

定性モデルを用いたプラント構造の設計支援システム に関する考察

An computer-aided system for planning of process operations by using a qualitative model

星 憲司, 山下 善之, 鈴木 睦

Kenji Hoshi, Yoshiyuki Yamashita, Mutsumi Suzuki

東北大学大学院 工学研究科 化学工学専攻

Department of Chemical Engineering, Tohoku University

キーワード : planning, synthesis, batch plant, operating procedure, qualitative reasoning

連絡先 : 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉07 東北大学大学院 工学研究科 化学工学専攻 鈴木研究室

星 憲司 Tel.: (022)217-7266, Fax.: (022)217-7293, E-mail: hoshi@pse.che.tohoku.ac.jp

1. はじめに

化学プラントにもフィールドバスの導入が始まりつつあり, 分散環境下でのより柔軟なプロセスコントロールシステムの構築が可能となってきた. プロセス計測機器やプロセスユニットをどのように配置するかといった設計問題は, これまでにも増して大きな自由度を持つようになり, 運転操作も含めた形での設計問題が今後の新たな課題となってくる事が予想される. ここでは, そのための第一段階として, バッチプラントの操作手順の自動生成問題を取り上げる.

プラントの操作手順の自動生成の問題は, ある与えられた初期状態から目的の状態へとプラントを移行させるための操作を計画する問題である. この問題は, 本質的には, 操作変数の値の範囲や許される手順と許されない手順などのさまざまな制約条件の下での複雑な組み合わせ最適化問題と

なる.

従来より, 様々な研究が論理ベースを中心に行われてきた. 例えば, シーケンス論理を用いる方法(Rivas and Rudd, 1974), 状態遷移ネットワークからの論理推論による方法(Ivanov, 1984), プロセストポロジーと操作の時間的順序を表す命題論理を用いる方法(Tomitaら, 1986) 単調推論の枠組みの中で論理的な定性モデルを用いる方法(Fusillo and Powers, 1988), 非単調推論に関数オペレータを導入した方法(Lakshmanan and Stephanopoulos, 1988, 1990) などが研究されている. これらの研究は, それぞれ異なる手法を用いているが, 操作手順に対する論理的な制約をある程度効率的に扱うことができることを示している.

実際には, プロセスの設計をも含めてさらに定量的な最適化が必要であるが, この問題はなかなか難しい問題である. これまで, 有向グラフから操作手順を生成した研究(Foulkesら, 1988), 定性

モデルを使って妥当なバッチ操作を生成した研究 (Rotsteinら, 1992), ペトリネットを拡張したモデルからバッチ操作を生成した研究 (Shankarら, 1998) などが行われている。

装置の挙動は物理モデルによって表すことができるはずなので、究極的には各装置の物理モデルの情報とプラントの構造に関する知識のみから操作手順を生成することも可能であると考えられる。ここではそのための思考実験として、物理モデルに基づいた定量的シミュレーションと定性モデルによる制約を組み合わせ、必要な低レベルの操作を自動的に決定するためのシステムを試作した。このシステムにより、化学プロセスの構造と現在のプロセス状態、移行したい次のプロセス状態を与えた時に、その移行が可能かどうかを判定し、また可能なら具体的な操作手順を生成し、さらに目的の状態に到達するための時間を算出することができるようになる。

2. 操作手順探索システム

2.1 システムの概要

Fig. 1に、タンク、バルブ、ヒーターから構成される単純なバッチプロセスの構造を示す。このプロセスを例として、タンク1に液体を注入して加熱する動作について、本システムが操作手順を自動生成する過程を示す。

タンク1の液面と液温については目標値が定められている。目標値にはFig. 2に示すように上限と下限を指定し、目標値を持つ変数を全てこの範囲に収めることを操作の目的とする。

多くの場合、変数が目標範囲から離れる方向に動く操作以外を実行すれば各変数は目標値に近づいていくことが期待される。目標値が振動的な状態である場合や、各段階の操作で途中増減が必要な場合等を除外すればそのような操作を何段階か繰り返す操作手順を探索することで、全目的を達

