基于边缘控制器的模型预测控制

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

为满足节能化和多品种、少量生产等需求，在成套设备自动化方面，需要以低成本实现更细致的运用。富士电机开发出了边缘型 MPC，可在原有的 PLC“MICREX-SX”上执行以往需要使用高性能计算机运用的模型预测控制（MPC）。通过离线进行基于运行数据的 MPC 用模型辨识和优化增益的可视化，可实现稳定、先进的在线控制。此外，通过发挥 PLC 的灵活性和可靠性，可轻松地导入现场。

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　引言

为了应对日益高涨的节能化和温室气体削减这一社会需求，满足多品种、少量生产，在成套设备自动化方面，也需要更细致的运用。本文对有助于实现细致运用、通过边缘控制器运行的模型预测控制（MPC：Model Predictive Control）进行阐述。

2　间歇式工艺的课题和富士电机的举措

工艺类成套设备运行中，主要有间歇式生产和连续式生产。从应对多品种、少量生产的灵活性来看，目前大多采用间歇式生产。在间歇式生产控制方面，可进行符合某一目标值轮廓文件的运行或针对外部干扰的定值运行。

特别是以往达成期望质量的代表性间歇数据，被称为黄金间歇生产数据，其轮廓文件被用于目标值。另一方面，如果每批的运行状态都存在偏差，则批次质量不稳定，所以检测每批之间的质量差异或控制偏差是一个课题。

目前，富士电机已开发了被称为批次多变量统计工艺管理（MSPC：Multivariate Statistical Process Control）的基于批间轮廓文件差的异常检测技术[1]。

关于控制，以往在运行间歇式成套设备时，使用传统 PID（Proportional-Integral-Differential）控制或利用模型进行预测的 MPC。但是，上述方式均存在以下课题。

(a)　PID 控制的参数调整困难，需要想办法在轮廓文件的初期和后期改变增益（增益调度）等。

(b)　由于优化计算复杂，所以 MPC 需要高性能计算机。

对于间歇式工艺控制，如果可在现场也能轻松安装的边缘型控制器上安装可进行高性能控制的 MPC，即可解决客户的课题。因此，我们开发了可搭载于富士电机的可编程控制器（PLC：Programmable Logic Controller）“MICREX-SX[2]”和分散型控制系统（DCS：Distributed Control System）“MICREX-VieW XX（Double X[3]）”的新型边缘型 MPC，无需高性能专用计算机和复杂网络的处理，实现了低成本引进现场的控制功能。

3　边缘型 MPC 的构成技术

所开发的边缘型 MPC 由离线支援系统和在线控制系统构成（**图 1**）。在离线支援系统中，通过进行事先的模型辨识（制作用于预测的工艺模型）和优化增益设计，大幅削减了在线控制系统的计算量。在 PLC 等边缘控制器中，使用离线支援系统中辨识的模型和优化增益，执行高速控制算法。

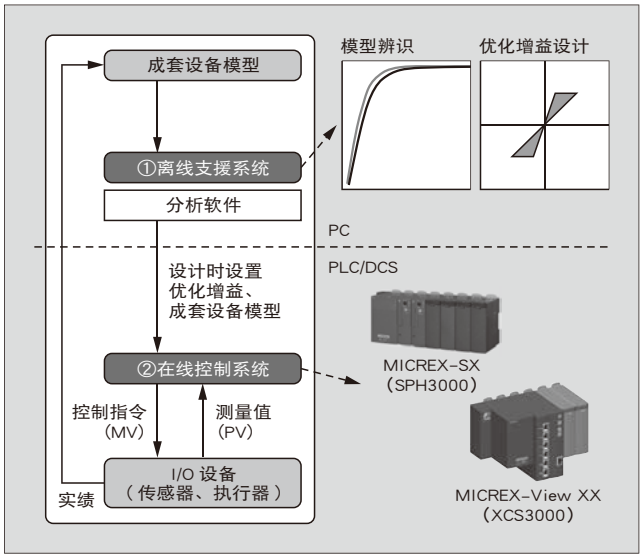

图 1　边缘型 MPC 的构成技术

3.1 离线支援技术

执行 MPC 时，需要用于预测的工艺模型。一直以来，为制作工艺模型，需要进行阶跃响应试验等影响运用的试验。此次，开发了无需实施阶跃响应试验等即可根据现在的运行数据进行模型辨识的技术（**图 2**）。可通过以往的批量数据，使用控制量、操作量和可测量的外部干扰等辨识模型。

