

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.25・第1回世話人会議事録

1. 日 時： 2002年2月7日(木) 13:00～17:00
2. 場 所： 東芝 本社 22階 22A08 会議室
(東京都港区芝浦 1-1-1 (東芝ビルディング))
3. 出席者： 4名(順不同)
加納学(京都大学), 山下善之(東北大学), 重政隆(東芝), 西澤淳(三菱化学)

4. 内 容

4-1. 報告事項

参加申込者は大学8名+企業14名。今後も参加申込は受け付ける。

4-2. 今後の活動について

まず、各社におけるプロセス制御関連の問題をできるだけ具体的に抽出する。また、現在の理論や技術を参加者に紹介すると同時に、各社での性能監視への取り組み、異常対応や制御性能改善の方法、さらに膨大な制御ループの優先順位についての考え方などを紹介してもらい、WSの方向性を定める。

1) アンケートの実施(加納)

アンケートを実施し、第1回会合にて集計結果について説明する。数回の研究会を開いた後、参加者が理論・技術の現状について共通認識を持った段階で、より詳細なアンケートを実施する。

2) 評価・検証用データ(実プラント運転データ)の用意(西澤)

エチレンプラントが候補。運転状態や制御性能に変化が生じている運転データを用意する方向で、三菱化学にて社内調整していただく。運転状態が変化した原因が既知である運転データが望ましい。

3) 評価・検証用データ(シミュレーション)の作成(加納)

HYSYSのダイナミックシミュレーションを利用する。簡単なプロセスを対象とする。

4) 第1, 2回会合の内容

第1回: 最小分散制御をベンチマークとする手法と制御性能監視の現状についての解説(加納)
アンケート集計結果の説明

第2回: 三菱化学での取り組みと課題(西澤)

アンケート結果をふまえて企業側参加者に講演依頼(数件)

5) 検討すべき内容について

- ・対象プロセスや制御目的に応じた性能監視を行う必要がある。
- ・望ましくない運転状態になったときにその原因を知ることが大切である。(評価だけではダメ)
- ・制御性能が悪いと判断されたときの対応(再調整, モデル再同定の必要性判断など)についても検討すべきである。
- ・個々の制御ループの制御性能を最大限に高めることがプラント運転の目的ではない。プラント全体として最高の性能を実現するための評価・監視手法やボトルネック究明方法, 制御ループに優先順位を付ける合理的な方法が必要である。プラントワイド制御性能監視とでも呼ぶべきもの。

4-3. その他

- 1) メールリストを立ち上げる。
- 2) WSのホームページにて資料(論文リストやリンク)を充実させる。
- 3) 第1回研究会にて, WSでの成果の取り扱い(特許取得)について議論する。

[予定]

第1回研究会 4月18日(木) 東芝本社(東京都港区芝浦 1-1-1 (東芝ビルディング))

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.25・第1回研究会議事録

1. 日 時： 2002年4月18日(木) 13:00~17:15 (研究会)
17:15~19:00 (懇親会)

2. 場 所： 東芝 本社 39階 3914会議室
(東京都港区芝浦 1-1-1(東芝ビルディング))

3. 出席者：21名(順不同, 出席, 欠席)

<大学> 加納学(京都大学) 山下善之(東北大学) 大嶋正裕(京都大学) 柘植義文(九州大学) 山本重彦(工学院大学) 大野弘(神戸大学) 橋本芳宏(名古屋工業大学) 黒岡武俊(奈良先端科学技術大学院大学)

<企業> 重政隆(東芝ITコントロール) 西澤淳(三菱化学) 栗原久光(出光興産) 喰田秀樹(出光石油化学) 樋口文孝(出光石油化学) 宮川基彦(インベシスシステムス) 大宮司理晴(ジャパンエナジー) 白川義之(ジャパンエナジー) 滝波明敏(昭和電工) 久下本秀和(住友化学工業) 清水佳子(東芝) 行友雅徳(東芝) 村田尚(東洋エンジニアリング) 松尾徹(三井化学) 松尾文晴(三井化学) 清水雅嗣(横河電機)

4. 内 容

4-1. 参加者紹介

4-2. アンケート結果の報告とディスカッション

参加目的, 取り組み状況, 対象としたい制御方式・プロセス, 適用結果への期待, 興味のあるテーマ, 希望する内容, 運転データ提供の可否, 話題提供の可否について, アンケート結果の報告があった。その結果に基づいて, 今後の方針について議論した。

【意見】

加納：検討対象とする制御方式として, PID制御とモデル予測制御を挙げた人が多かった。

清水(佳)：MPCの性能評価を行う場合, 制約条件があるために取り扱いが困難になるのではないかと。

松尾(徹)：MPC適用時に下位PID制御ループが悪いために全体としても悪くなることもある。PID制御を調整するための明確な目標, システムティックな評価・調整方法が必要である。プラントの動特性がわかれば良いが, ステップ応答を取れない場合もある。閉ループ同定が必要。

西澤：経験で上手に調整できるエンジニアもいる。必要であればステップ応答テストを実施する。

久下本：トラブル発生時に運転員がパラメータを変更したまま元の設定に戻さないことがある。ステップ応答を取る場合でも, むだ時間の同定が難しいために調整がうまくいかない場合がある。

白川：定値制御であれば, 偏差を監視するだけで十分ではないのか。この場合, 制御系導入時の性能を基準に評価するため, 導入時の性能評価が大切である。

滝波：現場から制御が良くないという指摘が来たら対応するため, ~10年は再調整しないループも多い。PID制御であれば, ハンチングしているときぐらいしか注意を向けない。MPCであれば, 未知外乱の影響は考慮せず, 実測値と予測値のずれで評価する。

喰田：振れが大きくなると運転員がオフにする。外乱が原因か, チューニングが原因かを見極めたい。

清水(佳)：計測器の故障に気付かず, 制御システムを変更した例を知っている。プロセスの特性変化なのか, コントローラ側の問題なのかを見極める必要がある。

重政：プロセスモニタリングまでを検討対象とするべきか。

加納：制御性能監視は制御系全体が正常であることを前提として制御性能を評価している。このため, 制御系全体が正常であることを保証しておく必要がある。

久下本：バルブのスティッキングが多いが, これはデータをよく見ればわかる。

橋本：フィルムの制御では, 操作量の上下制限約を変化させて制御を行い, そのときの振幅の変化から,

外乱が原因かコントローラが原因かを調べている。

山本：プラント全体の最適と個別ループの最適とは異なる。個別ループでも、均流液面制御のように、厳しく制御してはいけない場合もある。

久下本：全体としての制御性能を評価するための指標はあるのか。また、モデル予測制御を導入する必要性の有無を判断したい。

松尾(徹)：結局は経済性の評価となる。6 のように、分散を小さくするのが良いのではないか。

滝波：エチレンプラントでは製品品質の分散を抑えることが重要である。分散が小さくなれば、余裕を小さくできるため、結果としてコストを削減できる。

山本：製紙プロセスも同様であるが、経済性を評価しやすい。一般的に、化学プロセスは制御性能と経済性を結び付けるのが困難なのではないか。

加納：閉ループ同定を取り上げるべきか。現在、直接法、間接法、入出力結合法が提案されている。

喰田：数回設定値変更を行い、間接法を適用することで、閉ループ同定には成功している。直接法はダメで、入出力結合法は実際に利用するのが難しい。閉ループ同定は制御性能評価後に必要になる作業であるため、まずは制御性能評価に取り組むべき。

清水：理屈ではここまでできるという性能限界を明確にするのが先決である。

4-3. 勉強会：「最小分散制御を規範とする制御性能監視」 加納学（京都大学）

1入力1出力線形系の制御性能評価手法として、最小分散制御によって実現できる制御量の分散をベンチマークとする方法についての解説があった。

【質疑応答】

山本：実プラントに白色雑音が入力されているわけではないが、時系列データ解析を適用すれば、制御量の時系列データを生成する白色雑音系列と時系列モデルが決定できるということか。

加納：その通り。

橋本：ステップ状などの決定論的な外乱には対応できるのか。

加納：白色雑音の分布関数として正規分布などとは異なる特殊な関数を利用し、かつ適切なARIMAモデルを用いれば、ステップ状やランプ状などの決定論的な外乱にも対応できる。

橋本：高次遅れとむだ時間をどのように区別するのか。プロセスゲインが小さい部分で完全な制御を仮定するのはおかしい。この方法は現実から離れてしまっているのではないか。

西澤：最小分散をベンチマークとする方法の問題点は、むだ時間を同定するのが難しいことである。むだ時間が正しく同定できるなら使える。

4-4. 懇親会

研究会終了後、東芝本社食堂にて懇親会を開催した。参加者は17名。

5. 配付資料

1) WS25「制御性能監視」アンケート結果

2) 最小分散制御を規範とする制御性能監視 SISO系の定値制御

[予定]

第2回研究会 6月21日(金) 13:00~17:00 京都大学

1) 制御性能監視事例紹介 西澤(三菱化学)

2) 勉強会 加納(京都大学)

3) その他

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.25・第2回研究会議事録

1. 日 時： 2002年6月21日(金) 13:00~17:00

2. 場 所： 京都大学大学院工学研究科化学工学専攻 演習室
(京都市左京区吉田本町 京都大学工学部4号館4階西側)

3. 出席者：19名(順不同, 出席, 欠席)

<大学> 加納学(京都大学) 山下善之(東北大学) 大嶋正裕(京都大学) 柘植義文(九州大学) 山本重彦(工学院大学) 大野弘(神戸大学) 橋本芳宏(名古屋工業大学) 黒岡武俊(奈良先端科学技術大学院大学)

<企業> 重政隆(東芝ITコントロール) 西澤淳(三菱化学) 栗原久光(出光興産) 喰田秀樹(出光石油化学) 樋口文孝(出光石油化学) 宮川基彦(インベンスシステムス) 大宮司理晴(ジャパンエナジー) 白川義之(ジャパンエナジー) 滝波明敏(昭和電工) 久下本秀和(住友化学工業) 清水佳子(東芝) 行友雅徳(東芝) 村田尚(東洋エンジニアリング) 松尾徹(三井化学) 松尾文晴(三井化学) 清水雅嗣(横河電機)[代理:末吉一雄] 橋本祐樹(三菱化学)

4. 内 容

4-1. 事例紹介:「三菱化学の制御性能監視に対する取り組み」 西澤淳氏(三菱化学)

制御性能監視についての検討を進めるに至った背景,従来の最小分散制御に基づく評価手法の問題点についての説明の後,実用性を重視した制御性能監視指標として,プロセスアラーム件数,オペレータ操作頻度,ゆとり時間,サービスファクター,PIDマップ,制御性指標 C_e ,操作性指標 C_u , C_e - C_u 散布図,制御性能監視指標 C_p についての具体的な説明があった.さらに,自社開発されたソフトウェアのデモが行われ,上記各指標の表示画面が示されると共に,モデリングツールとPIDチューニングツールの紹介があった.

