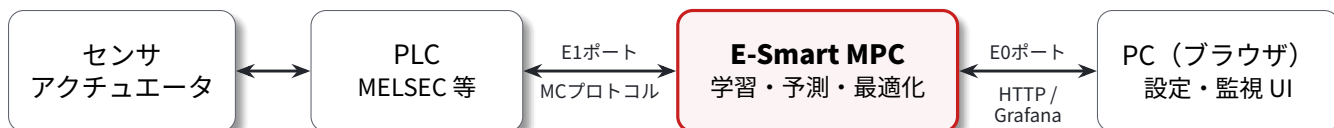
▲ ラグ・予測ホライズンの関係：予測に基づき将来のMV計画全体を最適化

3.3 オンライン学習で使い続けるほど現場に馴染む

Smart MPC は常に最新のデータに基づいてプラントモデルをアップデートし続けるため、**経年劣化や設備更新に伴う制御性能の低下にも柔軟に対応**できます。従来は人手に頼っていた制御操作やチューニングが自動化され、安定した性能を維持しながら運用負荷を軽減します。

4 システム構成

E-Smart MPC は2つのEthernetポートを備え、UI表示用（E0）とPLC通信用（E1）を分離した構成をとります。PLCとはMCプロトコルや上位リンク通信等で周期通信を行い、PV・SVの読み取りとMVの書き込みを行います。UIはGrafana連携で、同一LAN内のPCのWebブラウザから利用できます。



▲ システム構成：PLC通信とUI表示のネットワークを分離し、安全に運用

4.1 扱う信号

信号	役割
PV	監視・予測・制御対象のプロセス値。PLC経由でセンサ値を取得
MV	E-Smart MPC が計算しPLCへ書き込む操作量
SV	PVの目標値。PLCから取得／UI入力を選択可能

変数ごとに名称・PLCデバイス・スケーリング係数・データ型・上下限・デフォルト値をGUIから定義でき、多変数プロセスにも柔軟に対応します。

4.2 製品仕様

ハードウェア仕様

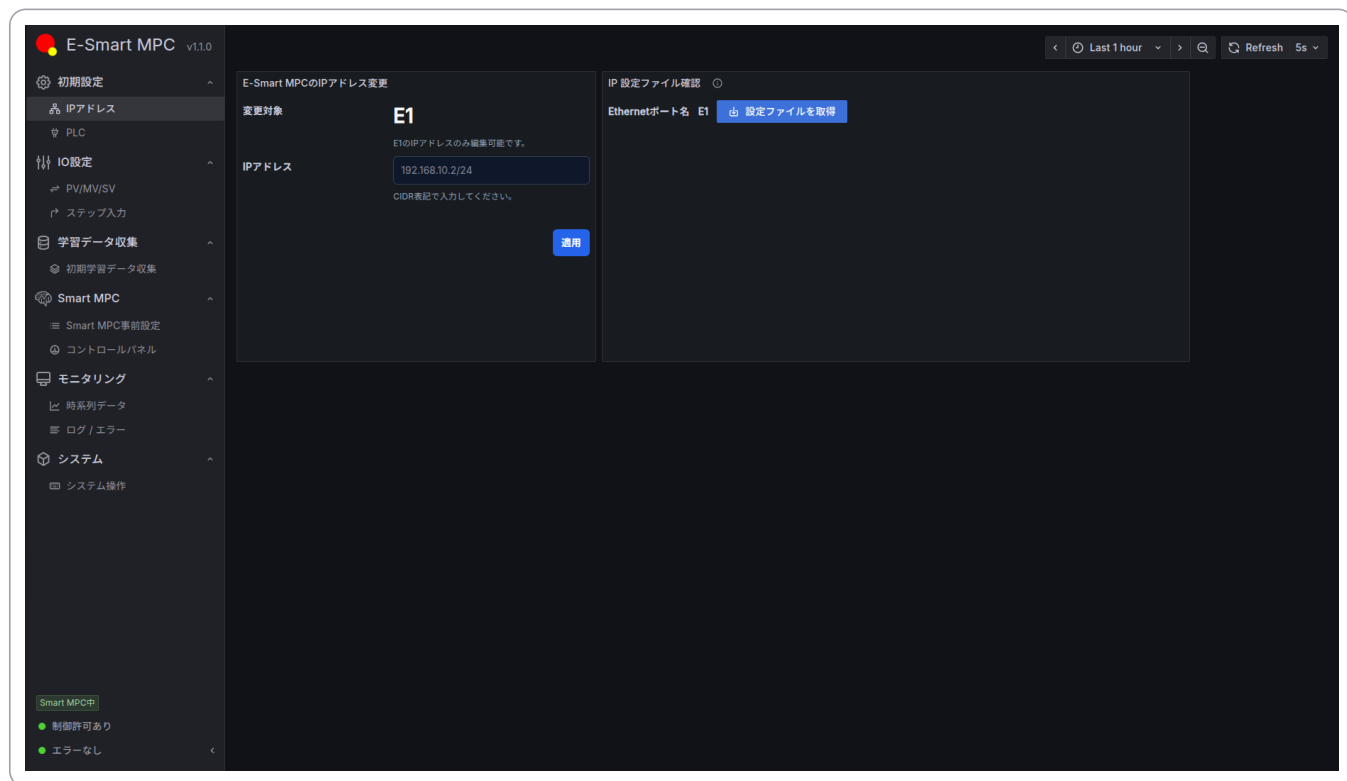
プロセッサ	Cortex A76（4コア）／産業用 Raspberry Pi 5 ベース
メモリ	8GB RAM
ストレージ	eMMC 64GB + SSD 128GB~1TB
筐体	制御盤収納対応（産業用規格準拠）
電源	DC24V（産業標準）
動作温度	-20 ~ 60°C
ネットワーク	Gigabit Ethernet × 2ポート（UI用 E0／PLC通信用 E1）
通信プロトコル	MCプロトコル/上位リンク通信 等 対応

