A Method for Extraction of Function Modules of Sequential Control Programs Based on Structure Analysis

Satoshi Nakamura Non-member (Yokohama National University)

Yasutaka Fujimoto Member (Yokohama National University, fujimoto@ynu.ac.jp)

Keywords: sequential control, function module, hierarchical structure, Markov chain, reachability matrix

PLC based controls are widely used in industry field. In general, the *Ladder Diagram* (LD) is a most common programming language for such discrete control systems. Although LD is very simple and easy to learn, it is difficult to develop and maintain complicated systems due to its simplicity. A solution for this problem is to develop and reuse function modules and to treat them as a black box.

In this paper, a method to extract function modules from sequential control programs for a reuse purpose is proposed. It is effective for a cost reduction of development of control systems. A hierarchical structure of a given logic control program can be found by using association graph that represents a relation of variables appeared in the logic control program. If some or more variables are connected each other (strongly connected), the layered structure is not easy to find. Thus, based on the concept of Markov chain, the importance of variables can be conducted. We propose a new method to divide unclear-layered variables in more details. An illustrative example of a tank control program is shown as an application of the proposed method.

Figure 1 shows an example of a given ladder diagram for a tank system as shown in Fig. 2. Using an association matrix derived from a relation of the variables, the proposed mathematical procedure produces a rank of variables and a layered structure as shown Table 1 and Fig. 3. Using the layered structure, each set of the variables and corresponding steps in the LD program can be extracted as a function block.

Fig. 1. A ladder diagram for a tank system

Table 1. A rank of variables

y1	0.193
y2	0.193
y3	0.208
y4	0.208
y5	0.0312
y6	0.0245
y7	0.0111
u1	0.0286
u2	0.0286
x1 ~ x6	0.0125

Fig. 2. An example of a tank system

Fig. 3. Extracted layered structure using proposed method

シーケンス制御プログラムの構造解析に基づく 機能モジュール抽出支援システムの研究

非会員 中村 聡* 正員 藤本 康孝*

A Method for Extraction of Function Modules of Sequential Control Programs Based on Structure Analysis

Satoshi Nakamura*, Non-member, Yasutaka Fujimoto*, Member

In this paper, a method to extract function modules from sequential control programs is proposed. A hierarchical structure of a given sequential program can be found by using association graph. If some or more variables are connected each other (strongly connected), the layered structure is not easy to find. Thus, based on the concept of Markov chain, the importance of variables can be conducted. We propose a new method to divide unclear layered variables in more details. An illustrative example of a tank control program is shown as an application of the proposed method.

キーワード：シーケンス制御，機能モジュール，階層構造，マルコフ連鎖，可到達行列

Keywords: sequential control, function module, hierarchical structure, Markov chain, reachability matrix

1. はじめに

シーケンス制御はフィードバック制御と共に重要な制御方法で，産業界において広く用いられている。最近のシーケンス制御に用いられている制御機器 PLC (Programmable Logic Controller) の処理能力の進歩は目覚ましいものがある一方で，ソフトウェアに関して新しい手法の研究・開発は少ない。シーケンス制御で多く用いられているラダー図では，リレー回路のように出力信号の生成条件を入力変数の論理的なつながりで表現する。しかし，可読性に問題があるため，プログラムの制作に熟練・経験を要し，また，プログラムを設計した本人以外の技術者にとって理解が困難であるために，保守性にも問題が生じている⁽⁶⁾。ラダー図に用いられている各変数の構造的なつながりが分かりにくいことや，使用される変数の数が多数であることなどがその一因となっている。

この問題を解決する一つの方法は，過去のプログラム資源から有用な機能モジュールを抽出し活用することである。これにより，システム開発コストの削減が期待できる。

本研究では，与えられたプログラムから各変数の関係を抽出し，その変数間の階層構造を導出するアルゴリズムを提案する。これにより，過去のプログラムからの機能モジュールの抽出を支援できると期待できる。

2. システムモデルの接続表現

ラダー図における各変数の全体的な構造を解析するために，出力変数とその生成条件である入力変数との関係に着目する。そのために，ラダー図から変数間の因果関係のみに注目し，グラフを用いて因果関係を表現し，変数間の構造的な情報を抽出することを考える。