例如，控制温度时，可考虑控制量（PV：Process Variable）为温度，操作量（MV：Manipulative Variable）为热介质的流量调节阀开度，可测量的干扰（DV：Disturbance Variable）为外部温度等。

传统的 MPC 按每个控制周期预测从现在开始的规定期间的未来，通过优化运算求出使操作量（MV），使控制量（PV）符合要求。因未来期间每次移动的情形与地平线相似，因此被称为预测地平线（相当于计算未来的长度）或者后退地平线。优化运算采用了典型数理规划法之一的二次规划法等的矩阵运算。在边缘控制器上实现进行复杂计算的 MPC，存在以下课题：

(a) CPU 性能和内存容量有限制，无法进行复杂的计算。

(b) 需在稳定的运算时间内每次完成计算。

为克服上述课题，边缘型 MPC 采用了离线事先计算优化增益的方式。

在计算优化增益时，指定工艺模型和控制规格，通过方程处理技术，使最佳增益，即满足控制规格的操作变化量区域可视化（**图 3**）。控制规格给出了目标值的偏差在预测地平线中如何收敛的条件和操作变化量的上下限限制。此外，通过准备多个备用工艺模型，对这些模型的优化增益进行可视化并重叠，也能设计可灵活应对模型变化的增益[4]。

3.2 在线控制技术

在线控制系统使用离线支援系统中事先设计的优化增益和工艺模型进行反馈控制。如**图 4** 所示，预测当前至规定时间之间的控制量变化，计算将当前目标值偏差校正为未来目标值偏差的校正偏差。计算校正偏差时，使用到当前时刻 t 之前观测到的操作量（MV）和可测量的外部干扰（DV）信息。另外，可在操作量（MV）中分别独立设置一个控制周期中的变化量上限和下限或操作量自身的上限和下限，从而可抑制操作量（MV）的急剧变化或限制动作范围。

将在线控制系统的功能作为符合 IEC 61131-3 标准的 FB（功能块）进行安装。IEC SC65B/WG7/TF3 1993 年制定了 IEC61131-3，日本于 1997 年将其标准化为 JIS B 3503。符合本标准的优点如下：