ソフトウェア仕様

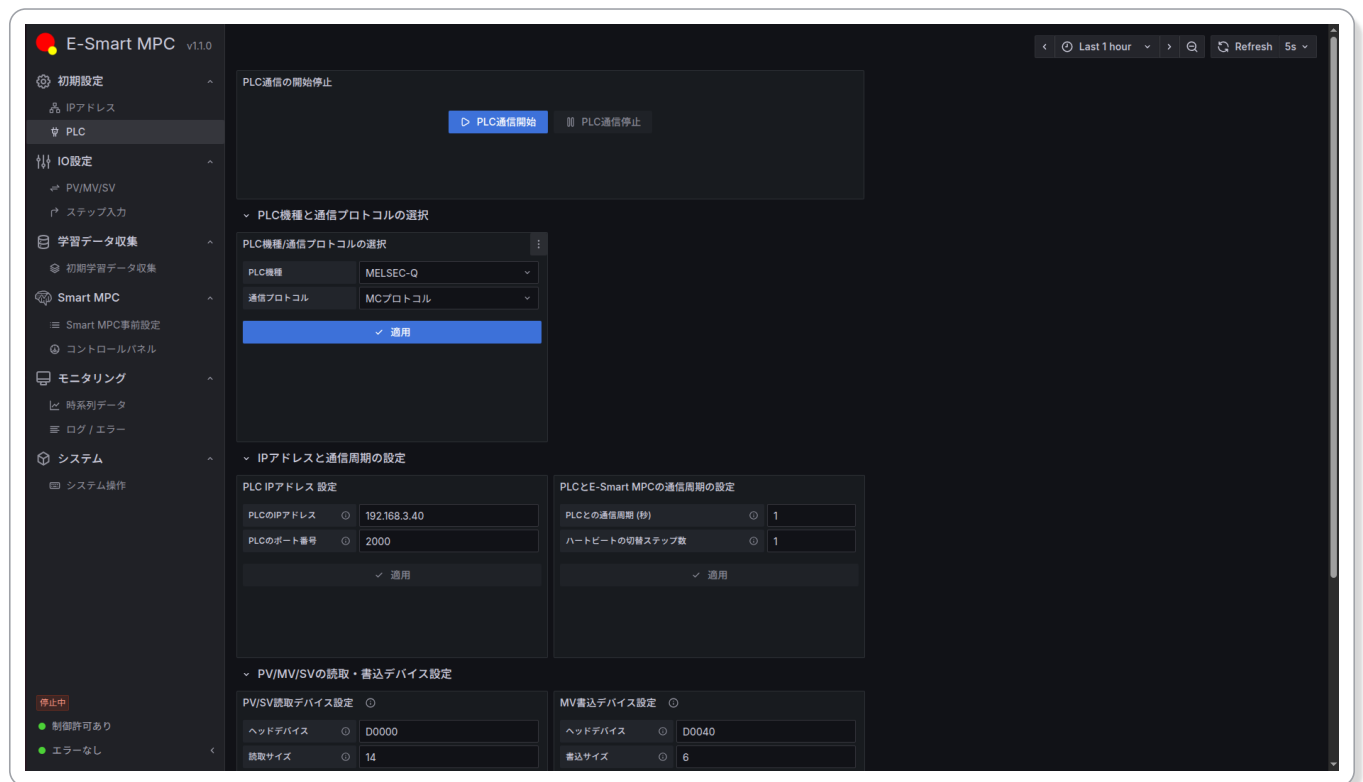
制御エンジン	独自開発の高速MPC演算アルゴリズム／リアルタイム学習・推論エンジン
PLC対応	MELSEC-Q / MELSEC iQ-R / KV8000 等
UI	Grafana連携による可視化・入力（Chrome / Firefox / Edge）
ユーザー管理	閲覧専用（viewer）／操作可能（editor）の権限分離

