

第3章 定性的形状解析を用いた制御性能監視

定性的形状解析を用いた制御性能監視手法についての解説と検証

執筆者

山下 善之

東北大学 大学院工学研究科化学工学専攻

3.1. はじめに

化学プラントの制御ループにおいて、制御性能を劣化させる原因の多くはバルブスティクションであることが知られている。Ender[1]は、ある製紙業プラントにおいて、制御ループの20%以上がバルブスティクションが原因で振動していたと報告している。

バルブスティクションを検出しようとする研究は、これまでもいくつか報告されている。例えば、Horch[2]は、被制御変数 $y(t)$ と制御信号 $u(t)$ との相互相関関数を用いて信号の位相シフトを求めることによって、検出された振動の発生原因がスティクションであるか外乱であるかを判別する手法を提案している。

Rengaswamy[3]は、定性的形状解析の手法を使って制御信号の波形を解析し、制御ループの振動の検出とその原因同定を行う手法を提案した。有力な手法ではあるが、制御信号の経時変化が三角波か方形波かといった判断だけでは、その性能には自ずと限界がある。

そこで、定性的形状解析の手法を X-Y プロットの解析にも適用できるように拡張し、バルブの入出力データの X-Y プロットを解析してスティクションを検出する方法を開発した [7]。

3.2. 定性的形状解析

3.2.1. 1変数信号の定性的変化

1変数の信号の経時変化を定性的に記述するための一番簡単な方法は、その信号が増加傾向にあるか、減少傾向にあるか、一定であるかを記述する方法である。増加、減少、一定をそれぞれ I, D, S で記述することにすると、これらの記号列によって、時系列を定性的に記述できることになる [4]。図1に、これら3つの記号に対応する挙動を経時変化として示した。

各時点で、これらの記号を求めるには、変数の時間微分を求めれば良い。ノイズが存在しないならば、現在と一ステップ前の時点における変数の値の差分から簡単に計算できることになる。もちろん、どこまでが一定でどこからが増加かといった判定をするための閾値が必要となる。実際には、ノイズのような細かな変動を拾わないようにするために、必要に応じて適切なフィルタリングを施しておくことも重要である。

3.2.2. 2変数信号の定性的挙動

2変数の経時変化を定性的に記述するためには、それぞれの変数についての定性的変化を記述する方法も考えられるが、ここでは、2変数を X-Y プロットした平面内での挙動を記述することとした。

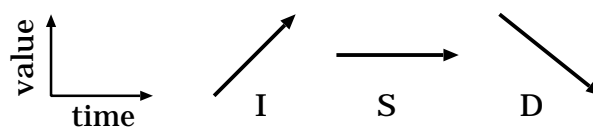
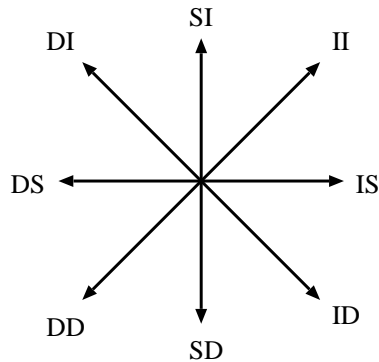


図 1: 時系列信号の経時変化の記号表現 (Increasing (I), Steady (S) and Decreasing (D))

表 1: 2 変数信号の経時変化の記号表現

| $x \backslash y$ | D | S | I |
|------------------|----|----|----|
| I | ID | IS | II |
| S | SD | SS | SI |
| D | DD | DS | DI |

図 2: $X - Y$ プロット中の定性的挙動

2 変数の定性的挙動は各変数の定性的変化の組み合わせとして表 1 のように 9 種類の記号で表現できる。それぞれの定性的な挙動を図で表すと、図 2 のようになる。ただし、SS は $X - Y$ 平面内では動かない点であるので、ここには描いていない。