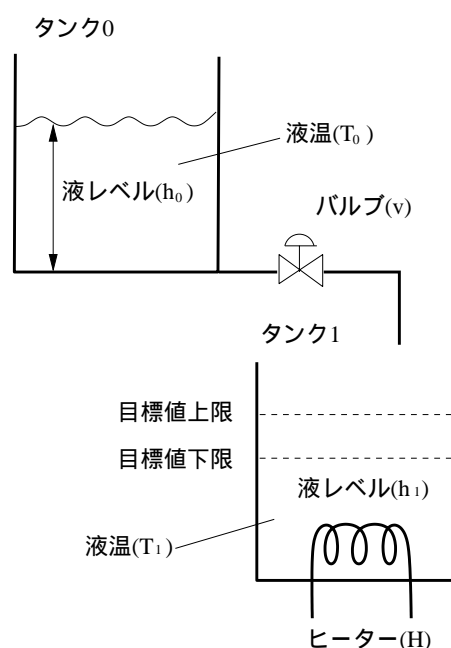


Fig. 1 液体加熱プロセス

成する操作手順を発見することができる。

2.2 操作手順の生成過程

実際の操作手順の生成は、以下の4段階の過程を繰り返し実行することによって行う。

- 1) 現在実行できる操作の列挙
- 2) 有効な操作の抽出
- 3) シミュレーション
- 4) プロセス状態の判定

以下の節で、それぞれの過程について説明する。

2.3 現在実行できる操作の列挙

Fig. 1のプロセスで、操作可能なオブジェクトはヒーターとバルブで、ヒーターに操作変数 H 、バルブに操作変数 v を割り当てる。ここでは可能な操作は OFF/ON または CLOSE/OPEN の2通りのみとし、操作変数はこれらに対応する値 0/1 をとるブール変数として扱う。すると可能な操作は

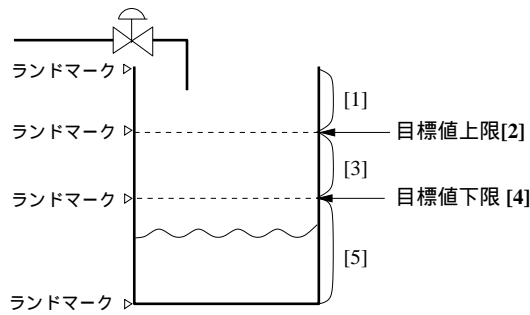


Fig. 2 ランドマークと目標値

- 操作1: $H=0, v=0$
 操作2: $H=0, v=1$
 操作3: $H=1, v=0$
 操作4: $H=1, v=1$

の4通りである。これがFig. 4に示した1段目の分岐である。 n 個の操作可能なオブジェクトがあった場合は、可能な操作の数は 2^n 通りとなる。

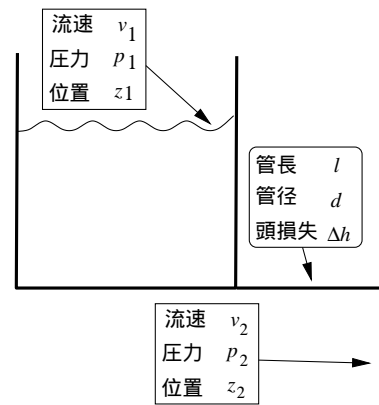
2.4 有効な操作の抽出

列挙した 2^n 通りの操作の中から、目標状態に到達する可能性のある操作を抽出する。これは、変数間の定性的な影響関係を用いてプロセスの状態変数が目標値から離れる方向に変化する操作を見つけ、それを除外する作業である。除外された操作に関する探索はここで打ち切れ、次項のシミュレーションは実行されない。不適な操作を除外する具体的な方法については、後の章で説明する。

2.5 シミュレーション

全ての有効な操作について、その操作を行った結果を物理モデル(富田,1982)に基づくシミュレーションによって求める。各シミュレーションは現在の状態から開始し、プロセスの状態が変化するまで続けて実行する。プロセスの状態が変化したかどうかの判定は、ランドマークを用いて行う。

ランドマークとは、ここでは温度、液レベルなどの状態変数が取る実数の範囲に定めたいくつかの代表値である。ここでは h_0, h_1 と T_0, T_1 がそれ



v, v_1, v_2	流速	p_1, p_2	圧力
z_1, z_2	位置	g	重力加速度
ρ	流体の密度	μ	流体の粘度
Δh	頭損失	d	管径
l	管長		

Fig. 3 物理モデル

ぞれ液レベルと液温を表す状態変数である。Fig. 2に、Fig. 1のプロセスのタンク1の液レベルについて定めたランドマークの例を示す。Fig. 2の左側に示した4点がランドマークである。ランドマークには、状態変数が取り得る最小値、最大値を指定する。また状態変数が目標値を持つ場合には目標値の上下限值も指定する。これ以外にもランドマークが必要な場合があるが、その場合は手動でランドマーク値を指定している。

シミュレーションの結果、いずれかの操作変数の値が変化してがランドマークに達した時に、プロセスの状態が変化したと判定される。

2.6 物理モデル

シミュレーションで使った流動の物理モデルは以下の通りである。(Fig. 3)