5 すべてがブラウザで完結するGUI

PLC通信設定、入出力変数の定義、学習データ収集、制御パラメータ調整、時系列監視、ログ確認までを一つの画面体系に統合。追加ソフトウェアのインストールは不要です。



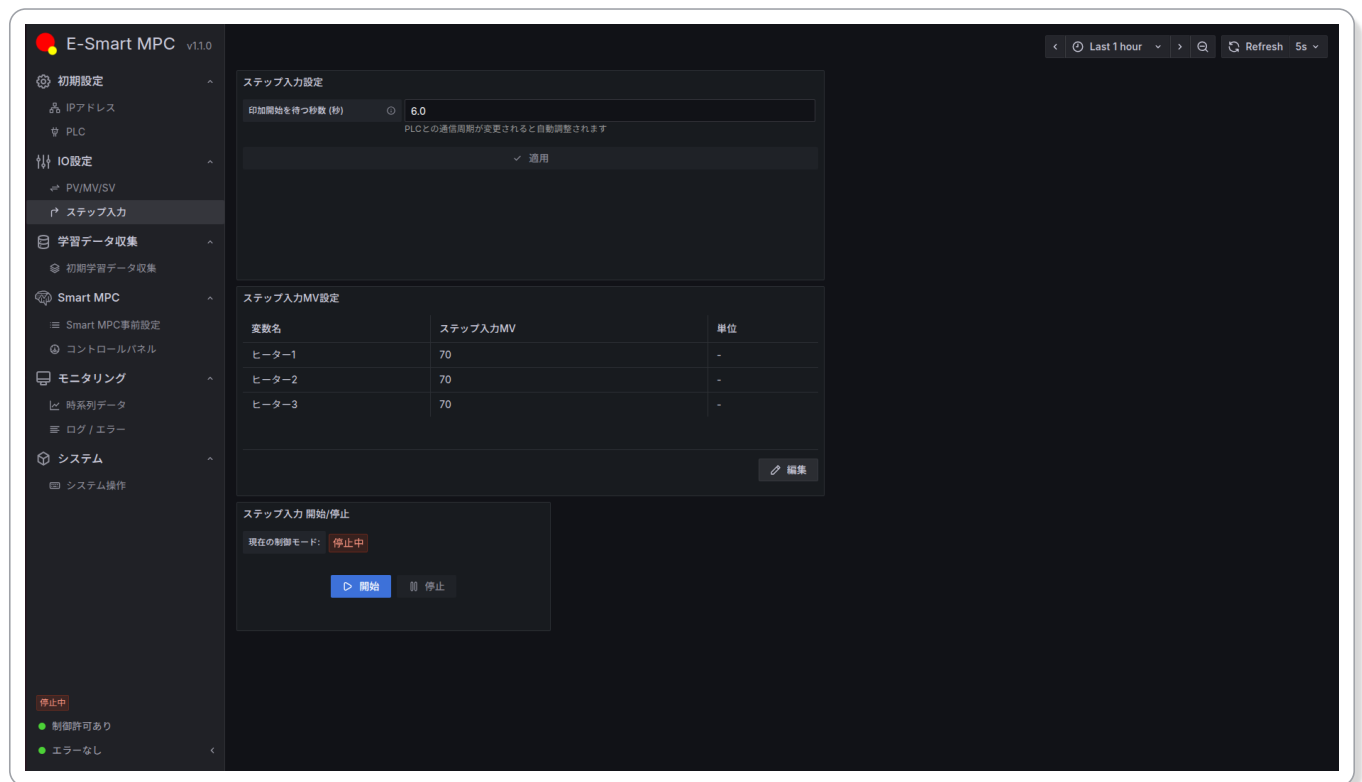
▲ IPアドレス設定：E1ポートのネットワーク設定