これらの記号を 1 次元に並べた記号列によって、平面内の動的挙動が表現されることになる。例えば、(IS SD DS SI) によって、正方形の時計回りの動きが表される。

連続して同じ定性値が続く場合には、それらをまとめて記号の後の数字で表現することにする。例えば、(IS IS SI SI SI) は (IS² SI³) のように表現することになる。

3.3. バルブスティクションの検出法

3.3.1. 固着検出指標

最も単純な方法は、IS と DS のパターンだけを検出する方法である。この考えに基づいて、これら 2 つのパターンの占める時間的な割合を求めると次式が得られる。

$$\rho_1 = (\tau_{IS} + \tau_{DS}) / (\tau_{\text{total}} - \tau_{SS}) \quad (1)$$

ここで、 τ_{total} は時間窓の幅を、 τ_{IS} と τ_{DS} は、それぞれ、IS および DS のパターンの占める時間である。この値は、 $0 \leq \rho_1 \leq 1$ であり、この値の大きいということは、制御出力が変化してもバルブが動かないということであるから、バルブスティクションの発生している可能性が高いということになる。したがって、この値をバルブスティクションの検出指標として用いることができることになる。極端な場合として、バルブが全く動かない場合には、 $\rho_1 = 1$ となる。

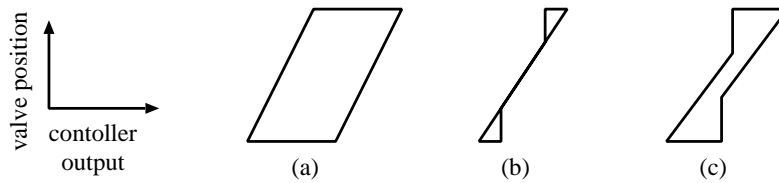


図 3: スティックション発生時の典型的なバルブ入出力挙動 ((a)deadband, (b) slip-jump (c)deadband + slip-jump)

3.3.2. スティックションパターン検出指標

スティックション発生時の典型的な X-Y プロットの形状は、図 3 のようになる。

そこで、上述の定性的挙動解析の手法を用いて、これらの典型的なパターンを検出することによって、スティックションを検出する手法を開発した。具体的には、IS の次に II が来るパターンと DS の次に DD が来るパターンのみを抽出し、これらのパターンの全体に占める時間的な割合をスティックションの検出指標とする。

$$\rho_2 = (\tau_{IS II} + \tau_{DS DD}) / (\tau_{total} - \tau_{SS}) \quad (2)$$

ここで $\tau_{IS II}$ と $\tau_{DS DD}$ はそれぞれ (IS II) また (DS DD) パターンの占める時間である。

さらに (IS SI) や (DS SD) といったパターンを加えた指標として ρ_3 も定義できる。

$$\rho_3 = (\tau_{IS II} + \tau_{IS SI} + \tau_{DS DD} + \tau_{DS SD}) / (\tau_{total} - \tau_{SS}) \quad (3)$$

ここで、 $\tau_{IS SI}$ は (IS SI) パターン中での IS パターンの時間 $\tau_{DS DD}$ は (DS DD) パターン中での DS パターンの時間である。

3.4. 適用例

3.4.1. 適用データ

前節の検出方法を、住友化学工業の実プラントデータに適用し、その有効性を検証した。ここで用いた 4 つのデータは、それぞれ 1 分周期の 1440 分間のデータであり、その外観を図 4 に示した。ここで、左側の図中の実線は流量を、破線は制御出力であり、その X-Y プロットを右側に示してある。

ここで、現場での観察結果としては、ループ 1 と 3 は液面制御系、ループ 2 と 4 は流量制御系である。ループ 1 と 2 はバルブのスティックションが起っていると推察されている。ループ 3 は制御系の調整不良、スティックションでは無いと考えられている。ループ 4 は、およそ 900 分と 1150 分の辺りで外乱が混入しているデータである。