【議論概要】

- 温度,流量,圧力,レベル,分析値ごとにPIDパラメータの推奨範囲を提示している.特に,プラント毎に個性があるとは思われない.ただし,基幹プラントはより良くメンテナンスされている.
- プラント安定化(制御ループ改善)活動は,DMCの導入によって促進されたというよりも,TPM活動の中で積極的に取り組まれた.
- 性能監視指標が劣化したときにオペレータに自動的に知らせるような仕組みにはなっていない.また,オペレータが積極的に指標を見ることもない.性能監視指標は絶対的な評価を行うためのものではなく,あくまでも相対的な評価を行うために利用している.
- 開発したモデリングツールはSISO系を対象としており,多変数系の同定にはDMIなどを使う.モデルとしてはできるだけ簡単なモデルを採用する.
- PIDチューニングツールで必ずしもうまくいくとは限らず,現場での調整が必要になる場合もある.PID調整に関しては,オペレータが行う場合,計装エンジニアが行う場合など様々である.なお,ツール内でモデル誤差を考慮したシミュレーションも実施可能である.また,オペレータの教育用としても,開発したツールは有効である.
- 現在のところ,プラント全体を考慮した制御性能評価には至っていない.また,干渉を考慮できるようにもなっていない.

4-2. 事例紹介:「多変数モデル予測制御性能監視」 橋本祐樹氏(三菱化学)

制御性能監視ワークフローと多変数モデル予測制御(DMC)の制御構成についての解説の後,多変数制御性能指標として,最小分散ベンチマーク,閉ループ整定時間を指定する方法,目的関数ベンチマーク,ヒストリカルベンチマークが紹介され,蒸留塔制御への適用事例が紹介された.

【議論概要】

- ・ 高ロードおよび低ロード時に制御性能が悪くなっており、さらに予測誤差も大きくなっている。この原因としては、モデル誤差の拡大と外乱の拡大が考えられる。いずれが真の原因かについては未検討である。なお、低ロード時に制御性能が悪くなる一因として、操作量が制約条件にかかることが挙げられる。

4-3. 報告：“How well is your controller performing: Good, Bad or Optimal?”

- A) 概要説明 加納（京都大学）
- B) Performance assessment of feedback controllers 清水氏（東芝）
- C) Practical issues in control loop performance assessment 清水氏（東芝）
- D) Detection and diagnosis of process and/or actuator nonlinearities 久下本氏（住友化学）

6月9日に熊本で開催された制御性能監視に関するワークショップの概要説明の後、個別テーマについての報告があった。まず、清水氏より、制御量の変動と操作量の変動とを同時に考慮するLQG型ベンチマークを用いる性能評価指標についての説明があり、MPCの制御性能評価への適用事例が紹介された。続いて、清水氏より、最小分散制御をベンチマークとする性能評価手法のBP Amoco社の製油プロセスへの実施例が報告され、実用上の問題点が指摘された。また、スペクトル解析を用いて、バルブ不感帯などの非線形性を検出する方法や振動原因を特定する方法が説明された。さらに、久下本氏より、高次（3次）統計量を用いてプロセスに内在する非線形性を検出する方法について、シミュレーション結果を交えながら具体的な説明があった。

【議論概要】

- ・ LQGのパラメータを変化させることにより、1つの曲線を描くことができる。ただし、外乱の大きさが変化すれば曲線の位置も変化するため、事前に適切なスケールリングを行う必要がある。また、パレート最適であるため、プロット図に基づいて最終的な判断を下せるとは限らない。
- ・ 一般に、サンプリング周期を短くしすぎると高周波成分の影響を強く受けるため、適切なサンプリング周期を選択する必要があるとされる。性能評価のためのサンプリング周期を実際の制御周期よりも長くすることに問題はないか？
- ・ むだ時間に幅を持たせて最小分散制御基準の監視指標(Harris Index)をプロットすることにより、持続振動やオフセットの存在を確認できる。
- ・ 高次統計量を用いてすべての非線形性を捉えられるかどうかは不明である。また、リミットサイクルに至らない程度のバルブスティックを検出できるかどうかについては、その可能性はある。

4-4. 今後の方針について

1) 最小分散制御を基準とする評価手法, 2) LQGを基準とする評価手法, 3) 閉ループインパルス応答に基づく評価手法, 4) スペクトル解析および高次統計量を用いて非線形性を検出する方法について、実際にシミュレーションデータを用いて検討する。次回研究会にて、検討結果を報告する。

5. 配付資料

- 1) 三菱化学の制御性能監視に対する取り組み
- 2) 多変数モデル予測制御性能監視
- 3) ワークショップ参加報告
- 4) Path Analysis for Process Troubleshooting

[予定]

第3回研究会 8月30日(金) 13:00~17:00 東京(三菱化学)

- 1) 報告会(続編) 松尾氏(三井化学), 加納(京都大学)
- 2) 事例紹介 松尾氏(三井化学)
- 3) 検討結果報告会 (内容および講演者は後日相談)
- 4) その他

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.25・第3回研究会議事録

1. 日 時： 2002年8月30日(金) 13:00~17:00

2. 場 所： 三菱化学本社 9階A-10会議室
(東京丸の内 三菱ビル)

3. 出席者：18名(順不同, 出席, 欠席)

<大学> 加納学(京都大学) 山下善之(東北大学) 大嶋正裕(京都大学) 柘植義文(九州大学) 山本重彦(工学院大学) 大野弘(神戸大学) 橋本芳宏(名古屋工業大学) 黒岡武俊(奈良先端科学技術大学院大学)

<企業> 重政隆(東芝ITコントロール) 西澤淳(三菱化学) 栗原久光(出光興産) 喰田秀樹(出光石油化学) 樋口文孝(出光石油化学) 宮川基彦(インベンスシステムス) 大宮司理晴(ジャパンエナジー) 白川義之(ジャパンエナジー) 滝波明敏(昭和電工) 久下本秀和(住友化学工業) 清水佳子(東芝) 行友雅徳(東芝) 村田尚(東洋エンジニアリング) 松尾徹(三井化学) 松尾文晴(三井化学) 清水雅嗣(横河電機)

4. 内 容

4-1. 報告：“How well is your controller performing: Good, Bad or Optimal?”

E) Detection and diagnosis of plant with disturbances 松尾徹氏(三井化学)

6月9日に熊本で開催された制御性能監視に関するワークショップの報告(第2回研究会の続き)があった。運転データに高速フーリエ変換(FFT)を適用して得られるパワースペクトルを利用して、振動の原因を突き止める手法についての説明があった。そのための定量的な指標として、Distortion Factorなどが紹介された。変数をいくつかのグループに分類するために、スペクトルデータに主成分分析(PCA)を適用する方法が紹介された。これにより、特定の周波数成分をもつ変数ごとにグループ化される。また、サロゲイト法を利用してスペクトルデータから運転データを復元することにより、プロセスの非線形性を評価する手法についての説明があった。

【議論概要】

- ・ 振動の原因となっている変数が見付かった後の処置については、ワークショップでは特に説明はなかった。現実には対策を講ずることが重要であり、原因発見後の処理について検討する必要がある。
- ・ PCAによって変数の分類を行う際に、ワークショップの例では第3主成分までを採用している。これは、第3主成分までの累積寄与率が90%以上となるためである。なお、各主成分に物理的意味を見出すことは困難である。
- ・ サロゲイト法は1990年代はじめには既に提案されている手法であり、一般的な手法である。

4-2. 事例紹介：“Application of wavelet analysis to chemical process diagnosis” 松尾徹氏(三井化学)

ウェーブレット解析を用いてプロセス診断を行う方法、およびその手法の実プラントへの適用事例が紹介された。解析ツールは山武製ソフトウェアである。まず、ウェーブレット解析による信号特徴の定量化方法についての説明があった。そのための定量的な指標として、時間-周波数領域における類似度が提案された。さらに、類似度を利用して、プロセスのむだ時間を同定する方法についての説明があった。類似度の適用事例として、重合反応プロセスの製品品質に最も影響を与えるプロセス変数を見付け出すという例が紹介された。また、フィードバック制御下で、類似度を利用してむだ時間を同定した事例についても紹介があった。

【議論概要】

- ・ ウェーブレット解析に用いたのはガボール関数である。複数のウェーブレットを用いた結果を比較検討したところ、ガボール関数による結果が最も良かったためである。

- ・ フィードバック制御下でむだ時間同定を行っているが、本当にむだ時間を同定できているのかについて、さらに検討する必要がある。シミュレーションでは設定値変更を行っているため、フィードバック制御下でのむだ時間同定は可能と考えられるが、設定値変更を行っていない実プラントにおいては、むだ時間が同定できているかどうか疑問である。
- ・ 類似度は相互相関のようなものであるから、操作変数から制御変数への因果関係（プロセス）と制御変数から操作変数への因果関係（コントローラ）の特徴が共に抽出されるはずである。むだ時間だけでなくした点のみで、類似度が最大となるのはなぜか。
- ・ 理論的には、作為的に選択した周波数領域の類似度に基づいて、正確にむだ時間を同定することはできない。実際には、入出力の不連続点を見付け出し、その時間差を実時間軸（最も周波数が高い領域）で評価しなければならない。この作業は非常に複雑であるため、ある周波数領域での時間差によって実時間軸上の時間差が近似できるという仮定が成り立つなら、提案法は有効であろう。

4-3. 報告：“How well is your controller performing: Good, Bad or Optimal?”