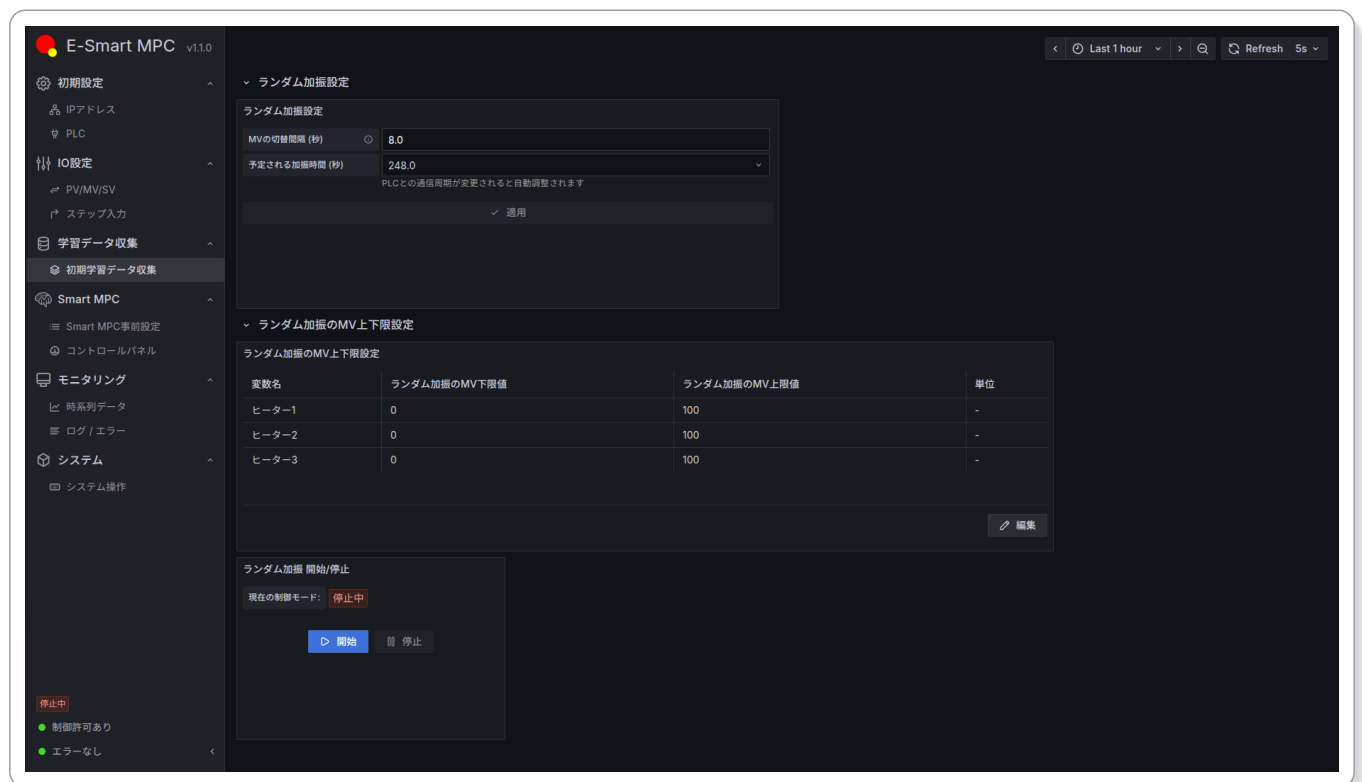
▲ PLC IO設定：PLC機種・通信プロトコル・接続先の設定



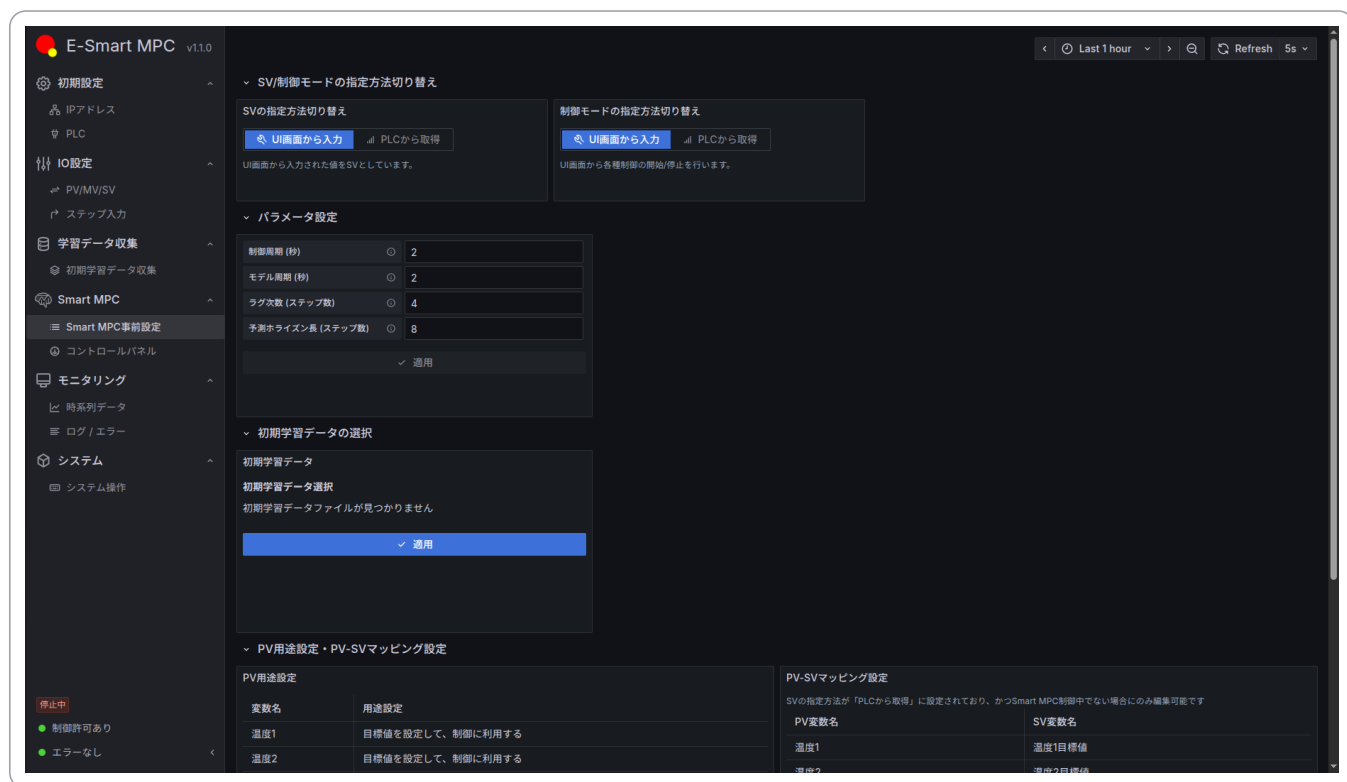
▲ PV・SV・MV設定：変数、デバイス、スケーリング、上下限の定義