(a) 因可简单地与现有的控制程序资产相结合，可以提高开发效率。

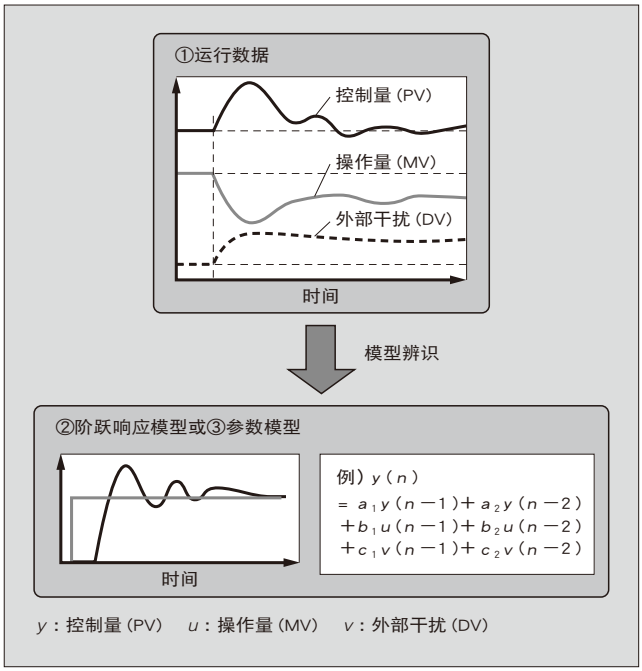

图 2　模型辨识技术

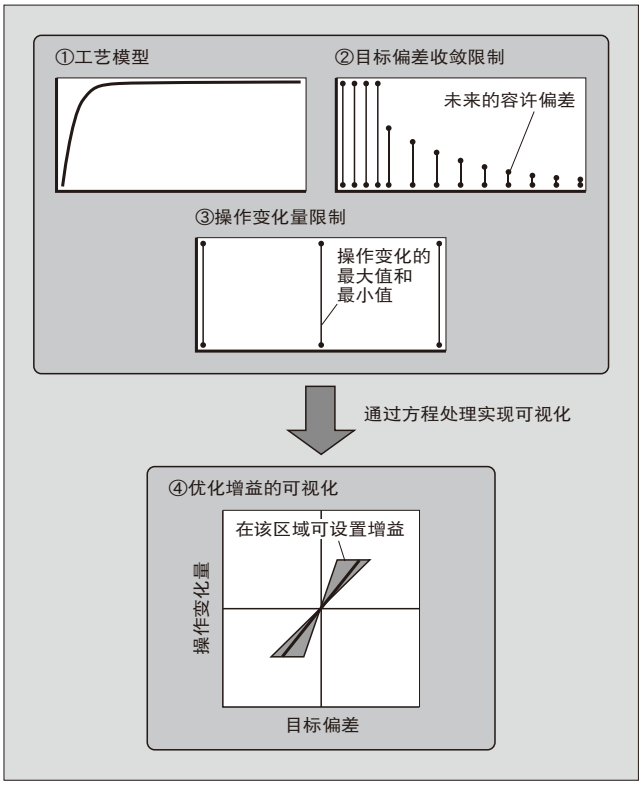

图 3　优化增益可视化技术

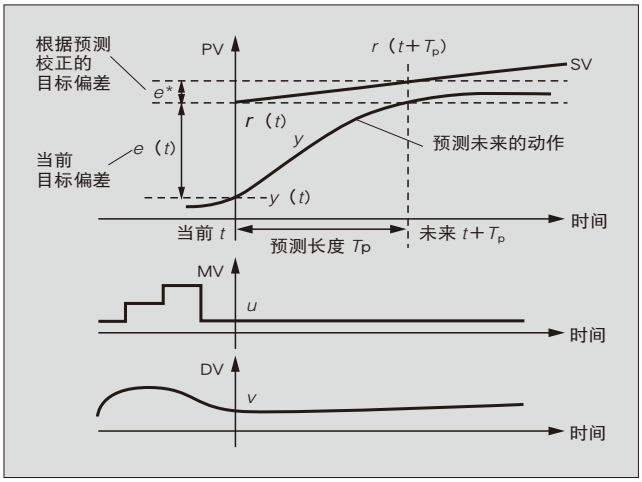

图 4　基于预测的校正

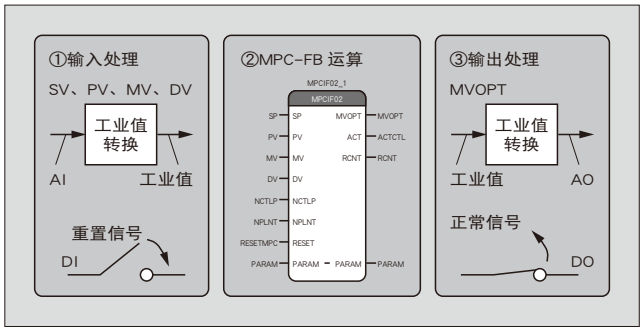

图 5　程序构成示例

(b)　可使用已经普及的 PLC 和 I/O 模块等硬件和 PLC 开发软件进行开发。

(c)　作为标准规格，可期待持续的兼容性。

所安装的 FB 可轻松地与各种通信程序和控制逻辑等符合现有 IEC 611131-3 标准的控制程序的资产进行联动。如**图 5** 所示，也可采取保持 IO 通信处理，将运算处理单元从 PID-FB 替换为 MPC-FB 的程序构成。

4　控制特点

4.1　系统构成的灵活性

边缘型 MPC 可安装于“MICREX-SX SPH3000”和“MICREX-VieW XX XCS-3000”。此外，它不仅可安装在新建系统的 PLC 和 DCS，如**图 6** 所示，还可以考虑将其安装在位于现有控制系统附近扩建面板上的 PLC 和 DCS 上进行联动。