F) Path Analysis for Process Troubleshooting 加納学（京都大学）

制御性能監視に関するワークショップ報告会の続き（最後）。サンプル数が無限大になれば、最小二乗法によって線形システムのパラメータの真値を推定できるという性質を利用して、変数間の因果関係を調べる方法についての説明があった。いくつかの例題について、最小二乗法と部分的最小二乗法（PLS）との比較も示された。PLSによる推定値は、そのノルムが小さく、サンプル数が少ない場合でも非常に安定している。ところが、最小二乗法による推定値の分散は、サンプル数が少ないと非常に大きくなってしまふ。ただし、サンプル数を増やすと、その推定値は真値に漸近する。

【議論概要】

- ・ サンプル数を増やすと、最小二乗推定値が真値に漸近するという性質は簡単に証明できる。
- ・ 1) 非線形プロセスへの適用, 2) 動的モデルへの適用, 3) 入力に測定ノイズがある場合, などについては未検討であるため, 簡単なシミュレーションを行って検討する。

4-4. 今後の方針について

勉強会形式で参加者全員のレベルアップを目指すとともに, 1) 最小分散制御を基準とする評価手法, 2) LQGを基準とする評価手法, 3) 閉ループインパルス応答に基づく評価手法, 4) スペクトル解析および高次統計量を用いて非線形性を検出する方法について, 検討を進める。次回研究会にて, 1), 2) の検討結果を報告する。

5. 配付資料

1) Path Analysis

[予定]

第4回研究会 11月1日(金) 13:00~17:00 名古屋工業大学(名古屋)

- 1) 勉強会:「閉ループ同定」 加納学(京都大学)
- 2) 検討結果報告会(内容および講演者は後日相談)
- 3) その他

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.25・第4回研究会議事録

1. 日 時： 2002年11月1日(金) 13:00~17:00
17:30~20:00 (懇親会)

2. 場 所： 名古屋工業大学 2号館6階611室
(名古屋市昭和区御器所町)

3. 出席者：17名(順不同, 出席, 欠席)

<大学> 加納学(京都大学) 山下善之(東北大学) 大嶋正裕(京都大学) 柘植義文(九州大学) 山本重彦(工学院大学) 大野弘(神戸大学) 橋本芳宏(名古屋工業大学) 黒岡武俊(奈良先端科学技術大学院大学)

<企業> 重政隆(東芝ITコントロール) 西澤淳(三菱化学) 栗原久光(出光興産) 喰田秀樹(出光石油化学) 樋口文孝(出光石油化学) 宮川基彦(インベシスシステムス) 大宮司理晴(ジャパンエナジー) 白川義之(ジャパンエナジー) 滝波明敏(昭和電工) 久下本秀和(住友化学工業) 清水佳子(東芝) 行友雅徳(東芝) 村田尚(東洋エンジニアリング) 松尾徹(三井化学) 松尾文晴(三井化学) 清水雅嗣(横河電機)

4. 内 容

4-1. 検討結果報告：「最小分散制御をベンチマークとする手法」

喰田秀樹氏(出光石油化学), 樋口文孝氏(出光興産), 栗原久光氏(出光興産) 熱交換器の温度制御ループ, 蒸留塔の塔内温度制御ループ, 反応器の製品性状(ガスクロ分析値)制御ループという3種類の実プラントにおける制御ループについて, 最小分散制御をベンチマークとする制御性能評価指標である Harris Index を算出した結果が報告された. チューニング前後での評価指標が比較され, チューニングによる制御性能の改善度合いを定量的に把握できることが示された. また, むだ時間, 白色化フィルタ次数, さらに外乱特性が計算結果に及ぼす影響についての検討結果について説明があった.

【議論概要】

- ・ PID 制御のチューニングには CHR 法を利用した. なお, ケース1, 2のプロセス時定数はそれぞれ5分および1時間程度である.
- ・ ケース2では, MPC 適用前後の制御性能を比較している.
- ・ 今回の検討では ARMA モデルの次数を3次としたが, AIC などの指標を利用して自動的に決定することもできる. 自動的に次数を決定するよう, 開発中のソフトウェアを改良する.
- ・ 現場的に(実用上)十分な制御性能であるか否かを判断する方法として, 現場では, ステップ状の設定変更や外乱に対する応答を見る.
- ・ 様々な制御ループの現場での満足度を調査し, その結果と Harris Index などの制御性能評価指標とを結び付けることはできないか.
- ・ プロセスの特性だけでなく, ヒステリシスなども含むアクチュエータの特性によっても到達可能な Harris Index の値は変化する. このことを指標に取り込めないか.

4-2. 検討結果報告：「最小分散制御をベンチマークとする手法」

丸田浩氏(京都大学), 加納学(京都大学) 最小分散制御をベンチマークとする手法についての簡単な復習の後, むだ時間が正確には特定できていない場合に用いる指標曲線についての説明があった. また, 様々なプロセスとコントローラを用いて制御シミュレーションを行い, 指標曲線を描いた結果が報告され, その指標曲線の特徴とインパルス応答係数との関連づけが行われた.

【議論概要】

- ・ 様々な PID 調整則による Harris Index の違いを確認するため、さらに検討を続ける。
- ・ P, PI, PID 制御の比較を行っているが、今回の検討ではゲインのみを変化させている。すべての制御パラメータを適切に調整した上での比較結果を示す必要がある。
- ・ チューニング前後の Harris Index の改善度合いと満足度とを関係づけられないか。
- ・ 様々な特性を持つプロセスを対象として、Harris Index の到達可能な値を求めてみる。

4-3. 検討結果報告：「LQGベンチマーク検討報告（1）性能限界曲線を描く」

清水佳子氏（東芝）

LQGをベンチマークとする制御性能評価手法を利用する際に必要にある性能限界曲線の描き方についての説明があった。性能限界曲線を描くための作業手順についての説明の後、ステップ状外乱抑制特性および設定追従特性を評価するための性能限界曲線、さらに未知外乱抑制特性を評価するための性能限界曲線を描く方法について具体的な説明があった。さらに、上記2ケースの場合について、数値例が示された。

【議論概要】

- ・ むだ時間がある場合でも、同様の手順で性能限界曲線を描くことができる。
- ・ プロセスの特性に応じて性能限界曲線がどのように変化するか。
- ・ 状態量がすべては分からない場合に、性能限界曲線はどのようになるか。
- ・ MATLAB上で開発しているプログラムはワークショップメンバーに公開する。
- ・ システム同定で得たモデルの信頼性が制御性能評価にどのような影響を及ぼすか。モデル誤差がある場合に、モデルが悪いのか、制御性能が本当に悪いのかを区別することができるか。

4-4. 検討結果報告：「高次統計量による非線形の検出」

橋本芳宏氏（名古屋工業大学）

3次統計量についての説明の後、3次統計量によって非線形性が検出できる原理についての説明があった。運転データを用いた検討結果については、次回研究会にて報告がある予定。

4-5. 勉強会：「閉ループ同定」 加納学（京都大学）

フィードバック制御下で得られる運転データからプロセスのモデルを構築する際の問題点、いわゆる閉ループ同定の問題点が指摘された後、閉ループ同定手法である直接法、間接法、入出力結合法についての説明があった。

4-6. 懇親会

研究会終了後、名古屋工業大学内にて懇親会を開催した。参加者は17名。

5. 配付資料

- 1) 最小分散制御をベンチマークとする手法(4-1)
- 2) 最小分散制御をベンチマークとする手法(4-2)
- 3) LQGベンチマーク検討報告（1）性能限界曲線を描く(4-3)
- 4) 閉ループ系同定の概要(4-4)

[予定]

第5回研究会 12月20日(金) 13:00~17:00 開催場所未定

- 1) 勉強会(内容および講演者は後日相談)
- 2) 検討結果報告会(内容および講演者は後日相談)
- 3) その他

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.25・第5回研究会議事録

1. 日 時： 2002年12月20日(金) 13:00~17:00

2. 場 所： 京都大学 工学部4号館 化学工学第2講義室
(京都市左京区吉田本町)

3. 出席者：18名(順不同, 出席, 欠席)+特別参加2名

<大学> 加納学(京都大学) 山下善之(東北大学) 大嶋正裕(京都大学) 柘植義文(九州大学) 山本重彦(工学院大学) 大野弘(神戸大学) 黒岡武俊(富山大学) 橋本芳宏(名古屋工業大学)

<企業> 重政隆(東芝ITコントロール) 西澤淳(三菱化学) 栗原久光(出光興産) 樋口文孝(出光興産) 喰田秀樹(出光石油化学) 宮川基彦(インベンシシステムス) 大宮司理晴(ジャパンエナジー) 白川義之(ジャパンエナジー) 滝波明敏(昭和電工) 久下本秀和(住友化学工業) 清水佳子(東芝) 行友雅徳(東芝) 村田尚(東洋エンジニアリング) 松尾徹(三井化学) 松尾文晴(三井化学) 清水雅嗣(横河電機)

<特別> 丸田浩(京都大学), 黒野基二(名古屋工業大学)

4. 内 容

4-1. 検討結果報告：「高次統計量を用いた非線形性の検出」

黒野基二氏(名古屋工業大学), 橋本芳宏氏(名古屋工業大学)

3次統計量を用いた非線形性の検出手法を, 三井化学と住友化学のプラント運転データに適用した結果が報告された。ヒステリシスなどの非線形性を含むプロセスの運転データを検討対象としたが, 非線形性を検出することはできなかった。一方, 単純なモデルを用いてシミュレーションを行い, 3次統計量を用いた非線形性検出手法の有効性を確認したところ, 非線形性を検出することができた。今後, 周波数領域での検討, 入出力信号の確率密度分布の対称性に着目した検討を進める。

【議論概要】

- ・ 実データから非線形性が存在すると考えられる部分を切り出して検討に用いた。
- ・ 住友化学のデータを見ると, PVが変化しているにもかかわらずMVが変化していない部分がある。コントローラにギャップが設けられている可能性もあるが, 原因をチェックする必要がある。
- ・ 入力信号の対称性に着目すると, $y=u^3$ という非線形性は3次統計量を用いて検出できないと考えられる。ところが, シミュレーションを行うと検出できるという結果が得られた。この結果についてはさらに検討を進める。
- ・ MVが変化しているにもかかわらずPVが変化していない部分にヒステリシスの影響が現れていると考えられるが, 完全に制御が行われている場合にもPVは一定となる。この区別を正しく行わなければならない。

4-2. 勉強会：「フィードバック制御下でのプロセスの動特性同定に関する考察」

喰田秀樹氏(出光石油化学)

閉ループ同定を行う際に正しくプラント動特性が得られる条件について, 伝達関数による考察結果が示された。出力の観測雑音がなく, かつ入力側に入出力信号とは無相関な外生信号が存在する場合に, プロセス動特性を同定できる。また, 閉ループ同定の実プラントへの適用を目指して, 入出力信号の特性が同定精度に与える影響について, 簡単な制御シミュレーションに基づいて検討した結果についての解説があった。さらに, 蒸留塔への適用結果も報告された。

【議論概要】

- ・ 閉ループ同定の長所は以下の通りである。1) プラントの安定性が損なわれず, オペレータの負荷

も下がる。この結果、テスト期間を長くできるため、同定精度も向上する。2) 設定値変更を外生信号とする場合、制御変数の変化幅は既知であるため、実験条件を容易に決定できる。

- ・ 蒸留塔の閉ループ同定結果に基づいて、PID制御からMPCへ移行した。
- ・ モデルの精度を検証するために、実測値と推定値との比較を行った。
- ・ 同定テスト中は、オペレータによる操作を抑制した。
- ・ これまでに適用したのは直接法のみである。
- ・ 多変数系の同定を行う際には、あるループを同定する際に他のループをすべて切っている。

4-3. 勉強会：「定性的形状解析を用いた制御性能監視」

山下善之氏（東北大学）

パターン認識を利用して不調な制御ループの診断（不調原因の分類）を行うために、Rengaswamy et al. (Engineering Applications of Artificial Intelligence, 14 23-33, 2001) によって提案された手法の説明があった。制御ループが不調である場合、制御変数の振動の定性的形状（三角波や方形波）に基づいて、不調の原因を推定できると考えられる。そこで、定性的形状分析（QSA）を用いて、制御変数の時系列データを記号化し、得られた記号列に基づいて振動の定性的形状を分類する。この方法を三井化学のプラント運転データに適用したが、不調の原因を特定することは困難であった。