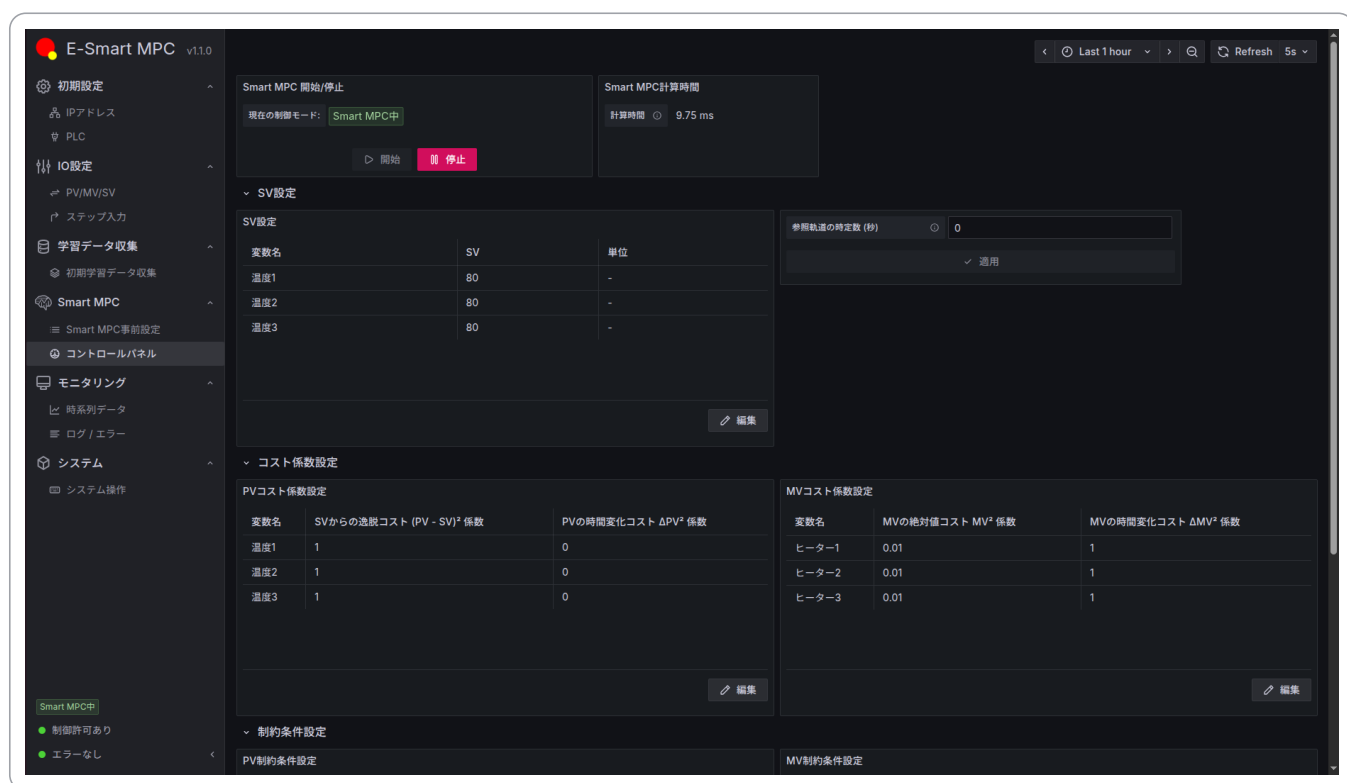
▲ ステップ入力テスト：制御対象の応答特性を確認



▲ 初期学習データ収集：設定範囲内でランダム加振を実行



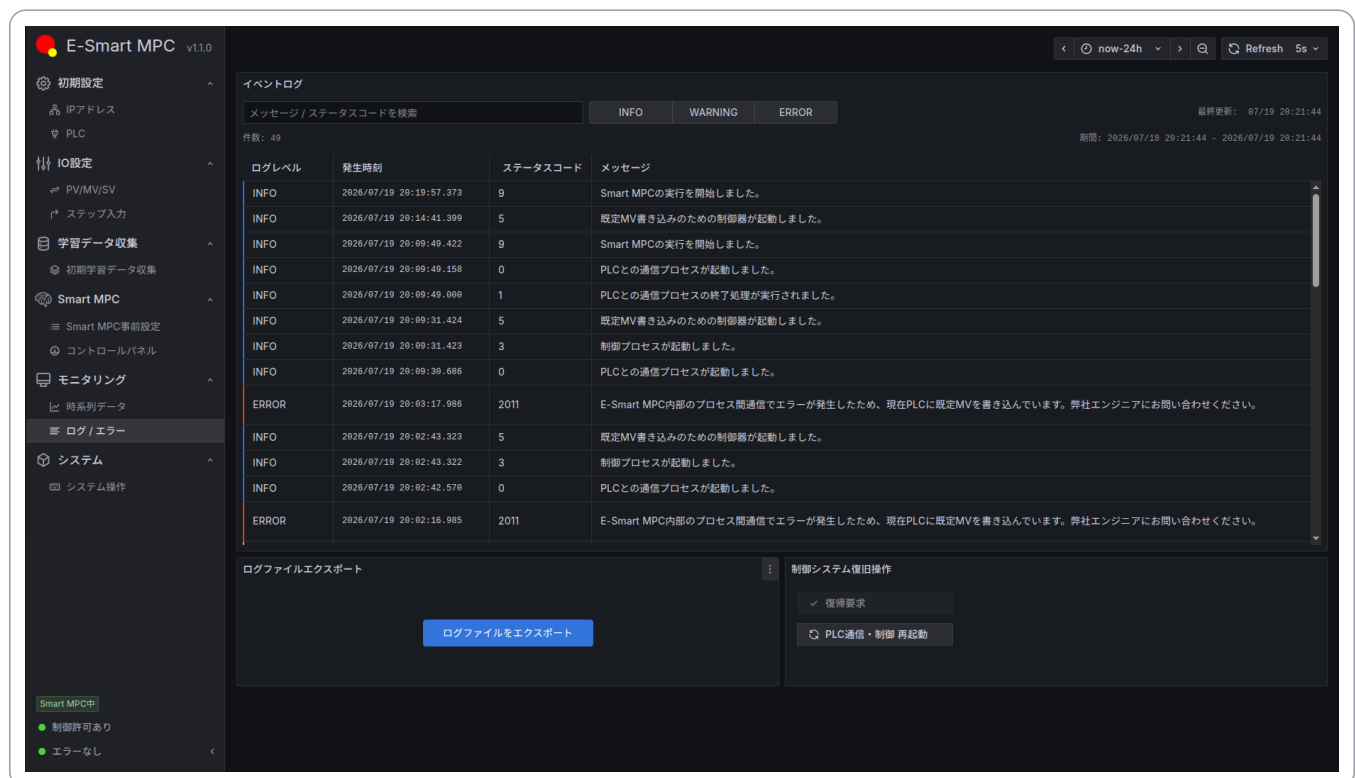
▲ Smart MPC事前設定：周期・ホライズン・ラグ・学習データの選択、PV-SVマッピング設定