同时，还可与其他公司制造的系统等难以改造程序的现有系统联动，进行数据交换（通信）。

4.2　控制性能的提高

如**图 4** 所示，边缘型 MPC 基于模型来预测未来的响应，并计算使目标值偏差收敛的操作量。基于未来响应的控制具有以下优点：

(a)　可考虑在时间常数长的工艺中不会立即出现的影响。

(b)　可应对 PID 控制并不擅长的浪费时间（从变更操作量到控制量开始变化所需的时间）的工艺。

(c)　可避免受到最新变动的过度影响，降低操作量的急剧变化。

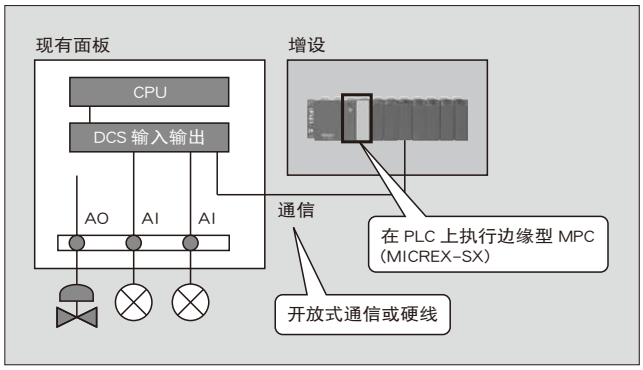

图 6　与其他公司控制系统的联动示例

另外，与基于优化运算的传统 MPC 相比，边缘型 MPC 具有以下优点：

(a)　可进行无时滞的响应。

(b)　因没有优化处理导致的重复运算，所以计算时间稳定，可以在一定的运算时间内执行。

(c)　因可进行包含离散操作量在内的预测，所以也可应对只能进行阀的全闭全开的开合操作[5]。

图 7 所示为边缘型的运算时间。例如，需在 100 ms 以内完成计算时，预测地平线可对应于 100 步（1 步相当于控制周期的长度），而需在 700 ms 以内完成计算时，预测地平线可对应于 300 步。

因此，在实际情况下，通过**图 7** 参考与预测地平线的步骤有关的边缘型 MPC 的运算时间，可在超过该时间的控制周期为数百 ms 至数 min 左右的工艺中适用（**图 8**）。

图 9 所示为化学反应堆构成示例。化学反应堆的反应温度需进行精密控制。为此，采用间歇式工艺时，需控制源于反应热的外部干扰影响。时间常数可能为数分钟至数小时，基于 MPC 的预测有效。边缘型 MPC 预测 300 分钟后的未来，当预测地平线为 300 步时，可在预测 300 分钟后未来的同时，以运算时间 700 ms 执行控制周期为 1 分钟的控制。

4.3　稳定性、维护性

因无需在控制器上解决优化问题，而每次的计算时间都保持稳定，因此边缘型 MPC 可保持固定的控制周期。如**图 5** 所示，在与 IO 处理、逻辑处理、操作员操作的处理等要求即时响应性的处理和联动时，这点非常重要。

为确保成套设备持续稳定地运用 10 年、20 年，富士电机在 PLC 和 DCS 中备置了以 24 小时运行为前提的高耐用性模块。此外，通过使用双重化功能等，可构建可靠性更高的系统。在此基础上，对控制器进行适当维护也很重要。