【議論概要】

- ・ 三井化学のプラントでは、気体流量を測定するために差圧式流量計を用いている。その場合、ノイズ除去を目的として、流量計内で時定数が数秒のフィルタ処理が行われているはずである。したがって、MVとPVの対応関係を正しく把握するためには、遅れを補正する必要がある。
- ・ 参考文献が必要な場合は、山下氏に連絡する。

4-4. 検討結果報告：「最小分散制御をベンチマークとする手法」

丸田浩氏（京都大学）、加納学（京都大学）

種々の調整則を利用してPID制御パラメータを決定し、最小分散制御をベンチマークとする手法を用いて、その制御性能を評価した結果について報告があった。どの調整則を利用しても、制御性能は概ね良好であるが、外乱の動特性の違いによって結果（CLPの値）が大きく異なることが確認された。さらに、制御不良の原因が制御パラメータの調整の不具合にある場合に、パラメータを再調整する指針を得るために、閉ループ伝達関数の周波数応答を用いる方法について説明があった。

【議論概要】

- ・ 連続系の調整則を離散系に適用すると、比例ゲインが大きくなる。離散時間伝達関数を用いるのではなく、連続時間伝達関数を用いてシミュレーションを行い、サンプリングする方が良い。
- ・ 個々のパラメータをどのように調整するかではなく、PID制御全体としてどのように調整すべきかという観点から検討する必要がある。

5. 配付資料

- 1) 高次統計量を用いた非線形性の検出（4-1）
- 2) フィードバック制御下でのプロセスの動特性同定に関する考察（4-2）
- 3) 最小分散制御をベンチマークとする手法（4-4）

[予定]

第6回研究会 2月14日（金）13:00～17:00 開催場所未定

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.25・第6回研究会議事録

1. 日 時： 2003年2月14日(金) 13:00~17:00
2. 場 所： 三菱化学本社 9階A-11会議室
(東京丸の内)
3. 出席者： 10名(順不同, 出席, 欠席) + 学生1名(資料作成・配布およびWS運営補助)
- <大学> 加納学(京都大学) 山下善之(東北大学) 大嶋正裕(京都大学) 柘植義文(九州大学) 山本重彦(工学院大学) 大野弘(神戸大学) 黒岡武俊(富山大学) 橋本芳宏(名古屋工業大学)
- <企業> 重政隆(東芝ITコントロール) 西澤淳(三菱化学) 栗原久光(出光興産) 樋口文孝(出光興産) 喰田秀樹(出光石油化学) 宮川基彦(インベンスシステムス) 大宮司理晴(ジャパンエナジー) 白川義之(ジャパンエナジー) 滝波明敏(昭和電工) 久下本秀和(住友化学工業) 清水佳子(東芝) 行友雅徳(東芝) 村田尚(東洋エンジニアリング) 松尾徹(三井化学) 松尾文晴(三井化学) 清水雅嗣(横河電機)
- <学生> 丸田浩(京都大学)

4. 内 容

4-1. 製品紹介：「AspenWatch の紹介」

高橋徹氏(アスペンテックジャパン)

アスペンテック社の AspenPlusOptimizer, RTOWatch, Reaction Models, DMCplus, SmartStep, AspenIQ, AspenWatch の概要を紹介された後, AspenWatch についての説明があった。Aspen Watch の主な機能は, DMCPlus のすべてのデータを非圧縮でデータベースに保存し, 表やトレンドで表示する機能と, Performance 計算を行う機能である。Performance 計算機能は, DMC 内の CV 予測モデルによる予測値との比較表示, モデルが完全な場合の制御応答との比較表示, Dynamic Control Factor の表示など, 様々なパラメータを計算し表示することができる。

【議論概要】

- ・ 具体的なチューニングの指針を示す機能はないが, チューニングの必要性は判断できる。
- ・ 装置変更などでプロセス動特性が変化した場合など, モデルの妥当性を評価することはできる。ただし, AspenWatch にはモデル同定機能がないため, 同定には SmartStep を利用する。
- ・ SmartStep は多変数の同時操作がある場合でもモデル同定を行うことができる。
- ・ 数種類のパラメータに基づいて, プロセス異常, コントローラのチューニング不良, モデル誤差の3つに制御不良の原因を大別する。
- ・ PID コントローラのモニタリング機能もあるが, 国内実績はなく, 詳細は不明である。

4-2. 事例紹介：「GaAs 単結晶育成プロセスへのモデル予測制御の適用」

白川義之氏(ジャパンエナジー)

平成5~6年に実施されたモデル予測制御適用事例について報告があった。直径10cmのインゴットの直径を制御するために, 2分間のロードセルの計測値から直径を推定し, 直径が大きくなれば温度を上げ, 小さくなれば温度を下げる。当初は, 領域ごとにパラメータを変えた変形PID制御などの適用を試みたが, 満足できる制御性能を実現できなかった。そこで, 40分のステップ応答データに基づきモデル予測制御系を設計したところ, 直径を良好に制御することができた。

【議論概要】

- ・ 既存の単結晶育成炉での経験から, 通常のPID制御では制御性が悪く, 変形PID制御でも満足のいく結果は得られず, PID制御の限界を感じていた。

- 融液が十分に存在する状態でモデル同定を実施したため、融液が減少するとモデルがずれる。この結果、結晶引き上げの最終段階で制御がうまくいかない場合がある。そこで、制御開始から終了まで、プロセスゲインを直線的に変化させた結果、制御性が向上した。

4-3. 事例紹介：「実プラントデータを用いた『MPC 性能指標』の評価」

西澤淳氏（三菱化学）

三菱化学における高度制御保全ワークフローについて紹介された後、市販のモデル予測制御パッケージを適用した蒸留塔からプロセスデータを収集し、制御性能評価を行った結果について報告された。相関解析およびスペクトル解析を適用した結果、続いて Design Case Approach の一例として、Achieved Objective Function を適用した結果について紹介があった。さらに、予測誤差に基づく指標についても適用結果が示された。なお、このプロセスデータは本WS内で公開していただける。

【議論概要】

- 自己相関が緩やかに小さくなるのは周期的信号が原因と考えられるため、自己相関は急激に小さくなるのが望ましい。ただし、この方法は上下制限約にかかっていない変数に対しては機能しない。
- スペクトル解析の結果、塔頂圧力制御のバルブ開度が80分周期で振動していることが確認され、予測誤差との相関解析の結果、その原因は塔底液面制御（モデル予測制御の範囲外）にありそうだとわかった。この原因については、データを提供するのでWSで解析して欲しい。
- 当初、一部の操作変数が下制限約にかかっていたため、オペレータが当該下限値を下げた。制約にかかると、DCSでアラームが出たり、画面の表示色が変わるように設定されている。
- 評価関数の重みは計器レンジに基づいて決定した。塔底組成については自然対数を取っている。
- 制御偏差が小さく予測誤差が大きくなるのは不自然な気もするが、原因は不明である。

4-4. 検討結果報告：「高次統計量を用いた非線形性の検出」

久下本秀和氏（住友化学）

プラントの非線形性の検出について、前回問題となった入力信号の歪みについての検討と、周波数領域及び入出力信号の確率密度分布の対称性に着目した検討を行った結果が報告された。入力信号の歪みについては、PIDチューニングではなく、バルブに原因があることが判明した。また、確率分布の対称性を変えないような非線形性については3次統計量を用いたパワースペクトルでは検出できないことが判明したが、流量のパワースペクトルには非線形性の影響がわずかながら検出された。

【議論概要】

- 流量（状態変数）のパワースペクトルには大きなピークを持つ基本音と小さなピークを持つ倍音が出ているが、これは流量が方形波の形で変化しているためであり、バルブに原因があることに対応すると考えられる。
- 基本音の部分は非線形性とは関係ないが、この部分の存在が非線形性の兆候である倍音部分を目立たなくしているため、いかに基本音のピークを小さくするかが問題である。
- パワースペクトルを非線形性の検出に用いる場合、チューニングが劣化すると検出不可能である。スティックが原因の場合、制御ループ間の干渉と区別がつかなくなるかもしれない。
- 状態変数である流量と操作変数の弁開度の情報があれば、スペクトルを取らなくてもヒステリシスなどの非線形性は分かる。しかし、多数の制御ループについて自動判定する方法が問題となる。

5. 配付資料

1) 実プラントデータを用いた『MPC 性能指標』の評価（4-3）

[予定]

第7回研究会 4月18日（金）13:00～17:00 開催場所は未定

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.25・第7回研究会議事録

1. 日 時： 2003年4月18日(金) 13:00~17:00

2. 場 所： 東北大学 青葉記念会館 702号室(中研修室)
(仙台市青葉区荒巻字青葉)

3. 出席者：16名(順不同, 出席, 欠席)

<大学> 加納学(京都大学) 山下善之(東北大学) 大嶋正裕(京都大学) 柘植義文(九州大学) 山本重彦(工学院大学) 大野弘(神戸大学) 黒岡武俊(富山大学) 橋本芳宏(名古屋工業大学)

<企業> 重政隆(東芝ITコントロール) 西澤淳(三菱化学) 栗原久光(出光興産) 樋口文孝(出光興産) 喰田秀樹(出光石油化学) 宮川基彦(インベンスシステムス) 大宮司理晴(ジャパンエナジー) 白川義之(ジャパンエナジー) 滝波明敏(昭和電工) 久下本秀和(住友化学工業) 清水佳子(東芝) 行友雅徳(東芝) 村田尚(東洋エンジニアリング) 野口芳和(日揮) 松尾徹(三井化学) 松尾文晴(三井化学) 清水雅嗣(横河電機)

4. 内 容

4-0. 新規メンバーの紹介

4月より新たに本ワークショップに参加されることになった野口芳和氏(日揮)の紹介があった。

4-1. 運転データ解説(1):「蒸留塔+モデル予測制御」

西澤淳氏(三菱化学)

市販のモデル予測制御パッケージを導入した蒸留塔の運転データについての説明があった。提供していただいたデータは参加者全員に公開する。

【議論概要】

- ・ 不純物組成をできるだけ高くするのは、運転負荷を下げる(手を抜く)ためである。
- ・ 組成分析装置の測定周期は20分である。なお、塔底組成は自然対数変換した後、制御に利用している。塔頂組成は変換していない。塔底組成の提供データは対数変換したもの。
- ・ 還流槽レベル制御は留出ラインバルブ開度を操作変数とし、カスケード制御にはなっていない。
- ・ 運転データは1分周期だが、モデル予測制御の制御周期は6分である。提供データは960点(4日間)のもの。
- ・ 原料FCは上流側タンクのLCのスレーブになっている。
- ・ モデル予測制御のステップ応答モデルも開示できる。ただし、すべての変数をレンジで規格化してある。横軸は12時間である。
- ・ 塔底LCがうまくいっていないが、マイナーループの再チューニングを実施するとモデル予測制御中のモデルも変更しなければならないため、手が付けられない。
- ・ マイナーループの制御周期は1秒である。