例えば，ある変数 A が，単純にある変数 B になんらかの影響を与えているとき，その接続関係だけに注目して，図 1 のように情報の流れを有向グラフで表現することを考える。

いま，接続行列 T を n 個の変数からなるラダー図モデルに対し以下のように定義する⁽¹⁾⁽⁴⁾。

$$t_{ij} = \begin{cases} 1 \cdots \text{変数 } v_j \text{ から変数 } v_i \text{ へ接続されている} \\ 0 \cdots \text{変数 } v_j \text{ から変数 } v_i \text{ へ接続されていない} \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

ただし， i, j は $1 \leq i, j \leq n$ を満たす整数とし， t_{ij} は接続行列 T の (i, j) 要素である。ラダー図に適用する場合，コイル (○) で表された出力変数とその生成条件となる接点 (|) で表された変数の因果関係のみに着目する。例えば，図 2 のようなラダー図の場合，出力変数 y_1 に対して接点 x_1, x_2 ，

図 1 接続表現

Fig. 1. A description of connection.

* 横浜国立大学大学院工学府
〒 240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5
Graduate School of Engineering, Yokohama National University
79-5, Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501

図2 ラダー図の例

Fig. 2. An example of a ladder diagram.

図3 ラダー図の例の接続表現

Fig. 3. Connection graph of a ladder example.

y_2 が生成条件となっており、その因果関係のみに注目して接続行列で表現すると、図3の接続表現が得られる。すなわち、図3は x_1 , x_2 , y_2 が y_1 に影響することを表している。本表現では、生成条件となる接点、コイルに直列的 (AND) に作用しているか並列的 (OR) に作用しているかは問わず、その因果関係のみを抽出したものとなっている。本モデルでは、変数の因果関係のみを簡略化してグラフ表現することによって、その大域的な構造を求めることが特長となっている。

影響を与える変数を列に、影響を受ける変数を行に表し、接続表現を接続行列 T で表すと、

$$T = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & x_1 & x_2 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} y_1 \\ y_2 \\ x_1 \\ x_2 \end{matrix} \quad (2)$$

となる。なお、行列の上部および右部の変数は、説明のために便宜的に記載するものである。

3. 階層構造表現

〈3・1〉 可到達行列による方法 ラダー図における各変数の接続関係をグラフで表現することにより、様々な性質を数学的な手法により導くことが可能となる。ラダー図の変数をグラフの節点に対応させ、個々の節点を $\{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ とする。パス (v_1, v_2) は、節点 v_1 から節点 v_2 への長さ1の有向路を表す。同様に、パス $(v_1, v_2), (v_2, v_3), \dots, (v_{k-1}, v_k)$ は、 v_1 から v_k までのパスを表し、表記されたパスの数がそのまま変数間の有向路の長さを示す。 v_i から v_j への有向路が存在するということは、 v_i が v_j へ到達可能であることに相当する。

ここで、節点 v_i から v_j への長さ ℓ の有向路の有無を求めることを考える。接続行列 T をブール代数上で ℓ 乗すると、

図4 複雑な接続表現の例

Fig. 4. Complex connection relationship.

その (i, j) 要素 t_{ij}^ℓ は、節点 v_i から v_j への長さ ℓ の有向路の有無を表すことになる。ラダー図においては、変数 v_i が変数 v_j に ℓ サイクルのステップを経て影響を及ぼすことを意味する。節点の数 (変数の数) が n 個のグラフにおいては、2つの異なる節点間の有効路の長さは高々 $n-1$ であることを考慮すると、接続行列 T に対して、 $T^0, T^1, T^2, \dots, T^{n-1}$ を計算し、ブール代数演算則に基づいて足し合わせることで、各節点から全ての節点への到達の可能性を表す行列を得ることができる。これを可到達行列 M と呼び、次式で定義する⁽⁴⁾。

$$M = \sum_{k=0}^{n-1} T^k \quad (3)$$

ただし、 $T^0 = I$ (単位行列) とする。

ここで、図4の様な、ある変数の接続関係を表現したグラフを考える。この図から各変数の2次的、3次的、... つながりを把握することは困難である。そこで、まず可到達行列を求め、階層構造の抽出を試みる。