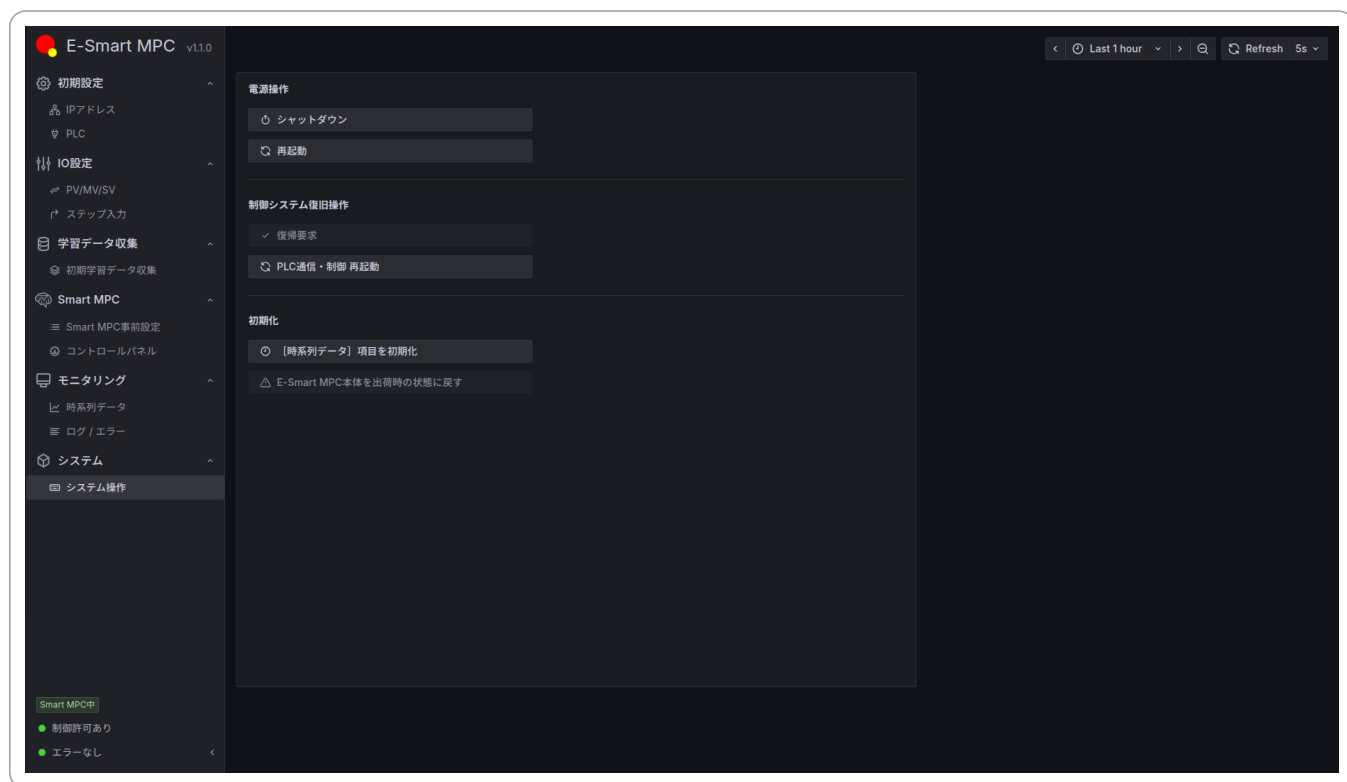
▲ コントロールパネル：SV値手動設定・コスト係数・制約の調整・MPC開始/停止



▲ 時系列データ：PV・SV・MV・予測値をリアルタイム監視



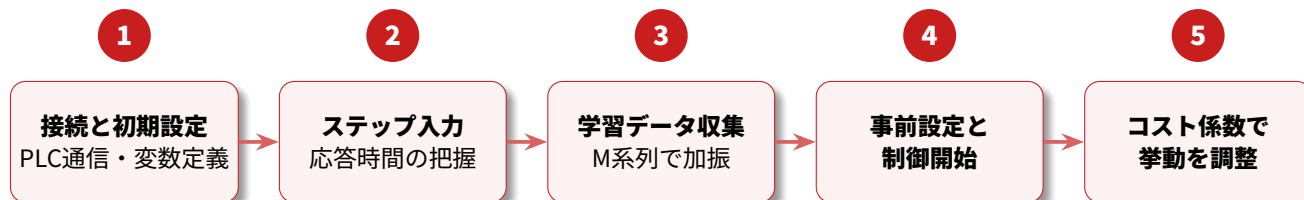
▲ ログ・エラー：イベントログの検索・確認と復旧操作



▲ システム操作：運用・保守に必要な操作をブラウザから実行

6 導入から運用までの5ステップ

立ち上げ手順は標準化されており、調整ガイドブックに各段階の設定目安とトラブルシューティング指針が整備されています。制御の専門家でなくても、手順に沿って多変数最適制御を立ち上げられます。