4-2. 運転データ解説(2):「3種類の制御系」

久下本秀和氏(住友化学)

圧縮機の翼角制御系(バックラッシュあり)、液流量制御系(ポジション不良?),液レベル制御系(バルブスティックあり)の3種類の運転データについての説明があった。提供していただいたデータは参加者全員に公開する。

【議論概要】

<対象1>

- ・ 翼角制御はギャップ付きPID制御であるが、運転データ取得期間中はギャップなしである。

- ・ モーター駆動頻度には上限が，角度調整幅には下限がある．このため，P V（翼角）の時系列データは階段状になる．
- ・ この異常は高次統計量では検出できなかった．

<対象 2 >

- ・ 低粘度流体の貯留タンク液レベル制御を実施しているラインの下流側で，流量制御を行っている．
- ・ P V - M Vプロットを描くと，その軌跡は三角形に近い楕円となる．
- ・ 高次統計量を用いた解析により，何らかの異常が存在することが確認された．原因は，上流側 L C のチューニング不良か，あるいはポジション不良であると考えられる．
- ・ 制御周期は 1 秒，運転データは 1 分周期である．

<対象 3 >

- ・ 貯留タンク流出側バルブ開度を操作変数とする液レベル制御である．
- ・ P V - M Vプロットの代わりに，流量 - M Vプロットを描くと，その軌跡は平行四辺形に近い形状となった．これはバルブスティックやバックラッシュの特有の形状である．
- ・ 上記の結果に基づいて，定修時に当該バルブの解体修理を実施したところ，制御性が大幅に改善された．この例のように，プラント保守という観点から，バルブ不良の検出は大きな効果がある．
- ・ この異常は高次統計量では検出できなかった．

<その他 >

- ・ バルブ不良を自動的に検出できる方法論を開発する必要がある．この際，コントローラのチューニング不良か，バルブ不良かを判別する必要がある．P V - M Vプロットは有効であるが，そのままでは自動検出は困難である．
- ・ 高次統計量は信号の非対称性に注目しているため，必ずしも異常を検出できるわけではない．

4-3. 討論：「今後の方針について」

事前に実施したアンケート結果に基づいて，今後の方針について議論が行われた．

- ・ 最終的な成果として，参加者が利用できるソフトウェアの開発を目指す．開発に際しては主に MATLAB を利用することになるが，最終的に配布するソフトウェアの言語などについては改めて議論する．
- ・ 上記ソフトウェアに含まれる機能としては，以下のものを想定している．
 - 最小分散制御をベンチマークとする制御性能評価機能（一変数系，多変数系）
 - LQG をベンチマークとする制御性能評価機能
 - モデル予測制御の制御性能評価機能
 - バルブ不良の自動検出機能
- ・ 今後は，提供していただいた運転データを活用し，1）モデル予測制御の制御性能監視，2）バルブ不良の自動検出，を中心に活動を進める．これと平行して，上記ソフトウェアの開発を進める．
- ・ モデル予測制御の制御性能監視に関しては，文献調査からとりかかる．

5. 配付資料

1) アンケート結果（4-3）

[予定]

- ・ 第 8 回研究会 5 月 3 1 日（土）1 3 : 0 0 ~ 1 7 : 0 0 神戸大学
- ・ 5 月 2 8 - 3 0 日に神戸で計測自動制御学会の制御部門大会が開催される．3 0 日には「プロセス・コントローラの状態監視」というセッションがあり，多数のメンバーが参加予定である．

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.25・第8回研究会議事録

1. 日 時： 2003年5月31日(土) 13:00~17:00
2. 場 所： 神戸大学 C4棟4階C4-402セミナー室
(神戸市灘区六甲台町1-1)
3. 出席者： 14名(順不同, 出席, 欠席) + 学生1名(資料作成・配布およびWS運営補助)
- <大学> 加納学(京都大学) 山下善之(東北大学) 大嶋正裕(京都大学) 柘植義文(九州大学) 山本重彦(工学院大学) 大野弘(神戸大学) 黒岡武俊(富山大学) 橋本芳宏(名古屋工業大学)
- <企業> 重政隆(東芝ITコントロール) 西澤淳(三菱化学) 栗原久光(出光興産) 樋口文孝(出光興産) 喰田秀樹(出光石油化学) 宮川基彦(インベンスシステムス) 大宮司理晴(ジャパンエナジー) 白川義之(ジャパンエナジー) 滝波明敏(昭和電工) 久下本秀和(住友化学工業) 清水佳子(東芝) 行友雅徳(東芝) 村田尚(東洋エンジニアリング) 野口芳和(日揮) 松尾徹(三井化学) 松尾文晴(三井化学) 清水雅嗣(横河電機)
- <学生> 丸田浩(京都大学)

4. 内 容

4-1. 解説：モデル駆動PID制御 - その特徴と応用例 -

重政隆氏(東芝ITコントロール), 行友雅徳氏(東芝) プロセスモデルをコントローラの内部に持たせることにより, 制御性能の高いPID制御を実現させる方法について詳しい解説があった。コントローラ的设计は, 1) モデル同定, 2) PDフィードバック設計(マイナーループの導入によって見掛け上の動特性を一次遅れ+むだ時間に近似する), 3) 主コントローラ設計, の順に行われる。また, 沈殿槽, スラッジボイラー, 反応蒸留塔などへの適用事例が報告された。さらに, コントローラ設計ツール(ソフトウェア)の紹介があった。

【議論概要】

- モデル駆動PID制御は, 本質的にIMCと等価である。ただし, プロセスの動特性が一次遅れ+むだ時間でない場合に, モデル駆動PID制御では, マイナーループにPDフィードバックを利用して, 見掛け上の動特性を一次遅れ+むだ時間に近似する。このマイナーループの導入により, ロバスト性が向上する。
- PDフィードバックの設計にはモデルマッチング法を利用できる。現場で使い易いインタフェースを開発している。
- 比較対象をPI制御としているのは, 現実にD制御が利用されることは希なためである。ただし, 温度制御のように応答が遅いループにはD制御が利用される。
- 従来のモデルマッチング法(北森法)は, むだ時間が長いプロセスに対してうまくいかない。
- シンスキーのPID_d制御の3つのパラメータを, 規範モデルへのモデルマッチングにより直接決めれば良いのではないか。
- 制御性能改善のためのプラントワイド的手法が必要である。
- ループ改善のメリットを定量的に評価するための標準的な指標を作成する必要がある。例えば, オペレータ介入頻度, アラーム頻度, PV分散, 薬品や用役の使用量などは少ない方がよい。
- 非線形プロセス(特に排水系のpH制御)に利用してみたい。

4-2. 作業報告：Wavelet 解析を用いた蒸留塔運転データ(三菱化学提供)の解析

松尾徹氏(三井化学)

モデル予測制御が適用されている蒸留塔の運転データを対象として, ウェーブレット解析を適用することにより, 運転状態が振動的になっている根本原因(root cause)を明らかにしようとする試みに

ついでに報告があった。ウェーブレット解析の結果として時間・周波数領域に現れる信号強度のパターンから各変数の因果関係（振動の伝播順序）を求めるために、そのパターンの類似度を用いる方法が紹介された。適用した結果から、還流槽周辺のタグに80分周期の振動が確認され、PI007が最初に変化し、ガスクロ分析値が最後に変化することがわかった。また、FC001のMV-PVの関係をチェックすると、PVがMVに対して非常に大きく遅れていることが確認された。以上より、PI007の制御不良が振動の原因ではないかとの推論がなされた。

【議論概要】

- ・ ガスクロの測定周期は20分である。
- ・ PI007には上下限が設定されているが、積極的に制御する必要はない。
- ・ 信号が変化する点を検出するのがウェーブレット解析の特徴である。信号を一次遅れフィルタに通す場合、時定数を変化させても、信号が変化するタイミングは変わらないため、入出力信号間に時間的なずれを見いだせないのではないかと。高次遅れフィルタを通す場合や、正弦波の周波数とフィルタ時定数の関係を変化させた場合について、さらに検討を進める。
- ・ MVおよびLC013も解析に加えて検討を進める。
- ・ HC015は原則動かさないが、運転データにはオペレータが動かした部分が含まれている。HC015の変化がどのように伝播していくのかについて検討を進める。

4-3. パルプスティクションモデルとスティクション検出アルゴリズム

丸田浩, 加納学(京都大学)

パルプスティクションモデルとスティクション検出アルゴリズムについての簡単な説明があった。時間の都合により、詳細な説明は次回以降となった。

4-4. 中間報告について

7月18日(金)に開催される第143委員会研究会でのWS25中間報告において、下記テーマで発表する。タイトル、発表内容、時間等については、後日検討する。

- 1) これまでの活動内容紹介(加納)
- 2) 制御性能監視の初歩的解説(加納)
- 3) 三菱化学における取り組み(西澤氏)
- 4) 非線形性とバルブ不良の検出(久下本氏, 橋本氏)
- 5) Wavelet解析の適用結果(松尾氏)

5. 配付資料

- 1) モデル駆動PID制御システムとその安定性(4-1)
- 2) モデル駆動PID制御システムとそのチューニング方法(4-1)
- 3) モデル駆動PID制御系の構造と調整方法(4-1)
- 4) パルプスティクションモデルとスティクション検出アルゴリズム(4-3)

[予定]

- ・ 第9回研究会 7月17日(木) 13:00~17:00 東京(場所は未定)
- ・ 7月18日(金)に東京で開催される第143委員会研究会にて、中間報告を行う。

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.25・第9回研究会議事録

1. 日 時： 2003年7月17日(木) 13:30~17:30

2. 場 所： 工学院大学 新宿校舎11階第7会議室
(新宿駅西口から徒歩7-8分)

2. 出席者： 17名(順不同, 出席, 欠席) + 学生1名(資料作成・配布およびWS運営補助)

<大学> 加納学(京都大学) 山下善之(東北大学) 大嶋正裕(京都大学) 山本重彦(工学院大学) 大野弘(神戸大学) 黒岡武俊(富山大学) 橋本芳宏(名古屋工業大学)

<企業> 重政隆(東芝ITコントロール) 西澤淳(三菱化学) 栗原久光(出光興産) 樋口文孝(出光興産) 喰田秀樹(出光石油化学) 宮川基彦(インベンスシステムス) 大宮司理晴(ジャパンエナジー) 白川義之(ジャパンエナジー) 滝波明敏(昭和電工) 久下本秀和(住友化学工業) 清水佳子(東芝) 行友雅徳(東芝) 村田尚(東洋エンジニアリング) 野口芳和(日揮) 松尾徹(三井化学) 松尾文晴(三井化学) 清水雅嗣(横河電機)

<学生> 丸田浩(京都大学)

4. 内 容

4-1. 文献調査報告：“Time series methods for dynamic analysis of multiple controlled variables”

清水雅嗣氏(横河電機)

運転データから多変量AR(自己回帰)モデルを同定することによって導出される,閉ループ下での多変数インパルス応答モデルを用いて,制御系の解析を行う方法について紹介があった.非対角要素のインパルス応答が有意であれば,非干渉化(対角化)が十分に実現できておらず,何らかの対策が必要であると判断できる.ただし,定量的に制御性能を評価できる方法にはなっていない.また,市販パッケージであるMD(SGI社製)の紹介があった.MDはSISO系を対象として,最小分散制御をベンチマークとしつつ,閉ループインパルス応答によって問題点を判断するシステムである.