ベルヌーイ則

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \Delta h \quad (1)$$

ワイズバッハの式

$$\Delta h = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

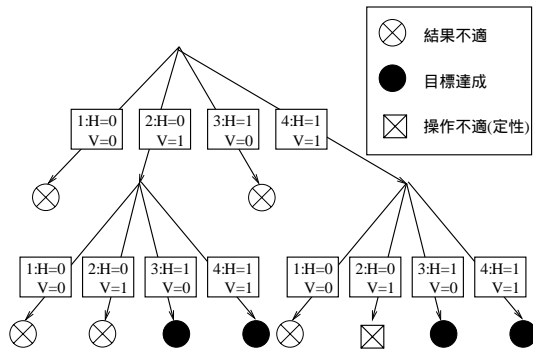


Fig. 4 探索結果

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (3)$$

$$Re = \frac{dv\rho}{\mu} \quad (4)$$

2.7 プロセス状態の判定

シミュレーションが停止した時、その原因は以下の4種類に分類される。

- 1) 状態変数が目標と反対方向に変化した
- 2) 状態変数が目標を満たす方向に変化した
 - (a) 全ての状態変数が目標を満たした
 - (b) 目標を満たしていない変数がある
- 3) 目標値を持たない状態変数がランドマークに達した

1) の判定は以下のように行われる。

目標値を持つ状態変数の値は、Fig. 2 の右側に示すように、目標値上限より大きい[1]、目標値上限[2]、目標範囲内[3]、目標値下限[4]、目標値下限より小さい[5]のどれかにラベリングすることができる。ランドマークに達した変数のラベル値を前回と比較して、[2] [1] と [4] [5] の変化が生じている場合は、目標内にあった値が目標外になったことを意味するので、1)であると判断される。また、[1]、[5]の範囲にある状態変数が、目標値と反対方向の変化を示した場合と、シミュレーションを規定ステップ繰り返しても状態が変化しなかつ

た場合も 1) であると判定する。

プロセス状態が 1) の場合は探索が打ち切られる。2)-(a) の場合は目標状態に達しているとして、ここまでの操作手順を出力して探索を打ち切る。それ以外の場合は、最初のステップに戻り、次の操作を探索する。

以上の方法で状態変数を目標値に近づける操作を順に実行し、最終的に目標のプロセス状態に到達する操作手順を発見することができる。探索手順が各操作によって分岐していく様子をFig. 4 に示す。

3. 定性的情報の利用

前述のように、本システムでは列挙した 2^n 通りの操作の中から目標状態に到達する可能性のある操作を抽出する際に、変数間の定性的な影響関係を用いて不適な操作を除外している。

プロセスの構造情報から、変数が他の変数に与える影響をデータベース化して保持し、その情報と現在のプロセス状態より、不適な操作を論理式として表現することができる。また、現在の目標に影響を持たない変数の値を固定することにより探索範囲を限定することも可能である。以下ではその方法を説明する

3.1 変数間の定性的関係

Fig. 5 のプロセスを例として、変数間の定性的関係の表現方法を示す。液レベルに関して、変数間の定性的な関係を

$$v_0 \cdot h_0 \xrightarrow{-} \frac{dh_0}{dt} \quad (5)$$

$$v_0 \cdot h_0 - v_1 \cdot h_1 \xrightarrow{+} \frac{dh_1}{dt} \quad (6)$$

と表現する。 $\xrightarrow{+}$ は、左辺が右辺を助長するという関係を示している(鷲尾,1990)。すなわち左辺

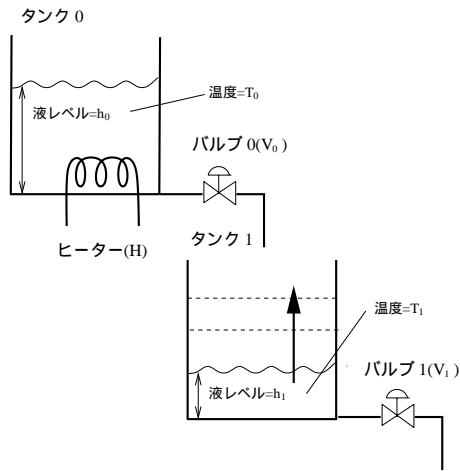


Fig. 5 変数間の定性的関係

の値が増加すると右辺の値は増加するという関係を持つ。

また \rightarrow は左辺が右辺を抑制するという関係を表し、左辺の値が増加すると右辺の値は減少するという関係を持つ。

この表現法によれば、液の温度が持つ定性的関係は

$$v_0 \cdot h_0 \cdot (T_0 - T_1) \xrightarrow{+} \frac{dT_1}{dt} \quad (7)$$

$$H \xrightarrow{+} \frac{dT_0}{dt} \quad (8)$$

と表せる。

3.2 不適当な操作の検出

このように表現された変数間の関係を用いて、操作変数間の制約を条件式の形で求めることができる。

Fig. 5 の例では、タンク1の液レベル h_1 が目標値下限よりも低いため、 h_1 を減少させる操作は不適当である。つまり dh_1/dt は負であってはならない。