6.1 Step 1：接続と初期設定

LANケーブルでPLCと接続し、UI画面からPLC機種・通信プロトコル・IPアドレス・通信周期を設定します。続いてPV/MV/SVの各変数について、PLCデバイス・スケーリング係数・データ型・上下限、そして制御停止時に出力する安全なデフォルト値を定義します。設定後は「PLC通信開始」を押すだけで周期通信が始まります。



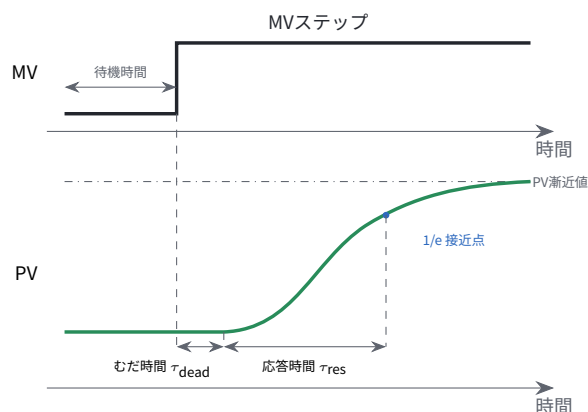
▲ PLCのIPアドレス・ポートを入力するだけで接続

6.2 Step 2：ステップ入力による応答確認

各MVにステップ状の入力を印加し、PVの応答を観察します。ここで得られる「システム時間」 τ_{sys} （むだ時間 τ_{dead} と応答時間 τ_{res} の和）が、以降の学習データ収集や制御パラメータ設定の基本時間スケールになります。

$$\tau_{sys} = \tau_{dead} + \tau_{res}$$

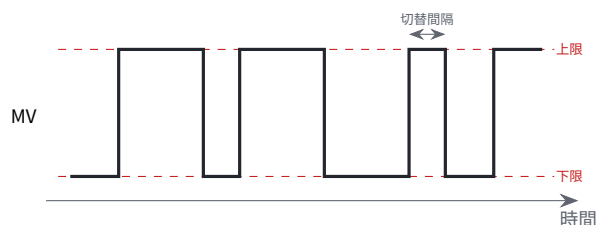
待機時間とステップ値をGUIで設定し、開始ボタンを押すだけ。結果は時系列データ画面ですぐに確認できます。



▲ ステップ応答からシステム時間を見積もる

6.3 Step 3：初期学習データ収集（M系列加振）

M系列と呼ばれるランダム信号でMVを安全範囲内で加振し、プラントの応答データを収集します。MVの切替間隔・加振時間・MV上下限はGUIから設定でき、システム時間を基準にした目安（例：切替間隔は τ_{sys} の20～50%）が調整ガイドブックに示されています。収集したデータは時系列画面で品質を確認したうえで初期学習データとして選択します。設備異常や手動介入が混ざった区間を避けるチェックポイントもガイド化されています。



▲ M系列信号：安全範囲内で設備を十分に揺らして応答を学習

The screenshot shows the 'ランダム加振設定' (Random Vibration Setting) screen. It includes two input fields: 'MVの切替間隔 (秒)' (MV switching interval in seconds) set to 8.0, and '予定される加振時間 (秒)' (Scheduled vibration time in seconds) set to 1016.0. A note below the fields states: 'PLCとの通信周期が変更されると自動調整されます' (It will be automatically adjusted when the communication cycle with the PLC changes). An '適用' (Apply) button is at the bottom.

▲ ランダム加振の設定画面

6.4 Step 4：Smart MPC 事前設定と制御開始

制御周期・モデル周期・予測ホライズン長・ラグ次数を設定し、初期学習データを指定して Smart MPC を開始します。各パラメータにはシステム時間を基準とした具体的な設定目安が定められているため、体系的に設定できます。

制御開始後は実測PVと予測PVを同一グラフで比較でき、モデルの妥当性を直感的に確認できます。

The screenshot shows the 'Smart MPC 事前設定' (Smart MPC Pre-Setting) screen. It includes four input fields: '制御周期 (秒)' (Control cycle in seconds) set to 2, 'モデル周期 (秒)' (Model cycle in seconds) set to 2, 'ラグ次数 (ステップ数)' (Lag order in step count) set to 3, and '予測ホライズン長 (ステップ数)' (Prediction horizon length in step count) set to 16. An '適用' (Apply) button is at the bottom.