図より、接続行列は、

$$T = \begin{bmatrix} v_1 & v_2 & v_3 & v_4 & v_5 & v_6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \end{matrix} \quad (4)$$

と求まる。ただし、行列の上部および右部の変数は、説明のために便宜的に記載するものである。(3)より、可到達行列 M は以下ようになる。

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

この可到達行列 M において、各列の成分はその変数から他の変数へ影響を与えるかどうかを示し、各行の成分はその変数が他の変数から影響を受けるかどうかを示す。可到達行列 M の (i, j) 要素を m_{ij} とすると、第 j 列の列和 d_j は、

表 1 可到達行列 M とその行和および列和Table 1. Reachability matrix M and its row sum and column sum.

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	r_i
v_1	1	0	1	0	0	0	2
v_2	1	1	1	0	0	0	3
v_3	1	0	1	0	0	0	2
v_4	1	1	1	1	0	1	5
v_5	1	1	1	0	1	0	4
v_6	1	1	1	1	0	1	5
d_j	6	4	6	2	1	2

図 5 波及度による例題の階層構造

Fig. 5. Hierarchical structure of an example from donatable indices.

$$d_j = \sum_{i=1}^n m_{ij} \dots \dots \dots (6)$$

第 i 行の行和 r_i は,

$$r_i = \sum_{j=1}^n m_{ij} \dots \dots \dots (7)$$

と表され, 表 1 のようになる。

d_j は変数 v_j が他の変数に与える影響の大きさを意味し, これを Donatable Index (波及度) と呼ぶ⁽⁴⁾。 r_i は変数 v_i が他の変数から受ける影響の大きさを意味し, Receptive Index (受容度) と呼ぶ⁽⁴⁾。波及度の降順に変数を並び替えた可到達行列 M_d は次のようになる。

$$M_d = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (8)$$

このとき, 対応する変数は $(v_1, v_3, v_2, v_4, v_6, v_5)$ という順序になっている。

列に全て 1 が並んでいる変数 v_1, v_3 は, 全ての変数に影響を与えることから, このシステムの最上位であり, 同じ階層に属する。変数 v_2 は 2 番目の階層に属し, 変数 v_4, v_6 のグループと, 変数 v_5 のそれぞれに影響を与えていることが分かる。このように計算することによって階層構造が明らかになる。(8) の関係を図的に表すと図 5 のようになる。

同様に, 受容度に基づいて並び替えた場合でも, 同じ結果を得ることができる⁽⁴⁾。

〈3・2〉既約システムの問題 実際のラダー図において

図 6 既約なシステム

Fig. 6. An example of an irreducible system

は, 変数同士が互いに到達可能である場合が多い。このような場合, 変数は互いに強連結であると定義される。前節の方法によると, 全ての変数が互いに強連結であれば階層構造は存在せず, 全ての変数が単一のグループに属することになる。例えば, 図 6 のシステムは全ての変数が互いに到達可能であり, 可到達行列を求めると全要素が 1 となってしまう, 前節の方法では階層構造を抽出することができない。このような強連結な変数で構成されるシステムは, 既約なマルコフ連鎖システムと類似の概念により解析することができる。既約システムを解析するために, 影響度を考慮した接続行列を導入する⁽²⁾⁽³⁾。これは, マルコフ連鎖における遷移確率行列に対応するものである。

変数 v_i が変数 v_j に与える影響の大きさを p_{ij} で表す。 $0 \leq p_{ij} \leq 1$ とし, p_{ij} を (i, j) 要素とする行列 P を正規化接続行列と呼ぶ。

