博士論文の内容の要旨

論 文 題 目　　汎用・広範化を目指したプロセス制御
モデル駆動 PID 制御に関する研究

氏　名　　重政　隆

鉄鋼，石油化学，紙パ，窯業などの基礎素材を供給し，ものづくりを支えているプロセス産業は，1970 年代までは制御盤にアナログ指示計器や制御機器を配したパネル運転制御方式を採用していたが，1980 年代には PID（比例・積分・微分）制御を主として用いた分散型制御システム（DCS：Distributed Control System）と CRT（Cathode Ray Tube)を用いたオペレータインターフェースシステム（OIS：Operator Interface System)により集約管理して生産性を高め我が国の経済力を飛躍的に発展させた．バブルが崩壊した 1990 年代に入ると堅実な経済性を一段と追求するようになり，プラント全体の最適化技術とモデル予測制御技術の導入により効率向上が進められた. 表示器も CRT から液晶表示器(Liquid Crystal Display)に変わり，更に大型液晶表示器の出現により事業所内では運転管理の更なる効率化に向けて計器室・制御室の統合化が進められ高信頼化した DCS システムは大規模化され，結果としてオペレータやエンジニアが担当・管理する範囲が拡大化した．その結果，事故やトラブルを目にすることとなっている.

あらためて PID 制御に目を向けると，２つとか３つのパラメータを設定するだけで制御対象をほぼ最適に近く制御できる PID 制御の PID 演算そのものは汎用性があるが，広範な制御対象に対する P と I と D のパラメータの調整は必ずしも容易ではない．その結果，依然、オペレータの手動運転に頼らざるを得ないループがあったり，周期動揺がプロセスを伝搬・拡散していたり，変動幅が広がり，高効率・高品質運転が難しくなっている場合があった．これまでに膨大な PID 設計則が提案されており，必ずしも広範性を満たすものではなく，咀嚼には膨大な時間がかかる．2000 年に近づくと，これまでの発展を支えてきた団塊技術者が経験し積み上げてきた技術を次の世代に引き継ぐ技術継承が課題になった. その頃から管理範囲が拡大するにつれて，**現場応用を前提とした制御系設計調整の考え方が分かり易く，しかも技術移管しやすい汎用・広範化を目指したプロセス制御技術**が必要であると考えた．これを実現するために本論文で主張したのが下記[1]～[5]までの制御技術・方法である.

［1］ モデル駆動 PID 制御
［2］ ２自由度 PID 制御定数への変換

［3］ DCS で適用可能な多変数モデル駆動 PID 制御
［4］ PD ループのデータ駆動型調整法（FRIT : Fictitious Reference Iterative Tuning）とその応用
［5］ プロセス特性の３D 表示

KKD(勘，経験，度胸)やローカル・ルールの口伝ではなく，これらを通じて現場支援には高性能化してきた PC の能力を活用した客観情報をベースにする管理が期待される．

以下に学位論文の各章の概要と論文構成を示した．

第１章では，本研究の背景としてプロセス産業の制御システムの変遷、従来研究・技術とその課題，本研究で主張する方法(前記５項目)を列挙した．
第２章では，第１の主張である汎用・広範化を目指したプロセス制御方式であるモデル駆動（MD : Model Driven）PID 制御の構成，新しい設計法，特徴をまとめた．
このモデル駆動 PID 制御は，目標値追従応答と外乱抑制応答の双方に良好に調整できる２自由度 IMC（Internal Model Control）を上位に，下位に PD フィードバック系を配置したカスケード制御構造である．ヒントは， Shinskey 氏の PID τ d 制御器であり，本質は Morari 等の提案した IMC（Internal Model Control : 内部モデル制御)であるが，広範性・汎用性に課題がある．この課題には直ちに北森先生の I-PD 制御で既知の PD 補償で解決できる見通しが得られた．ポイントは，制御対象を含む PD フィードバック系の動特性が，むだ時間を持つ１次遅れ系の動特性を持つように調整することである．これにより制御器に広範性と汎用性を実現することができる．制御器に制御対象の動特性モデルを内蔵することによりほとんど調整の不要な制御系を構築することができることを強調して 2000 年 12 月に IEEE の CDC（Conference on Decision and Control）シドニー大会で木村が提案したのが“モデル駆動（Model Driven）制御”の概念である．PD フィードバック系の等価むだ時間を持つ１次遅れ系モデルを内蔵しているのでモデル駆動（MD）PID 制御と名付けた．この制御系でのポイントは，PD 補償器により PD フィードバックループの動特性がむだ時間を持つ１次遅れ系になるように設計されなければならない点であるが部分的モデルマッチングにより得られる設計パラメータに関する非線形方程式を求解することにより得られる．上位に２自由度 IMC（Internal Model Control)であり内部モデルは下位の PD フィードバックループの等価なむだ時間を持つ１次遅れ系であるので，制御系の目標値応答はむだ時間を持つ１次遅れ系で表現できるなど応答波形がイメージできるのも特徴の一つである．数値例では，産業界の現場で見られそうな多様な広範な動特性モデルに対して良好に設計されることを確認した．