3.4.2. 適用結果

まず、制御出力と流量の X-Y プロットを定性的な記号列に変換した。その際、各変数の平均と標準偏差とを用いて規格化し、時間差分の標準偏差を閾値として定性的記号に変換し、制御出力と流

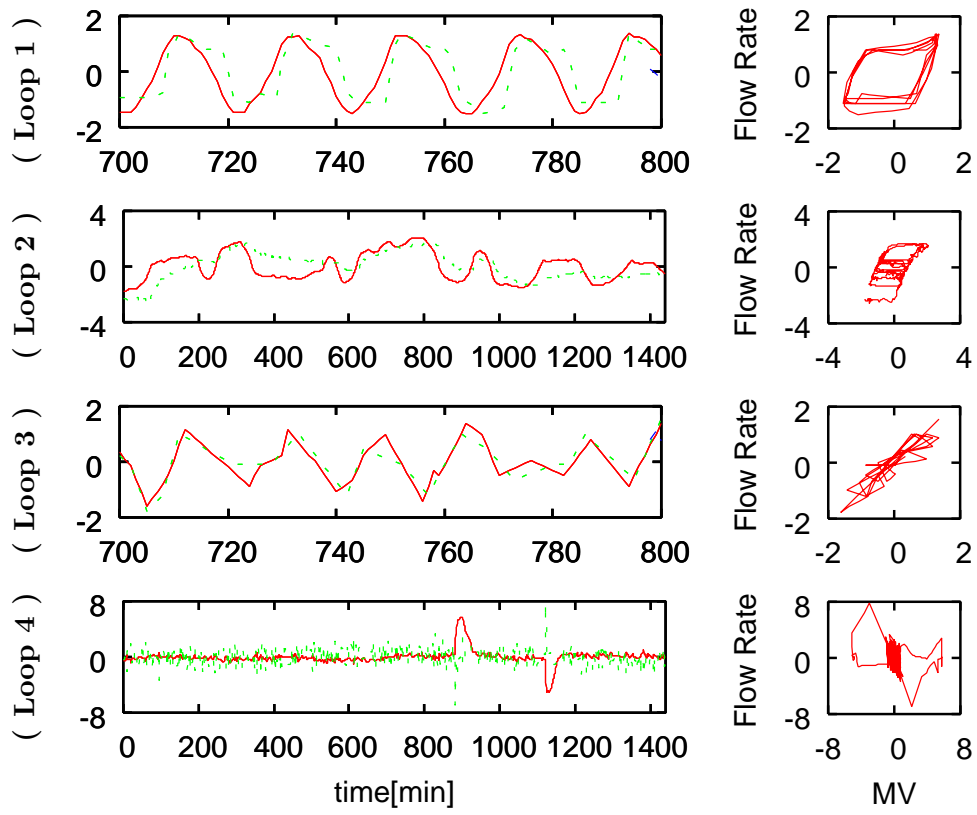


図 4: 実プラントデータ (左側図中の実践は流量, 破線は制御出力 (MV))

表 2: 制御ループの特徴と解析結果

| Loop description | | ρ_1 | ρ_2 | ρ_3 |
|------------------------|-----------------------------------|----------|----------|----------|
| Loop 1: Level Control. | thought to have a valve stiction. | 0.620 | 0.555 | 0.587 |
| Loop 2: Flow Control. | thought to have a valve stiction. | 0.552 | 0.390 | 0.442 |
| Loop 3: Level Control. | thought to have a tuning problem. | 0.296 | 0.101 | 0.103 |
| Loop 4: Flow Control. | thought to have disturbances. | 0.286 | 0.000 | 0.024 |

表 3: 定性化の際の閾値の ρ_3 への影響

| | 0.1σ | 0.5σ | σ | 1.5σ | 2σ |
|--------|-------------|-------------|----------|-------------|-----------|
| Loop 1 | 0.377 | 0.669 | 0.587 | 0.276 | 0.007 |
| Loop 2 | 0.158 | 0.344 | 0.442 | 0.377 | 0.226 |
| Loop 3 | 0.067 | 0.113 | 0.103 | 0.096 | 0.139 |
| Loop 4 | 0.030 | 0.021 | 0.024 | 0.053 | 0.013 |