dh_1/dt に影響を与える変数は、式(6)により得ることができる。 $dh_1/dt \geq 0$ で状態変数 h_0, h_1 の符号は分かっており、操作変数 v_0, v_1 はブール変数で 0 または 1 の値しか取らないことを利用する

と、 v_0, v_1 の間に成立する関係を得ることができる。ここでは

$$v_1 \Rightarrow v_0 \quad (9)$$

である。これを

$$\overline{v_1 \wedge v_0} = \overline{v_1} \vee v_0 \quad (10)$$

の形式で表現しておけば、操作変数 v_0, v_1 の値を式(10)に代入した時の真偽値によって、この操作が不適当であるかどうかを知ることができる。

以上のように、定性的な関係を用いて、操作変数間に制約を課すことができる。このような論理式を目標値を持つ全ての状態変数について作成し、条件を満たさない操作は不適当として探索を打ち切ることにより、探索範囲を限定している。

3.3 因果関係を持たない操作変数の固定

式(5)～式(8)を左辺から右辺に再帰的にたどっていけば、ある状態変数に因果関係を持つ操作変数のリストが得られる。ただしここでは状態変数の微分値は将来の状態変数に影響を与えないと考え

$$dh_0 \longrightarrow h_0 \quad (11)$$

のような関係もたどる事にする。現在着目している目標値を持つ状態変数に影響を与えない操作変数の値を固定することにより、探索範囲を限定することができる。

4. 操作手順の生成例

例として Fig. 6, Table 1, Table 2 で示した構造と目標値を持つプロセスに対して操作手順の探索を行った。このプロセスは、温水と冷水の入ったタンクの液体を混合し、3種類の温度の液体を指定した液レベルまで満たすというものである。

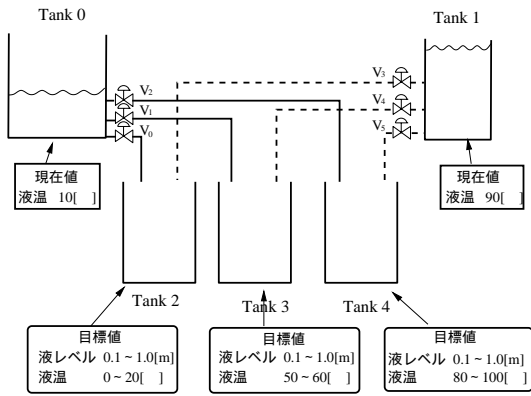


Fig. 6 プロセス構造

Table 1 初期状態

Tank 0	直径=1.0[m] 高さ=1.0[m] 設置位置=1.0[m] 温度=10[] 内容物=水 500[kg] 液レベル=0.63[m]
Tank 1	直径=0.3[m] 高さ=1.0[m] 設置位置=1.0[m] 温度=90[] 内容物=水 70[kg] 液レベル=1.0[m]
Tank 2 ~ 4	直径=0.3[m] 高さ=1.0[m] 設置位置=0[m] 内容物=なし
Pipe 0 ~ 5	直径=0.01[m] 長さ=1.0[m] バルブあり

Table 2 目標状態

タンク番号	目標状態
Tank 2	液レベル=0.10 ~ 1.0[m] 液温=0 ~ 20.0[]
Tank 3	液レベル=0.10 ~ 1.0[m] 液温=50.0 ~ 60.0[]
Tank 4	液レベル=0.10 ~ 1.0[m] 液温=80.0 ~ 100.0[]

Table 3 操作手順1

時刻[s]	v_0	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
0.0	1	1	0	0	1	1
23.2	1	0	0	0	0	0
28.2	0	0	0	0	0	0

タンク番号	実行終了時の状態
Tank 2	液レベル=0.10[m] 液温=10.0[]
Tank 3	液レベル=0.18[m] 液温=53.6[]
Tank 4	液レベル=0.10[m] 液温=90.0[]

Table 4 操作手順2

時刻[s]	v_0	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
0.0	1	1	0	1	1	0
12.5	1	0	0	0	0	0
43.8	0	0	0	0	0	1
67.9	0	0	0	0	0	0