第３章では第２の主張である MD-PID 制御を参照して２自由度 PID 制御系への変換・設計

方法をまとめた．

モデル駆動 PID 制御は, 一部の DCS で適用可能であるものの産業界のプロセス制御の現場で現状，多く使われている DCS では通常の PID 制御である．そこでこの PID 制御と遊離してはならないので, モデル駆動 PID 制御系の設計結果を参照して Taylor 展開と感度関数比較により 2 自由度 PID 制御系への設計方法を提案した．産業界で見られそうな多様な広範な動特性モデルに対して良好に設計されることを確認した．なお変換された 2 自由度 PID 制御の PID 定数は I-PD 制御に適用できる．

第 4 章では, 第 3 の主張である MD-PID 制御を応用した多変数 MD-PID 制御系の構成方法とその特徴をまとめた．

期待されて導入された大規模なモデル予測制御技術に対してモデルの保守コストがかかることや制御周期が分オーダーであることで短周期外乱への対応力が弱いなどの課題が挙げられた．これらの課題を解決するために，現場のニーズを反映した DCS レベルで小規模系から大規模系にシステム拡大可能な多変数モデル駆動 PID 制御系の構成方法を提案した．この制御方法は，操作量の飽和対策処理や現場での手動介入操作が容易に行える性質を持っている逆非干渉化器（Inverted Decoupling）を用いており制御周期が秒オーダーである DCS 向きである．この逆非干渉化器により多入力多出力の制御対象が非干渉化された制御対象に変換されるので，この非干渉化された制御対象に対してモデル駆動 PID 制御を設計するというアプローチである．適用にあたって，Bristol 氏が提案した RGA（Relative Gain Allay）に基づいて，非干渉化すべきかの判断やどの操作信号とどの制御信号を組合せたら良いかという，いわゆるペアリング（Pairing）の指針や逆非干渉化器が満たすべき実行可能条件を示すとともに，設計モデルと実モデル間の動特性の誤差による制御系の安定性問題、いわゆるロバスト性についても言及し，制御対象のゲイン行列の条件数が重要であることを示した．数値例では、逆非干渉化器は飽和時や手動介入時には当該操作端のみ働く構造になっているので稼働率の高い多変数制御系であることと PD フィードバックが当該ループの特性改善に働くことなど現実的に有効な多変数制御対策であることが確認された．

第 5 章では，第 4 の主張である制御系のステップ応答試験時の操作信号と制御信号のデータから PD フィードバック系がむだ時間を持つ 1 次遅れ系になるように FRIT(Fictitious Reference Iterative Tuning)法で調整し，その結果からの MD-PID 制御と 2 自由度 PID 制御系への設計法をまとめた．

モデル駆動 PID 制御はモデルベースでの制御方式であるが，そのモデル構築は現場的にとっては必ずしも容易な仕事ではないのでこの作業が軽減できることが望ましい，そこで近年注目されているデータ駆動調整（Data Driven Tuning）方式の一つで自然な構造の FRIT を適用することを考えた．モデル化を経ずに操作信号と制御信号から効率よくモデル駆動 PID 制御系や既存の 2 自由度 PID 制御系の調整方法をも見出すことができた．ポイン

トとなるのは, 制御系のステップ応答試験時の操作信号と制御信号データから PD フィードバックループの応答と等価むだ時間を持つ１次遅れ系の応答が一致するように FRIT により非線形最適化アルゴリズムの CMA-ES(Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy） により収束させる方法を用いた．制御対象のモデルについても副産物として得られることについても言及した.

第６章では第５の主張であるプロセス特性の３D 表示とその応用をまとめた.

実は産業界の現場では周波数特性を評価する余裕はほとんどないのが実態であるが，周波数領域での解析も重要な情報を発信していることを示すために提案したものである.

すなわち，安定性を示すナイキスト軌跡上に各感度関数をカーテン上に３D 表示することにより，安定度の悪い制御系では感度関数が大きなピークを持つので制御系の安定度の悪さを表現する逼迫性が増すということを示した.

第７章ではモデル駆動 PID 制御の産業プロセスでの応用例をまとめた.

具体的には，むだ時間があり積分性の動特性であるために現場で自動化できてなく手動運転が余儀なくされていたプロセスや，周期動揺が発生し変動幅が大きかった微粉炭炊きボイラなどの，いずれもむだ時間が本質的に存在する産業プロセスでの適用例が多かった. また FRIT の適用事例も紹介した.

第８章では，結言と課題をまとめた.

付録 A では，この分野に足を染めた最初の仕事である２自由度オートチューニングコントローラの概要をまとめた.

付録 B では，データから制御性能の客観的定量情報を抽出するために開発した制御性能解析ツールのポイントをまとめた.

付録 C では，開発した MD-PID Control system Design Tool をまとめた．ここでは産業界の現場で想定される多様な制御対象に対する設計事例も紹介している.

付録 D では，試作した連続時間モデルと FRIT で用いた非線形最適化アルゴリズムである CMA-ES を組合せて構成したモデル化ツールをまとめた.

付録 E では，試作した PD-FRIT の MATLAB プログラムをまとめた.

付録 F では，著者の本研究に直接関連する論文をまとめた．付録 G では，著者のその他の論文をまとめた.

以上