量をまとめた後、連続する定性値をまとめて記号列とした。一例として、ループ 1 の最初の 10 個の要素を示すと次のようになる。(SS1 DS4 DD1 SD2 SS3 IS3 II1 SI1 SS6 DS3)。

各データについて、変換後の記号列から IS と DS の部分を抽出して、指標 ρ_1 を求めた結果を表 2 にまとめた。

この結果より、ループ 1 と 2 は比較的大きな値を示しており、スティクションが起っていると判断できる。ループ 3 や 4 も比較的大きな値を示しており、この指標からはスティクションが起っていると判断されてしまうが、実際にはそうではない。

次に、抽出するパターンを限定することによって、さらに指標 ρ_2 を求めた結果も同じ表に示した。この指標の場合にはループ 1 と 2 でのみ大きな値となっており、ループ 3 や 4 ではあまり大きな値とはなっていない。したがって、この指標によって、外乱や制御系の調整不良を誤判定すること無く、スティクションを正しく検出することができた。

さらに、(IS SI) と (DS SD) のパターンを追加することによって指標 ρ_3 を求めたところ、 ρ_2 と良く似た傾向を示したが、スティクション発生時の指標の値が若干向上していることがわかる。

3.4.3. 閾値の影響

各変数を定性化する際の閾値の設定については任意性があるため、その設定によって検出指標の値がどのように変化するかを検討した。表 3 にいくつかの閾値を用いた場合の ρ_3 の値の算出結果をまとめた。

この結果より、以下のようなことがわかる。すなわち、例えば 2σ のように閾値を大きく設定しすぎると、定性値 S に分類される点が多くなり過ぎてしまい、その結果として指標も小さな値しか取らなくなってしまう。逆に 0.1σ のように閾値を小さく設定しすぎると、ほとんどの点が S 以外に分類されるようになってしまい、その結果として、やはり指標は小さな値となってしまう。この結果を見る限りでは、おおむね $0.5\sigma \sim 1.5\sigma$ 程度の閾値であれば、比較的良好な指標が得られているよう

に見て取れる。

3.5. まとめ

定性的形状解析の手法を2変数の平面内の動的挙動を扱えるように拡張し、この方法を応用してバルブスティクションの検出指標を開発した。実プラントのデータに適用して検証したところ、スティクションの発生を非常に良好に検出できることが示され、外乱や制御系の調整不良とも区別できることが実証された。

参考文献

- [1] Ender, D. B., “Process control performances. Not as good as you think.,” *Control Engineering*, **40** (1993) 180–190.
- [2] Horch, A., “A simple method for detection of stiction in control valves,” *Control Engineering Practice*, **7** (1999) 1221–1231.
- [3] R. Rengaswamy, T. Hägglund and V. Venkatasubramanian, “A qualitative shape analysis formalism for monitoring control loop performance,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **14**, 23–33 (2001)
- [4] Raghunathan Rengasamy, “A Framework for Integrating Process Monitoring, Diagnosis and Supervisory Control,” PhD Thesis, Purdue University (1995)
- [5] 中山拓, 山下善之, 松本繁, 「プロセス時系列における振動の原因同定に関する一考察」, 化学工学会第36回秋季大会講演要旨集, 仙台 (2003)
- [6] 山下善之, 久下本秀和, 加納学, 丸田浩, 「運転データを用いる調節弁固着検出法」, 化学工学会第69年会講演要旨集, 大阪 (2004)
- [7] Yoshiyuki Yamashita, “Qualitative Analysis for Detection of Stiction in Control Valves,” *Proceedings of 8-th International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information & Engineering Systems (KES 2004)*, Wellington, September (2004)