4-2. 文献調査報告：“A practical approach for large-scale controller performance assessment, diagnosis, and improvement”

滝波明敏氏(昭和電工)

Eastman Chemical社が自社開発した制御性能評価システムの紹介があった.CLPAという最小分散制御をベンチマークとする指標の他,制御量が設定値と交差する回数,ハードウェアの不調などがウェブ上で閲覧できるようになっている.1つで完璧な手法はないのであるから,様々な簡便な手法を組み合わせ利用すればよいという考えに基づいている.その運用においては,エリア毎のパフォーマンスを比較して競争原理を持ち込むなどの工夫がある.エンジニア,スタッフ,マネージャーの共通のコミュニケーションツールができたこと,不具合修正時間が2/3に短縮されたこと,性能向上への意識が向上したことなどが導入メリットとして挙げられている.

4-3. 文献調査報告：“Performance Assessment of Constrained Model Predictive Control Systems”

白川義之氏(ジャパンエナジー)

最小分散制御をベンチマークとする手法を,制約条件が存在する場合にも利用できるように拡張する方法についての紹介があった.まず,Receding Horizon Controlの枠組みを利用して,制約条件が存在する場合の最小分散コントローラを導出している.次に,導出した最小分散コントローラに基づいて,制約条件付きモデル予測制御の制御性能を評価する方法を示している.

4-4. 文献調査報告：“An investigation into the poor performance of a model predictive control system on an industrial CGO coker”

大宮司理晴氏(ジャパンエナジー)

シンクルード社のCGOコーカー(コークス製造)装置に実装されたモデル予測制御がうまく機能し

ないという問題を解決した手順についての報告があった。ここでの問題解決には運転データに基づくアプローチが採用され、スペクトルデータによる相関解析とトレンドデータによる前後（因果）解析が実施された。その結果、外乱変数としてモデル予測制御に組み込むべきではない変数を外乱変数として利用したことが問題であるとの結論が得られた。その外乱変数が操作変数の影響を受けるため、フィードフォワード制御部に意図しないフィードバックループが発生し、モデル予測制御系の安定性が損なわれていたことが原因であった。

4-5. 文献調査報告：“Practical issues in multivariable feedback control performance assessment”

宮川基彦氏（インベンシシステムス）

最小分散制御に代わる、より現実的なユーザ定義ベンチマークを用いる制御性能評価手法についての紹介があった。この方法は、望ましい閉ループインパルス応答をユーザが指定し、それをベンチマークとすることによって制御性能を評価しようとするものである。望ましい閉ループインパルス応答は、開ループ時のインパルス応答と最小分散制御時のインパルス応答との中間で任意に選べばよい。最小位相系および非最小位相系を対象として、SISO系およびMIMO系への適用方法が述べられている。

5. 配付資料

- 1) 4-1 解説資料
- 2) 4-3 解説資料
- 3) 4-4 解説資料
- 4) 4-5 解説資料
- 5) ”Diagnostic Tools for Multivariable Model-Based Control Systems”, 西澤淳氏（三菱化学）
解説資料と論文コピー
- 6) パルプスティクションのモデル化と検出アルゴリズムの開発，丸田，加納（京都大学）
資料と付録（図）

[予定]

- ・ 第10回研究会 8月22日（金）13：00～17：00 場所は未定
第9回研究会で消化できなかった内容を優先的に実施する。
 - 文献調査報告 西澤淳氏（三菱化学）
 - 作業報告 丸田，加納（京都大学）
- ・ 第11回研究会 11月4日（火）13：00～17：00 京都（京都大学桂キャンパス）
Prof. Nina F. Thornhill（UCL）によるセミナーを開催予定。

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.25・第10回研究会議事録

1. 日 時： 2003年8月22日(金) 13:00~17:00

2. 場 所： 東芝本社 39F 3903会議室
(東京都港区芝浦1-1-1(東芝ビルディング))

2. 出席者：14名(順不同, 出席, 欠席)

+ 特別参加1名+学生1名(検討内容報告およびWS運営補助)

<大学> 加納学(京都大学) 山下善之(東北大学) 大嶋正裕(京都大学) 山本重彦(工学院大学) 大野弘(神戸大学) 黒岡武俊(富山大学) 橋本芳宏(名古屋工業大学)

<企業> 重政隆(東芝ITコントロール) 西澤淳(三菱化学) 栗原久光(出光興産) 樋口文孝(出光興産) 喰田秀樹(出光石油化学) 宮川基彦(インベンシシステムス) 大宮司理晴(ジャパンエナジー) 白川義之(ジャパンエナジー) 滝波明敏(昭和電工) 久下本秀和(住友化学工業) 清水佳子(東芝) 行友雅徳(東芝) 村田尚(東洋エンジニアリング) 野口芳和(日揮) 松尾徹(三井化学) 松尾文晴(三井化学) 清水雅嗣(横河電機)

<特別参加> 大庭章(東芝)

<学生> 丸田浩(京都大学)

4. 内 容

4-1. 文献調査報告：“Diagnostic Tools for Multivariable Model-Based Control Systems”

西澤淳氏(三菱化学)

多変数モデルベース制御システムを対象として、その制御性能を監視し、性能劣化の検出とその原因推定を行う方法についての紹介があった。性能劣化の検出には、予測誤差と制御偏差の双方を利用する。これによって、モデルミスマッチによる性能劣化とチューニング不良による性能劣化とを区別することができる。多管式熱交換器を例に示されているように、予測誤差が小さく、制御偏差が大きい場合には、モデルミスマッチは問題ではなく、アクチュエータの飽和あるいはチューニング不良が性能劣化原因であると判断される。一方、予測誤差が大きく、モデルミスマッチが原因である場合には、原因を絞り込むために、より詳細な解析が必要となる。本論文では、コントローラのチューニング前後の予測誤差の自己相関関数の変化に着目して、プロセス特性が変化したか否かを判断する方法を提案している。しかし、(1)性能劣化の前後ではなく、なぜコントローラチューニングの前後なのか、(2)予測誤差の自己相関関数の変化とプロセス特性の変化をどのように結び付けているのか、について疑問が残る。さらに、異常診断方法として、複数の異常シナリオを想定し、それらを異常パラメータベクトルとして表現し、状態推定を行うことによって、可能性の高いシナリオを見付けるという方法も提案されている。

4-2. 解説：ベイズ推定入門

山下善之氏(東北大学)

西澤氏が紹介された文献において、ベイズ推定による状態推定が利用されていたため、より理解を深めるために、ベイズ推定についての解説があった。条件付確率(事後確率)に関するベイズの法則に基づいてクラス分類を行う方法、そのための各種判定規則、さらにパラメータ推定方法の具体例についての説明があった。

4-3. 作業報告：バルブスティクションモデルとスティクション検出アルゴリズム

丸田浩, 加納学(京都大学)

Alberta 大学の研究グループが提案したバルブスティクションモデルについての説明の後、そのモデルの問題点が指摘され、改良版である Kyoto モデルおよび Kugemoto モデルが提案された。これらの新規に提案されたモデルについて、Kyoto モデルではバルブが一旦静止した後の開閉の仕方(静摩

擦と動摩擦の影響)が対称的であり, Kugemoto モデルでは一方向しか静摩擦の影響が考慮されておらず, いずれのモデルでも取り扱いが不完全であるとの指摘が久下本氏(住友化学工業)からなされた. さらにモデルの完成度を高めるためには, フェイル・トゥ・オープンとフェイル・トゥ・クローズの2種類のバルブについて, 静摩擦と動摩擦の影響(静摩擦と動摩擦の差がジャンプ幅となることを含む)を同時に考慮したモデルを開発する必要がある. なお, Kyoto モデルによるシミュレーション結果について質問があり, バルブ開度の変化の仕方について詳細に調査し, 改めて報告することになった. さらに, これまでに論文等で報告されているスティクション検出アルゴリズムと新規に提案されたアルゴリズムについての説明があり, 各手法をシミュレーションデータと実プロセス運転データ(住友化学提供)に適用した結果, 既存法と比較して, 提案法がスティクションの有無を良く判定しているという結果が得られたとの報告があった.

4-4. その他

- ・最終報告書の内容と分担について相談する. 企業から提供していただいているデータなど, 取り扱いに注意すべきものについては, 提供者にどこまで公開可能か判断してもらう.
- ・WS 25の成果(開発したモデル, アルゴリズム, ソフトウェアなど)の取り扱いについてルールを作成する. 現時点で, 市販のプロセスシミュレータ(オメガシミュレーション社の Visual Modeler)にWS 25で開発したバルブスティクションモデルを搭載するという成果の公開の仕方が参加者から提案されており, その方向での話を進める.

