1 1 1 1 センサ情報を用いた定性推論の曖昧性の緩和

A solution of the ambiguity problem of qualitative reasoning using sensor signals

○ 横田 久幸 (岡山大学), 正 五福 明夫 (岡山大学)
 Hisayuki YOKOTA, Okayama University, 3-1-1, Tsushima-Naka, 700-8530 Okayama
 Akio GOFUKU, Okayama University

Key Words : multilevel flow modelling, qualitative reasoning, sensor signal, DURESS

1. 緒言

著者らは, システムの意図と構造を関連づけてモデル化できる点から, 機能モデリングを応用した大規模プラントの運転員支援情報生成手法について研究を進めている. これまでに, 機能モデリングの一手法である **Multilevel Flow Modelling (MFM)** [1] を基礎モデルとして用い, プラントに異常が発生した場合の異常原因推定手法[2]や対応操作候補の導出手法[3]を提案している. これらのうち, 対応操作候補導出手法では, 対応操作のプラント挙動への影響を定性推論によって推定し, 回避あるいは緩和したいプラント状態に効果のある対応操作候補の導出を行っている.

定性推論には, 対象システムに関する定量的な情報が得られないときでも, 既知の情報を論理的に組み合わせて, システムの振る舞いを枚举できるという特長があるが, 「正」の影響と「負」の影響が1つの推論ノードに波及した場合に, 総合的な影響が「正」と「負」のどちらになるか判断できないという曖昧性の問題がある. そこで, 本研究では, センサ信号を用いて部分的な数値シミュレーションを行うことによる曖昧性の緩和手法を提案する.

2. センサ情報を用いた影響波及推論

対応操作候補導出手法では推論が継続できなかった, Fig. 1 に示すような複数の影響波及が合流する箇所に対して, センサ信号を用いて部分的な数値シミュレーションにより影響を定量的に評価し, それを定性値に変換して定性的な影響波及推論を継続する.

Fig. 1 Problem in qualitative influence propagation

定性推論と部分的な数値シミュレーションを組み合わせることの利点は, 定性推論では行えなかったループや合流部分の推論ができる. これに対して数値シミュレーションでは, 対象システムに発生する振る舞いの因果関係が計算結果である数値だけからでは把握しにくい. このような計算結果の解釈の困難さを, 定性推論の因果説明能力で補うことができる.

本手法を適用するための前提条件は, (a) システムの挙動を数値シミュレーションするための数学モデル (数学方程式系) は既知である, (b) 各数学方程式は線形微分方程式である, (c) 数学モデルに

現れる変数のいくつかはセンサにより観測されている, (d) 数学モデルの変数は影響波及推論の基礎となる MFM の機能や目標に1対1で対応づけられている, (e) 少なくとも数学モデル全体を用いると, システムの挙動を数値シミュレーションにより計算できる, である.

影響波及の合流箇所に対して, その機能や目標に対応する変数を部分的な数値シミュレーションによりセンサ信号を用いて計算するアルゴリズムの概要は以下の通りである.

(1) MFM モデルのノード関係を分析して, 合流箇所の MFM ノード (機能または目標) を同定する. (2) MFM ノードと数学モデルの変数との対応関係から, 合流箇所の MFM ノードに対応する変数を同定する. (3) 数学モデルの変数の依存関係を求め[4], それを変数関連図としてまとめる. (4) 合流箇所の MFM ノードに対応する変数を数値シミュレーションによりセンサ信号を用いて計算できる最小セットの数学方程式系を, 次節で説明する手法によりシステム全体の数学方程式系から選り出す.

3. センサ信号を用いて影響の定性値を計算するための数学方程式系の導出

ここでは, 数学方程式に現れる変数を, 観測変数 (センサにより観測されている変数) と非観測変数に分類し, さらに, 非観測変数を, (i) 影響変数: 定性的影響を明らかにしたい非観測変数, (ii) 未知変数: 影響変数以外の非観測変数, (iii) 計算変数: 数学方程式系を用いて観測変数から値を計算できる未知変数, に分類する. これらの用語を用いて, センサ信号を用いて影響変数を計算する最小セットの方程式系を求めるアルゴリズムを以下に示す.

ここで, 最小セットとは数学方程式系に含まれる非観測変数が最も少なくなることを意味する. これを行うために選択された数学方程式から構成された数学方程式系を行列方程式 $Ax(t) = B$ に変換する. ここで $x(t)$ は時間 t における非観測変数ベクトル, B は観測変数と定数からなるベクトルである. そして, 係数行列 A の rank を求めて最小性を評価する.

- (1) 影響変数を含む方程式を検索する.
- (2) 検索している変数を導出する方程式が複数あるか調べ, 複数あれば(3)へ進む. なければ(5)へ進む.
- (3) 現在の状態を保存して方程式の種類と数を保存する.
- (4) 方程式を一つ選ぶ.
- (5) 方程式に含まれている未知変数を未知変数リストに追加する (未知変数リストの初期値は空リスト)
- (6) 未知変数リストが空リストであれば(8)へ進む, そうでなければ(7)へ進む.
- (7) 未知変数リスト中にある一つの未知変数を計算変数として方程式を検索し, (2)に戻る.
- (8) 方程式を行列方程式に変換して rank の計算を行う.