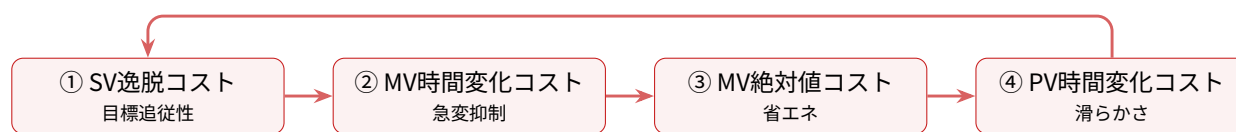
▲ パラメータ設定：4項目を入力するだけ

パラメータ	設定目安（調整ガイドブックより）
制御周期	基本的には短いほど良い。MPC計算時間が制御周期の1/4~1/2以下に収まる範囲で設定
モデル周期	システム時間 τ_{sys} の 20~50% 程度
予測ホライズン長	モデル周期×予測ホライズン長が τ_{sys} の2~4倍程度（目安 5~20）
ラグ次数	モデル周期×ラグが τ_{sys} より大きくなるように（目安 5~10）

6.5 Step 5：コスト係数による挙動の作り込み

Smart MPC は、コスト係数の**相対的な大きさ**によって制御の性格を調整します。「目標追従を強める」「操作量の急変を抑える」「省エネを優先する」といった現場の要求を、係数の大小関係として直接表現できます。制御実行中でも変更できるため、**運転を止めずに挙動を作り込めます**。

コスト係数	大きくしたときの効果
SVからの逸脱コスト	PVがSVに強く向かう（追従性向上）
PVの時間変化コスト	PVの急変を抑え滑らかな応答に
MVの絶対値コスト	操作量を小さく保つ（省エネ）
MVの時間変化コスト	操作量の急変・振動を抑制



▲ 推奨されるコスト係数の調整順序

「PVがSVに届かない」「オーバーシュートする」「ハンチングする」「MVが上下限に張り付く」といった代表的な症状ごとに、時系列の見える方・確認箇所・調整候補を整理した**トラブルシューティング指針**が調整ガイドブックとして整備されています。

7 安全性を最優先した設計

製造現場での運用を前提に、フェイルセーフ機構を多層で備えています。

PLC側の制御許可（ハンドシェイク）

PLC側で制御許可が与えられた場合のみ Smart MPC を開始できます。制御の主導権は常に現場・PLC側にあり、PLCからの要求で制御モードの開始・停止を行う運用も可能です。

制約条件と制約破綻ペナルティ

PV・MVの上下限制約を最適化問題の中で直接考慮。完全に満たせない状況でも、逸脱量が最小になるように制御します。

フェイルセーフ上下限とデフォルトMV

PVが許容範囲を逸脱した場合や制御停止時・異常時には、MVにあらかじめ定義した安全なデフォルト値を自動的に書き込みます。

状態の常時可視化と復旧操作

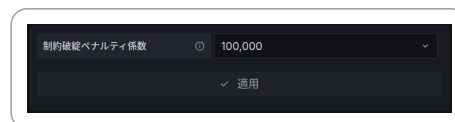
制御モード・制御許可・エラー有無をバッジで常時表示。異常時はログ/エラー画面から原因を確認し、GUI上の復旧操作（復帰要求・PLC通信/制御再起動）で立て直せます。



▲ 停止中の状態バッジ



▲ Smart MPC 実行中のバッジ

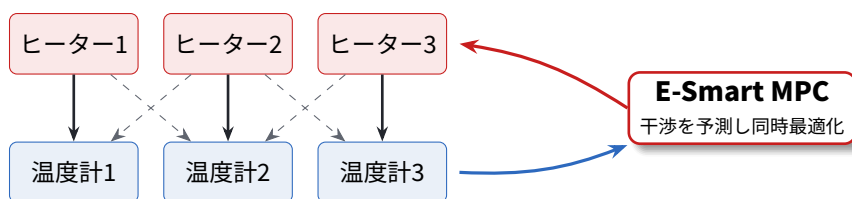


▲ 制約破綻ペナルティ係数の設定

8 実証事例と適用領域

8.1 多入力多出力温調システムによる実証

相互に熱干渉するほど近接配置された3つのヒーターと3つの温度計からなる**3入力3出力系**において、干渉を考慮した最適な多変数制御を実証。PID制御では干渉によりハンチングが生じる条件下でも、E-Smart MPC は全チャンネルを滑らかに目標温度へ整定させます。単一ループの集合では実現できない、多変数MPCならではの結果です。



▲ 3入力3出力温調デモ：相互干渉する系を一つの最適化問題として制御

8.2 適用領域

Smart MPC 技術は、塗装ブース空調の温湿度制御（空調機の最適・省エネ運転）や化学プラントのプロセス制御をはじめ、幅広い分野で活用されています。

空調・温湿度制御

プロセス制御
温度・圧力・流量

ユーティリティ

省エネと品質の
両立が必要な工程

温度の目標値からの乖離やエネルギー消費量のように**評価関数が明確に定義できるプロセス**であれば、体系的に適用できます。

9 まとめ・お問い合わせ

E-Smart MPC が提供する価値

- ・ PID制御の限界（多変数干渉・むだ時間・拘束条件・属人的な調整）を克服
- ・ 強化学習の実装課題（データ量・計算資源・学習の不安定さ）を回避
- ・ 学習から制御まで、制御盤内のエッジデバイスで完結
- ・ GUIと標準化された手順により、現場のエンジニアが自ら導入・調整可能
- ・ 常に最新データでモデルを更新し、経年劣化や環境変化にも柔軟に追従

製品カタログ、デモンストレーション、導入のご相談は下記までお問い合わせください。

会社名	株式会社 Proxima Technology
Web	https://proxima-ai-tech.com/
製品ページ	https://proxima-ai-tech.com/products/e-smart_mpc/
お問い合わせ・資料請求	sales@proxima-ai-tech.com