另外，MPC-FB 是支持 IEC 61131-3 标准的 FB，而该标准作为国际标准有很长时间实绩，所以在现有 PLC 更新时，也可支持软件资产的迁移。

5　设想情况下的性能研究

所示内容为通过数据辨识的工艺模型，并将边缘型

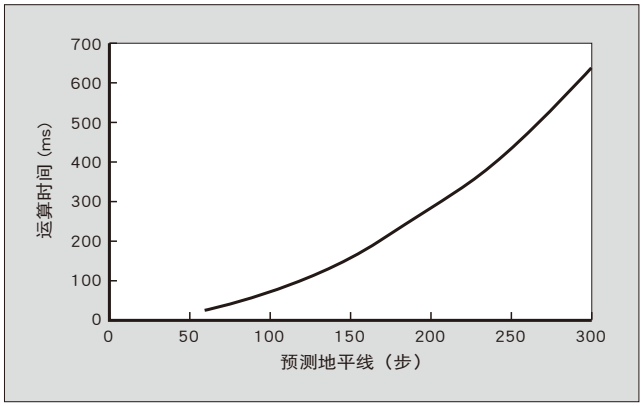

图 7　边缘型 MPC 计算所需时间例

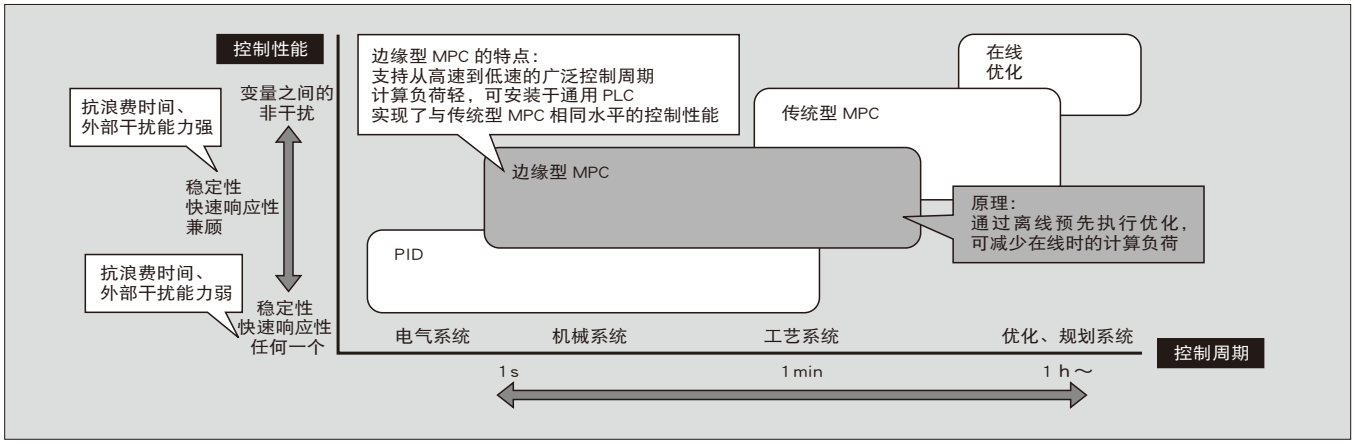

图 8　边缘型 MPC 应用范围

MPC 应用于追随一定目标值控制的情况。其目的在于利用如**图 10** 所示的反馈环路，针对外部干扰（DV），将控制量（PV）保持在一定的目标值（SV：Setting Value）。

MPC 事先辨识的工艺模型并不一定正确。因此，设想以下所示的两种情况，研究了对目标值的追随性。

(a)　基于正确模型设计时

(b)　基于与正确模型有误差的模型（误差模型）设计时。

图 11 所示为正确模型与误差模型的阶跃响应差异。

另外，将进行过基于贝特拉库法的参数调整（基于开环传递函数模型匹配的调整）的 PID 控制作为边缘型 MPC 的比较对象进行了设计。

图 12 所示为使用各情况下设计控制器时的外部干扰比较结果。无论是在基于**图 12** (a)正确模型进行设计的情况下，还是在基于**图 12** (b)误差模型进行设计的情况下，MPC 的外部干扰抑制性能均超过了 PID。也就是说，尽管存在一定