- (9) 行列方程式のrankが観測変数の数より小さければ(10)へ、そうでなければ(11)へ進む。
- (10) 行列方程式のrankが今までに求めた数学方程式系のrankより小さいか半別し、大きければ(11)へ進み、小さければ数学方程式系を保存する。
- (11) まだ選んでいない方程式が存在するか半別し、存在すれば(12)へ進み、存在しなければ(13)へ進む。
- (12) 検索中の状態を読み込み、(2)に戻る。
- (13) 現在保存している数学方程式の組が最小セットの数学方程式となる。

4. 適用例題

提案手法を Fig. 3 に構造を示す DURESS と呼ばれるシステム[6]に適用した。DURESS では、ポンプの動作条件(ON/OFF)、各バルブの開度制御およびリザーバのヒータの制御により、2つのリザーバの水位と温度を制御できる。

Fig. 2 Composition of DURESS

本適用においては、DURESS 全体を数値シミュレーションする数学各方程式には、DURESS シミュレータ[6]のものをを用い、配管の流量、各ヒータの出力、リザーバの水位をセンサにより計測しているものとした。また、DURESS に対する MFM モデル (部分) を Fig. 3 に示す。本稿では、合流箇所 (Ba-2) に対応する変数を計算する最小セットの数学方程式系の導出について説明する。

Fig. 3 Part of MFM model for DURESS

Ba-2 を実現するコンポーネント (バルブ VA1 と VA2 からの流れが合流するミキサ部) に関連する数学方程式は、

$$q_{R1}(t) = q_{VA1}(t) + q_{VB1}(t) \quad (1)$$

$$q_{VA1}(t) = q_{VA}(t) - q_{VA2}(t) \quad (2)$$

$$q_{R1}(t) = a\{W(t) - W(t-1)\} + q_{VO1}(t) - b \quad (3)$$

$$q_{VO1}(t) = I_{VO1}(t) \quad (4)$$

である。 q は流量を、 W は水位を、 I はバルブの開度を表し a, b は定数である。影響変数は $q_{R1}(t)$ であり、観測変数は $q_{VA}(t)$, $q_{VA2}(t)$, $q_{VB1}(t)$, $I_{VO1}(t)$ として、変数関連図を求めると Fig. 4 の 2通りが得られる。

Fig. 4 Relations of variables

そして、センサ信号を用いて影響変数を計算する最小セットの数学方程式系を導出すると、式(1)(2)、あるいは式(3)(4)からなる数学方程式系となった。式(1)(2)で構成される数学方程式系を用いてセンサ信号から影響変数を計算する。このとき VA2, VB1 が故障し $q_{VA2}(t)$, $q_{VB1}(t)$ が小さくなった場合の影響変数 $q_{R1}(t)$ を計算すると、Fig. 5 のようになる。 $t=20$ のとき $q_{R1}(t)$ とその初期値の差は $q_{R1}(20) - q_{R1}(0) = 1.54(\text{kg/s})$ となる。したがって定性的な影響は「+」として影響波及推論を継続すれば良いことがわかる。

Fig. 5 Calculation results of influenced variable

5. 結言

定性推論の本質的な問題点である曖昧性の緩和手法として、センサ信号を用いた定性的影響波及推論手法を提案し、そのための、影響変数を計算する最小セットの数学方程式系の導出アルゴリズムを述べた。本手法は定性推論のみならずセンサバリデーションのために、システムの数学方程式が既知である場合に、あるセンサ値を他のセンサ値から計算するための方程式系を導出する手法としても適用可能である。

6. 参考文献

- (1) M, Lind : Modeling goals and functions of complex industrial plants ; Applied Artificial Intelligence, Vol. 8, No. 2, pp. 259-283 (1994)
- (2) 犬塚 圭, 五福 明夫, 田中 豊 : プラントの部分モデルに基づく探索範囲拡大型異常原因推定手法, システム制御情報学会論文誌, Vol. 16, No. 3, pp101-110 (2003)
- (3) 五福 明夫, 足立 和寛, 田中 豊 : 機能と挙動に基づくプラント異常時対応操作候補の導出, システム制御情報学会論文誌, Vol. 11, No. 8, pp. 458-465. (1998)
- (4) 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 Vol. 5, No. 4, pp94-103(1990)
- (5) Vicente, K. J. : Supporting Operator Problem Solving Through Ecological Interface Design, IEEE Trans.Syst.Man -Cyber., Vol. SMC-25, No. 4, pp. 529-545, (1995)
- (6) <http://www.mie.utoronto.ca/labs/cel/research/platform/>