5. 配付資料

- 1) 4-2 解説資料
- 2) "Condition Monitoring of Control Loops" by A. Horch の目次
- 3) Zang and Howell, "Discrimination Between Bad Tuning and Non-linearity Induced Oscillations Through Bispectral Analysis", SICE Annual Conference, Fukui, Japan, Aug. 4-6, 2003

[予定]

- ・第11回研究会 11月4日(火) 13:00~17:00 京都(京都大学桂キャンパス)

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.25・第11回研究会議事録

1. 日時： 2003年11月4日(火) 13:00~17:00

2. 場所： 京都大学化学工学専攻会議室 A2棟216室
(京都市西区京都大学桂)

3. 出席者： 9名(順不同, 出席, 欠席)

<大学> 加納学(京都大学) 山下善之(東北大学) 大嶋正裕(京都大学) 山本重彦(工学院大学) 大野弘(神戸大学) 黒岡武俊(富山大学) 橋本芳宏(名古屋工業大学)

<企業> 重政隆(東芝ITコントロール) 西澤淳(三菱化学) 栗原久光(出光興産) 樋口文孝(出光興産) 喰田秀樹(出光石油化学) 宮川基彦(インベンスシステム) 大宮司理晴(ジャパンエナジー) 白川義之(ジャパンエナジー) 滝波明敏(昭和電工) 久下本秀和(住友化学工業) 清水佳子(東芝) 行友雅徳(東芝) 村田尚(東洋エンジニアリング) 野口芳和(日揮) 松尾徹(三井化学) 松尾文晴(三井化学) 清水雅嗣(横河電機)

4. 内容

4-1. 特別講演：“Detection and diagnosis of valve stiction”

Prof. Nina Thornhill (University College London, UK)

プラントの生産効率を高めるためには、制御量の変動を小さく抑えることが重要である。多数の装置からなるプラントでは、ある箇所が発生した外乱がプラント全体に伝播し、多くの制御量を振動させるため、振動の根本要因を特定する必要がある。この際、ある1つの根本要因による振動は、すべて同じ振動周期を持つことから、要因解析の第一段階として、根本要因ごとに振動している変数を分類する。振動周期はデータそのものを見ても確認できるが、測定ノイズの影響を強く受けているため、自己相関関数を利用して振動周期を求め、分類するのが良い。この作業を自動化するために、Spectral PCA や Spectral ICA を利用できる。つまり、運転データにFFTを適用し、パワースペクトルを算出した後、主成分分析あるいは独立成分分析を用いて、クラス分類を行う。こうして分類ができれば、続いて根本要因の特定を行う。根本要因の特定には、非線形性テストを利用する。バルブスティクションのような非線形現象が根本要因であれば、プラントはその特性上ローパスフィルタのような役割を果たすため、影響が伝播するに従って倍音やコヒーレンスは減衰するはずである。そこで、非線形性の強い、倍音成分が顕著な変数が根本要因であると判断する。この際、プロセスフローシートを利用して、変数の因果関係も考慮する。以上の手法の実用性を示すために、Eastman Chemicals 社のプラントへの適用事例が紹介された。この例では、リサイクルを有するプラントにおいて、16変数が持続的に振動しており、そのうち10個が同一の要因によって引き起こされていると判断された。また、非線形性テストによって、デカンターのレベル制御ループが振動の根本要因であることが判断された。さらなる検討の結果、レベル制御に利用されているバルブのデッドバンドが根本要因であることが確認され、実際、バルブのメンテナンス後、プラント全体の制御性能が大幅に向上した。なお、非線形性テストを利用する方法では、線形の振動要因を検出することはできない。つまり、コントローラのチューニングが悪い、ループ間の干渉が強い、などの要因によってプラント全体が振動的になっているような場合、その根本要因を特定することはできない。また、振動の特性が時間的に変化するような場合には、パワースペクトルが現象を正確に表現しているとは言えない。このため、ウェーブレット解析の利用などが考えられる。この他、バルブスティクションを表現するモデルについての説明もあった。

4-2. 作業報告：“Extended Qualitative Shape Analysis for Detection of Stiction in Control Valves”

山下善之氏(東北大学)

バルブスティクションを検出するには、コントローラ出力とバルブ開度(または流量)を二次元平面

にプロットした図が有効である。しかし、すべての制御ループを対象にこのプロットを描き、目視でスティクションの有無を判断するのは現実的でない。そこで、定性的形状分析(QSA)を利用して、運転データから自動的にスティクションを検出する方法が有効である。従来のQSAは1変数を対象としているが、スティクションを検出するためには、コントローラ出力とバルブ開度(または流量)の2変数によって特徴づけられる形状を分析する必要がある。そこで、従来のQSAを2次元に拡張したExtended QSA(EQSA)が提案された。さらに、EQSAをシミュレーションデータ(京都大学作成)および実プラントデータ(住友化学提供)に適用し、バルブスティクションを検出できることが示された。

4-4. その他

- ・最終報告書は、研究会での講演・報告内容をまとめたものとする。現在までの研究会で取り上げた内容を配付資料(最終報告書の構成(案))にまとめてあるので、各項目について報告書を作成する。なお、講演に使用したスライドをそのまま報告書に掲載しても良いが、少なくとも1頁の概要は書くことにする。
- ・最終報告書はPDFファイル形式で、CDにより配布する。PDFファイル形式で配布することを活かし、できるだけ使い易くするため、目次を2種類(理論と応用で区別した目次と技術別に分類した目次)用意するなどの工夫について検討する。
- ・WS25の成果として、開発したソフトウェアを配布する。配布形式(MATLAB用ファイル、エクセル用ファイルなど)については今後の議論をふまえて判断する。また、ソフトウェアをできるだけ多くのユーザに利用してもらうため、マニュアルも整備する。

5. 配付資料

- 1) 4-1 解説資料
- 2) 4-2 解説資料
- 3) 最終報告書の構成(案), 加納(京都大学)
- 4) 最終報告書への意見, 喰田氏(出光石油化学)

[予定]

- ・第12回研究会 1月30日(金) 13:00~17:00 日揮(株)横浜本社

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.25・第12回研究会議事録

1. 日 時： 2004年1月30日（金） 13:00～17:00
2. 場 所： 日揮（株）横浜本社 会議室 26F 北 SIセンター
（横浜市西区みなとみらい 2-3-1 クイーンズタワーA）
3. 出席者： 12名（順不同，□出席，■欠席）
 <大学> □加納学（京都大学）□山下善之（東北大学）■大嶋正裕（京都大学）■山本重彦（工学院大学）■大野弘（神戸大学）■黒岡武俊（富山大学）□橋本芳宏（名古屋工業大学）
 <企業> □重政隆（東芝ITコントロール）□西澤淳（三菱化学）■栗原久光（出光興産）■樋口文孝（出光興産）■喰田秀樹（出光石油化学）■宮川基彦（インベンスシステムス）□大宮司理晴（ジャパンエナジー）■白川義之（ジャパンエナジー）□滝波明敏（昭和電工）（[代理] 蒲原）□久下本秀和（住友化学工業）□清水佳子（東芝）□行友雅徳（東芝）■村田尚（東洋エンジニアリング）□野口芳和（日揮）■松尾徹（三井化学）■松尾文晴（三井化学）■清水雅嗣（横河電機）
 <学生> □丸田浩（京都大学）

4. 内 容

4-1. 作業報告：PID制御の性能評価

丸田 浩，加納 学（京都大学）

従来の最小分散制御をベンチマークとする制御性能評価手法を，PID制御の性能評価に適用した場合の問題点について指摘があった．プロセスを一次遅れとむだ時間で近似できるとして，連続時間システムでの解説がなされた．ステップ状設定値変更の場合，PID制御で達成可能な制御性能（偏差の分散で評価）は概ねむだ時間のみに依存し，時定数や定常ゲインの影響は受けない．制御系の閉ループ伝達特性がむだ時間のみに依存するようになる新しいPID調整則が提案され，その調整則によってHarris Index=0.9程度の制御性能をPID制御によって実現できることが示された．一方，遅れを伴う外乱の場合，PID制御で達成可能な制御性能はプロセスおよび外乱の動特性に依存し，Harris Indexの最大値が0.5以下となる場合もある．したがって，プロセスに外乱が付加されている状態では，PID制御の性能を従来法で正しく評価するのは極めて困難である．今後，制御性能をIAEで評価する，不完全微分を考慮して定式化を行う，PI制御の場合について同様の検討を行う，積分プロセスについて同様の検討を行う，離散時間系で定式化を行う，モデル誤差の影響を評価する，などを実施していく．

4-2. ソフトウェア（制御性能監視ツールボックス）演習

丸田 浩，加納 学（京都大学）

MATLAB上で開発し，EXCEL上で実行できるように変換した『制御性能監視ツールボックス』を参加者全員に配布し，その演習を実施した．現時点で，このツールボックスには，最小分散制御をベンチマークとする制御性能評価手法と4種類のバルブ固着検出手法が実装されている．今後，ユーザの意見を反映させながら，使いやすいツールへと進化させていく．

4-3. その他

- ・最終報告書（案）に基づき，執筆者を決定する．加納がとりまとめ．

[予定]

- ・第13回研究会 3月5日（金） 13:00～17:00 場所未定（京都大学が候補）

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.25・第13回研究会議事録

1. 日 時： 2004年3月5日（金） 13:00～17:00
2. 場 所： 京都大学化学工学専攻会議室 A2棟216室
（京都市西区京都大学桂）
3. 出席者： 11名（順不同，□出席，■欠席）
 <大学> □加納学（京都大学）□山下善之（東北大学）■大嶋正裕（京都大学）■山本重彦（工学院大学）■大野弘（神戸大学）■黒岡武俊（富山大学）■橋本芳宏（名古屋工業大学）
 <企業> □重政隆（東芝ITコントロール）□西澤淳（三菱化学）■栗原久光（出光興産）■樋口文孝（出光興産）■喰田秀樹（出光石油化学）■宮川基彦（インベンスシステムス）□大宮司理晴（ジャパンエナジー）□白川義之（ジャパンエナジー）□滝波明敏（昭和電工）□久下本秀和（住友化学工業）■清水佳子（東芝）□行友雅徳（東芝）■村田尚（東洋エンジニアリング）■野口芳和（日揮）□松尾徹（三井化学）■松尾文晴（三井化学）■清水雅嗣（横河電機）
 <学生> □丸田浩（京都大学）

4. 内 容

4-1. 作業報告：調節弁固着検出法の改良

加納 学，丸田 浩（京都大学）

これまで WS25 にて開発を進めてきた調節弁固着検出法について、固着現象のモデリングから検出アルゴリズムに至るまでの概要が解説された。さらに、提案法の1つである A 法について、固着の有無を判定するだけでなく、固着の程度を定量化できるように改良したアルゴリズムが報告された。これにより、提案する複数の手法すべてにおいて固着を定量化できたことになり、従来法の欠点を克服できる。なお、ここで固着と呼ぶ現象にはバルブの遊びにより発生するバックラッシュも含まれる。この観点からは、固着 (sticking) よりもむしろスティクション (stiction) を検出する手法だと言える。なお、紹介された 13 種の制御ループにはすべてポジションが設置されているが、それでもスティクションが発生している。この原因は定かでないが、ポジションのゲインが小さいことが原因となっている可能性がある。また、データはパイというシステムを利用して圧縮保存されているため、実際の時系列データとは異なる挙動を示す。差が顕著なデータについては、解析時に注意を要する。これまでの成果により、スティクションのモデル化、検出、定量化ができることから、さらに発展して、スティクションが発生することを前提とした優れたフィードバック制御系を構築できる可能性がある。これはフィールドバスで実現しようとしている技術であるが、フィールドバスを利用せずとも実現できる可能性がある。

4-2. 作業報告：定性的形状解析の拡張とバルブスティクション検出への応用

山下善之氏（東北大学）

WS25 にて開発した調節弁固着検出法である A 法および B 法は、コントローラ出力とバルブ開度（または流量）を二次元平面にプロットした図が固着検出に有効であることを示唆している。本講演では、別のアプローチとして、定性的形状分析 (QSA) を利用して、運転データから自動的にスティクションを検出する方法について説明がなされた。従来の QSA は 1 変数を対象としているが、これを 2 次元に拡張した Extended QSA (EQSA) を実プラントデータ（住友化学提供）に適用し、バルブスティクションを検出できることが示された。この手法においても、A 法および B 法と同様に固着を定量化できる。しかし、これらすべての手法に共通の問題として、データのスケールリングをどのように行えばよいかという問題がある。標準化（分散 0）や計器レンジの利用などが考えられるが、標準化する場合には閾値をチューニングする必要が生じてしまい、計器レンジを利用する場合にはレンジを入力する必要が生じてしまう。できるだけ手間を省き、かつ高い性能を実現できるスケールリング方