タンク番号	実行終了時の状態
Tank 2	液レベル=0.21[m] 液温=20.0[]
Tank 3	液レベル=0.10[m] 液温=54.3[]
Tank 4	液レベル=0.10[m] 液温=90.0[]

探索の結果、214 種類の操作手順が生成した。そのうち2つを Table 3 , Table 4 に示す。

操作変数が6個で3段までの分岐を行っているので、探索の打ち切りを行わなかった場合に必要な探索数は $2^{6 \times 3} + 2^{6 \times 2} + 2^{6 \times 1} = 266304$ [通り] となる。このうち定性推論により128000通り(48.1%)、シミュレーション結果により5056通り(1.90%)が不適な操作とされ、実際にシミュレーションが行われたのは全体の約50%であった。

5. おわりに

プロセスの構造情報と、目的とする状態を与えたときに、プロセスの状態を目標に近づける操作を探索することによって、操作手順を自動的に生成するシステムを試作した。

現在の方法では、操作変数が n 個の時に m 段までの探索を行うと、計算量は $O(2^{n+m})$ となる。この計算量では、操作手順を実時間で求めるためには、問題を非常に小規模な部分問題に分割しておかなくてはならない。また、ランドマークの決定方法が重要であり、ランドマークの設定によっては解を見落とすおそれがある。

計算量のオーダーは、変数間の定性関係を今回の手法よりも有効に活用することによって減少せられる可能性がある。また、必要なランドマークを定量モデルから算出するアルゴリズムを検討している。

本手法の長所は、定量的、定性的な物理モデルで表現できていて、シミュレーションが可能であれば、対象を問わずに適用できることであると考えている。今後はこの長所をできるだけ損なわずに、少ない計算量で実用的な解を求める手法を検討していく方針である。

参考文献

- 1) Rivas, J. R. and D. F. Rudd, Synthesis of failure-safe operations, *AIChE J.*, **20**, 320 (1974)
- 2) Ivanov, V. A. a, V. V. Kafarov, V. L. Kafarov and A. A. Reznichenko, On algorithmization of startup of chemical plants, *Proc. PSE*, **2**, 114 (1982)
- 3) Tomita, S. , M. Nagata and E. O'Shima, *Preprints IFAC Workshop*, 66, Kyoto (1986)
- 4) Fusillo, R. H. and G. J. Powers, Operating procedures synthesis using local models andh distributed goals, *Computers Chem. Engng.*, **12**, 1023 (1988)
- 5) Lakshmanan, R. and G. Stephanopoulos, Synthesis of operating procedures for complete chemical plants, *Computers Chem. Engng.*, **12**, 985 (1988)
- 6) Lakshmanan, R. and G. Stephanopoulos, Synthesis of operating procedures for complete chemical plants —I, *Computers Chem. Engng.*, **12**, 985 (1988)
- 7) Lakshmanan, R. and G. Stephanopoulos, Synthesis of operating procedures for complete chemical plants —II, *Computers Chem. Engng.*, **12**, 1003 (1988)
- 8) Lakshmanan, R. and G. Stephanopoulos, Synthesis of operating procedures for complete chemical plants —III, *Computers Chem. Engng.*, **14**, 301 (1990)
- 9) Rotstein, G. E., R. Lavie and D. R. Lewin, A qualitative process-oriented approach for chemical plant operations —the generation of feasible operation procedures, *Computers Chem. Engng.*, **16**, S337 (1992)
- 10) Foulkes, N. R., M. J. Walton, P. K. Andow and M. Galluzzo, Computer-aided synthesis of cmplex pump and valve operations, *Computers Chem. Engng.*, **12**, 1035 (1988)
- 11) Shankar, V., C. Johnson, R. Srinivasan, V. Venkatasubramanian and K. E Arrzen, Automatic operating procedure synthesis for batch process, *Cojcomputers Chem. Engng.*, **22**, 1673 (1998)
- 12) Kuipers, B., *Qualitative Reasoning*, MIT Press (1994)
- 13) 立野 繁之, 柴田 望洋, 拓植 義文, 松山 久義: 化学プラントの符合付き有向グラフの自動生成, 計測自動制御学会論文集, **30**, 1385 (1994)
- 14) 鷲尾 隆: 物理法則に基づく外的駆動型因果性の導出, 人工知能学会誌, **5**, 482(1990)
- 15) 溝口 文雄, 古川康一, 安西 祐一郎: 定性推論, 共立出版(1989)
- 16) 西田 豊明: 定性推論の諸相, 朝倉書店(1993)
- 17) 富田 幸雄: 水力学 流れ現象の基礎と構造, 実教出版(1982)