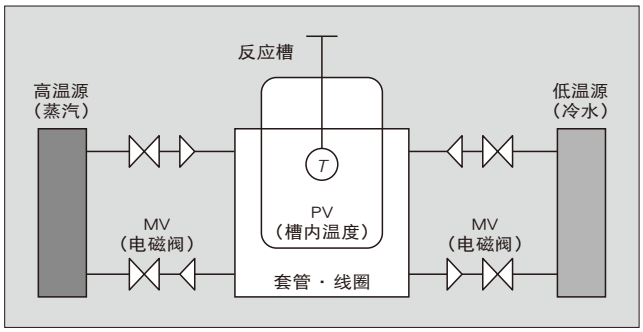

图 9　化学反应炉的构成

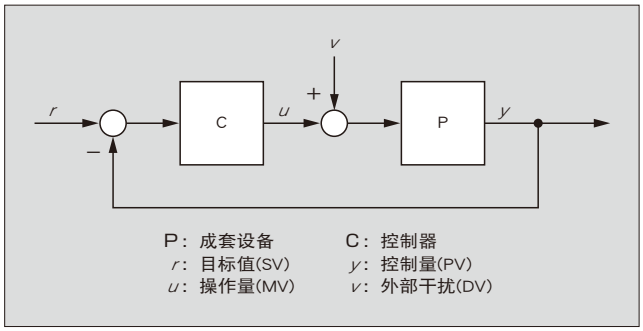

图 10　反馈环路例

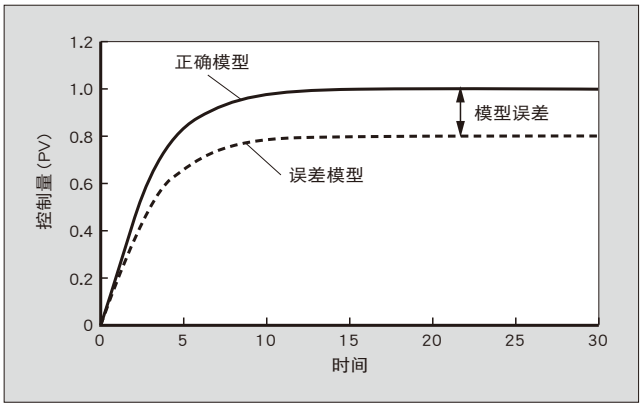

图 11　正确模型与误差模型的阶跃响应

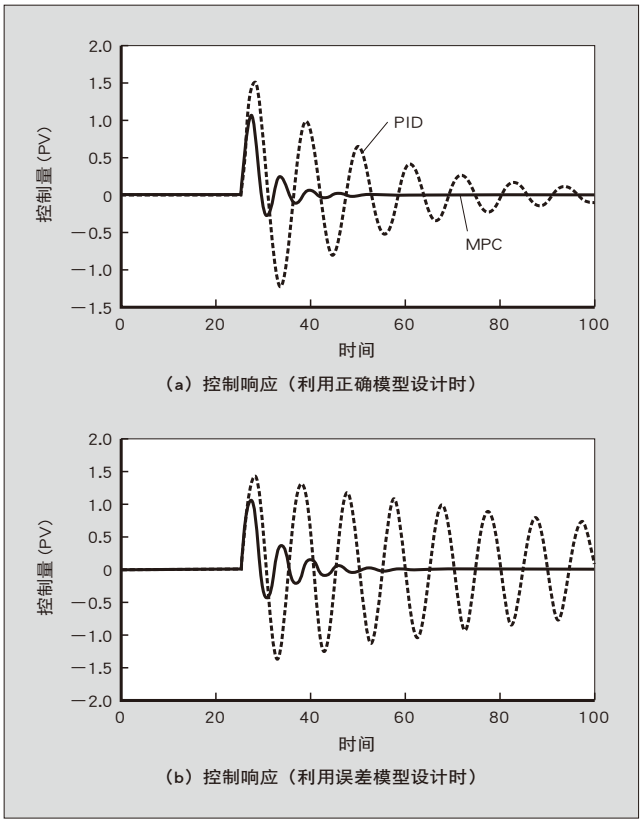

图 12　设想情况下的外部干扰响应比较

程度的模型误差，但边缘型 MPC 也可发挥充分的外部干扰抑制性能。

6 后记

本文对基于边缘控制器的模型预测控制进行了论述。与基于富士电机的标准贝特拉库法的 PID 控制相比，基于预测的控制有望大幅改善性能。预先通过离线进行基于运行数据的 MPC 用模型辨识和优化增益的可视化，可实现稳定、先进的在线控制。

可将 PLC 和 DCS 安装在现场的控制面板上使用，只需少量的设备改造即可引进。

今后，利用 IoT 技术实现成套设备操作的稳定化和先进化的需求将会不断增长。作为在富士电机控制器中实现先进控制的产品，边缘控制器有望在以化学工艺、医药品制造为首的要求高精度控制的领域得到广泛应用。

参考文献

⑴ 松井哲郎等. 支持 IoT 解决方案的数学应用技术. 富士电机技报. 2016, vol.C8, no.4, p.234-239.

⑵ 石井靖. 实现机械控制乃至高度动作控制的综合控制器“MICREX-SX 系列”. 富士电机技报. 2014, vol.C6, no.2, p.69-73.

⑶ 永塚一人等. 不断进化的监控系统“MICREX-VieW XX”. 富士电机技报. 2016, vol.C8, no.4, p.224-229.

⑷ 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.

⑸ 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

从事有关成套设备控制技术、EMS 技术、数理算法工业应用方面的研究开发。现为富士电机株式会社技术开发本部数字创新研究所 AI 解决方案中心 AI 研究部主任。测量自动控制学会会员、电气学会会员。

桐生　智志

从事有关数理算法工业应用方面的研究开发。现就职于富士电机株式会社技术开发本部数字创新研究所 AI 解决方案中心 AI 研究部。电气学会会员。

松井　哲郎

从事各种工业系统的优化、预测、诊断技术的研究开发。现为富士电机株式会社技术开发本部数字创新研究所 AI 解决方案中心 AI 研究部部长。电气学会会员、测量自动控制学会会员。

富士电机

Fuji Electric

＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。