法を見いだす必要がある。これまでの固着検出方法は、弁開度あるいはその代用として流量を用いることを前提としてきた。これは、液レベルなど遅れの大きな変数を利用すると、コントローラ出力と液レベルの関係を2次元平面上の平行四辺形として捉えることができなくなるためである。しかし現実には、流量が測定されていない液レベル制御ループも存在するため、液レベル測定値から固着を検出できる手法の開発が望まれてきた。そこで、コントローラ出力と液レベルの関係をそのまま解析するのではなく、極座標に変換した後に解析する方法が提案された。液レベル制御の場合、元の平面上ではデータの軌跡は楕円状になるが、固着が発生すると、楕円の両端に角ができる。極座標を利用すると、この角を明確に検出することができる。なお、極座標表現を用いる方法は平均値変化（設定値変更に対応）の影響を強く受けってしまう恐れがあるが、液レベル制御の場合、設定値を変更することは希であり、実用上問題ないと考えられる。

4-3. 作業報告：PID制御の性能評価

加納 学，丸田 浩（京都大学）

最小分散制御をベンチマークとする制御性能評価手法について、概要をまとめた解説があった。さらに、プロセスを一次遅れとむだ時間で近似できるとして、連続時間システムと離散時間システムとで定式化した場合の違いや、設定値変更時と外乱付加時の違いに焦点をあてて、PID制御の性能評価方法に関する説明があった。ステップ状設定値変更の場合、PID制御で達成可能な制御性能（偏差の分散で評価）は概ねむだ時間のみに依存し、時定数や定常ゲインの影響は受けない。実際、制御系の閉ループ伝達特性がむだ時間のみに依存する新しいPID調整則が提案され、その調整則によって **Harris Index=0.88** 程度の制御性能をPID制御によって実現できることが示された。これは必ず実現できる性能である。一方、PID制御パラメータを最適化しても **Harris Index=0.93** 程度しか実現できない。したがって、ステップ状設定値変更に関しては、PID制御によって達成可能な、あるいは目標とすべき制御性能はおおよそ **Harris Index=0.9** と結論づけられる。一方、遅れを伴う外乱の場合、PID制御で達成可能な制御性能はプロセスおよび外乱の動特性に依存し、**Harris Index** の最大値が **0.5** 以下となる場合もある。したがって、プロセスに外乱が付加されている状態では、PID制御の性能を従来法で正しく評価するのは極めて困難である。上記の他に、I-PD制御の性能評価、むだ時間の推定方法、設定値データを活用した制御性能評価方法、既存のチューニング法によって達成される制御性能（**Harris Index**）などについて検討する必要がある。

4-4. その他

- ・計測自動制御学会にて、プロセスとコントローラの状態監視に関する特集が組まれる予定である。山下（東北大学）と加納（京都大学）がゲストエディタとして取り纏めにあたり、WS 25参加者にも原稿を執筆していただく。7月頃に正式な執筆依頼がある予定。それまでに、執筆者と内容について議論を進める。
- ・最終研究会を5～6月に開催することとし、それまでに最終報告書の原稿第一版を完成させる。4月末頃を原稿提出期限とし、加納が取り纏める。詳細は後日連絡。
- ・WS 25の成果として、開発したソフトウェアを配布する。最終研究会に合わせてリリース予定。

5. 配付資料

- 1) 4-1, 4-3 解説資料
- 2) 4-2 解説資料

[予定]

- ・第14回研究会（最終とする予定） 5～6月頃 場所未定

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.25・第14回研究会議事録

1. 日 時：2004年6月18日（金）13:00～18:30
6月19日（土） 9:20～12:30

2. 場 所：京都大学百周年時計台記念館 会議室 IV
(京都市左京区吉田本町)

3. 出席者：17名（順不同，□出席，■欠席）

<大学> □加納学（京都大学）□山下善之（東北大学）■大嶋正裕（京都大学）■山本重彦（工学院大学）■大野弘（神戸大学）□黒岡武俊（富山大学）□橋本芳宏（名古屋工業大学）

<企業> □重政隆（東芝ITコントロール）□西澤淳（三菱化学）□栗原久光（出光興産）□樋口文孝（出光興産）■喰田秀樹（出光石油化学）■宮川基彦（インベンシスシステムズ）□大宮司理晴（ジャパンエナジー）□白川義之（ジャパンエナジー）□滝波明敏（昭和電工）□久下本秀和（住友化学工業）□清水佳子（東芝）□行友雅徳（東芝）■村田尚（東洋エンジニアリング）□野口芳和（日揮）
[代理：昆潤一郎] □松尾徹（三井化学）■松尾文晴（三井化学）■清水雅嗣（横河電機）

<学生> □杉浦慶子（名古屋工業大学）[作業補助・講演資料作成と配布]

4. 内 容

4-1. 講演：PID コントローラーおよび MPC の性能監視

昆潤一郎氏（日揮）

制御性能監視の目的とニーズについて解説があった後、市販の制御性能監視ソフトウェア（Aspen Watch / Aspen PID Watch, PlantTriage, LoopScout, ProcessDoctor, Control Monitor）についての紹介があった。さらに、日揮で導入された ExperTune 社の PlantTriage について、詳細な解説があった。現状では、汎用的で、かつ制御性能を絶対的に評価できる指標が存在しないため、複数の指標をユーザが組み合わせて使用している。このため、各種市販ソフトウェアが提供する指標も大差はなく、使いやすさで差別化が行われている。例えば、PlantTriage では、ユーザが指定する複数の指標の加重和で制御性能を評価し、順位付けしたリストが提示されるようになっている。

4-2. 作業報告：高次統計量による非線形性の検出

橋本芳宏氏，杉浦慶子氏（名古屋工業大学）

高次統計量を利用して、プロセス運転データからプロセスの非線形性を検出する方法について、これまでの検討結果が報告された。これまでに文献で報告されている結果の追試を実施したが、同じ結果は得られなかった。この原因としては、ソフトウェアの問題（精度・バグ）が考えられる。文献で非線形性が検出できたとされる場合も、その結果が数値誤差に影響されている可能性を否定できないので、理論的な検討も含めて、引き続き検討が必要であるとの見解が示された。

4-3. 文献紹介と適用結果報告

下記の文献紹介および適用結果報告があった。

4-3-1. 担当者：西澤淳氏（三菱化学）

Warren Mitchell and David Shook (Matrikon Inc.):

Finding the Needle in the Haystack - an Innovative Means of Visualizing Control Performance Problems,
ERTC (2004)

制御性能監視結果を直感的に把握するためのインタフェース技術を提案している。

4-3-2. 担当者：滝波明敏氏（昭和電工）

K. Bakker, C. Seppala, R. Snoeren, Frederic Viel (Shell Global Solutions):

How to maintain the optimum performance of your Advanced Process Control and Real Time Plant

Optimizer?

ARTC Computing (2002)

SGSI 社のツール紹介だが、導入メリットが過大評価されているとの疑念が残る。

4-3-3. 適用結果報告：Harris Index に関する一スタディ

樋口文孝氏（出光興産）

エチレン系プロセスの計 70 個の TIC ループに対して、Harris Index を算出した結果が報告された。利用したデータは 1 分周期 1 日分であり、ARMA(30,30)モデルを前提として、むだ時間 1～20 に対応する Harris Index の計算結果が示された。Harris Index が 1 を超えるループが複数存在したが、これらのループはマニュアル制御ループであった。これは、PV トラッキングを実施しているため、完璧な制御が実現できていると解釈されてしまうためである。また、Harris Index の大きな（評価の高い）ループは制御量の振動が小さく、Harris Index の小さな（評価の低い）ループは制御量の振動が大きい傾向が確認された。70 ループの評価結果を概観すると、正確なむだ時間を求めることに労力を費やすことなく、適当な範囲のむだ時間に対して Harris Index を求め、その範囲内で明らかに評価の悪いループを特定するという利用方法が有効であると考えられる。なお、今回の検討については、モデル次数が大きすぎる可能性がある。

4-3-4. 担当者：山下善之氏（東北大学）

Alexander Horch:

A simple method for detection of stiction in control valves,

Control Engineering Practice, 7 Pages 1221-1231 (1999)

調節弁固着検出法を提案しているが、検出精度が低くて実用に耐えないと思われる。

4-3-5. 担当者：山下善之氏（東北大学）

N.F. Thornhill, B. Huang, and H. Zhang:

Detection of multiple oscillations in control loops,

Journal of Process Control, Volume 13, Pages 91-100 (2003)

自己相関関数のゼロクロスを利用した周期振動検出法を提案している。

4-3-6. 担当者：松尾徹氏（三井化学）

Nina F. Thornhill, M. A. A. Shoukat Choudhury, and Sirish L. Shah:

The impact of compression on data-driven process analyses,

Journal of Process Control, Volume 14, Issue 4, Pages 389-398 (2004)

データ圧縮がデータ解析に及ぼす影響について解説している。圧縮されていないデータを利用すべき。

4-3-7. 担当者：久下本秀和氏（住友化学工業）

Alexander Horch and Alf J. Isaksson:

Assessment of the sampling rate in control systems,

Control Engineering Practice, Volume 9, Issue 5, Pages 533-544 (2001)

むだ時間の短いループの性能を評価するためにデータを補間する方法を提案しているが、ここまで無理をして最小分散制御ベンチマークを利用する必要があるのか疑問が残る。

4-3-8. 担当者：行友雅徳氏（東芝）

Ramesh Kadali and Biao Huang:

MULTIVARIATE CONTROLLER PERFORMANCE ASSESSMENT WITHOUT INTERACTOR MATRIX — A SUBSPACE APPROACH, ADICHEM (2004)

部分空間法を用いて多変数プロセスモデルを同定した後、制御性能監視を行う方法が提案されている。

4-3-9. 担当者：加納@京都大学

Christopher A. McNabb and S. Joe Qin:

Projection based MIMO control performance monitoring: I??covariance monitoring in state space,

Journal of Process Control, Volume 13, Issue 8, Pages 739-757 (2003)

部分空間法を用いた多変数プロセスの制御性能監視法を提案している。主成分分析を利用して、共分散を評価に利用する点に特徴がある。

4-4. その他

- ・ 7月末を目標に最終報告書を完成させる。
- ・ 計測自動制御学会にて、プロセスとコントローラの状態監視に関する特集が組まれる。7月頃に正式な執筆依頼がある。
- ・ 1年後を目処に、制御性能監視技術の導入状況や新しい展開についての情報交換を行うための会合を持ちたい。引き続き、意見交換の場としてメールリストを利用する。

以上