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (9)$$

ただし, ある変数が他の変数に与える影響の総和を 1 とし, $j = 1, \dots, n$ について,

$$\sum_{i=1}^n p_{ij} = 1 \dots \dots \dots (10)$$

が成り立つものとする。すなわち, 正規化接続行列 P の各列和は 1 となる。

ここで, それぞれの変数が他の変数に等しく影響を及ぼすと仮定し⁽³⁾, 正規化接続行列を次式で定義する。

〔定義 1〕 正規化接続行列の (i, j) 成分は, $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, n$ について,

$$p_{ij} = \frac{t_{ij}}{\sum_{i=1}^n t_{ij}} \dots \dots \dots (11)$$

とする。ここで, $\sum_{i=1}^n t_{ij}$ は接続行列の列和である。

よって図 6 に示すシステム例の接続行列 T および, 正規化接続行列 P は

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (12)$$

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1/3 & 1 \\ 1 & 0 & 1/2 & 1/3 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 & 1/3 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (13)$$

となる。各変数の影響の大きさをベクトル表現したものを α とおくと、正規化接続行列と影響度 α の間には、次式が成立する。

$$\alpha = P\alpha \dots\dots\dots (14)$$

上式より影響度 α は、正規化接続行列の固有値 1 に対応する固有ベクトルとなっていることが分かる。ベクトル α の各成分は、対応する変数の影響度を表し、その値の大小は、他の変数から対応する変数への情報の流入の多寡を表すと考えることができる。すなわち、ベクトル α から各変数の順位付けが可能となり、同一の階層に属する変数間の構造をより詳細に抽出することが可能となる。

図 6 のシステムの場合、(13) の正規化接続行列の固有値 1 に対する固有ベクトルを求めると、 $\alpha = [0.222, 0.333, 0.167, 0.083, 0.194]^T$ となり、その数値の小さいものから順番に対応する変数を並べると v_4, v_3, v_5, v_1, v_2 となる。上位の変数ほど他の変数に与える影響が大きく、下位の変数ほど他の変数から影響を受けやすいと考えることができる。

〈3・3〉 詳細な階層構造抽出法 実際の制御システムにおいては、ラダープログラムに対する外部入力が存在し、各変数に影響を与えていることが考えられる。そこで、入力変数に関しても一定の割合で外部から影響が与えられると仮定し、新しい既約な正規化接続行列を作成することを試みる。

ここで、(9) を構成する部分行列を考え、 P_{11} を状態から状態への正規化接続行列、 P_{12} を入力から状態への正規化接続行列、 P_{21} を状態から入力への正規化接続行列、 P_{22} を入力から入力への正規化接続行列とすると、新しい正規化接続行列 P' を

$$P' = \begin{bmatrix} P'_{11} & P'_{12} \\ P'_{21} & P'_{22} \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} + (1 - \lambda) \begin{bmatrix} 0 \\ Q \end{bmatrix} \dots\dots\dots (15)$$

と定義する。ただし、

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{1}{m} & \dots & \frac{1}{m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{m} & \dots & \frac{1}{m} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (16)$$

であり、また、重み係数 λ は対象モデルに応じて調整する $0 \leq \lambda \leq 1$ の正数である。また、 m は入力変数の数である。 Q は全ての要素が $1/m$ である m 行 n 列の行列である。ここで、 n は全変数の数である。(15) の変形により既約なシステムが生成される。

4. モデル例

モデル例として、図 7、図 8 のシーケンス制御システムの例を考える。以下では、簡単化のため、必要最小限の記述のみを扱う。

このタンクシステムは、タンク A、B、C の三つのタンクから構成され、各タンクにはそれぞれ溶液を注入するバルブ (y_1, y_2) がセットされている。ただし、タンク C への溶液の注入はタンク A、B からバルブ (y_3, y_4) を通して行われるとし、タンク C には、放流バルブ (y_5) と攪拌するためのミキサ (y_6) が取り付けられている。

タンク A、B には、注入バルブ (y_1, y_2) を通して、一定量 (x_2, x_4) に達するまで溶液が注入される。一定量に達すると注入を停止し、バルブ (y_3, y_4) を通して A、B 同時にタンク C へ溶液を注入する。それぞれのタンクの残量が一定量 (x_1, x_3) 以下になれば、バルブ (y_3, y_4) を閉め、

図 7 タンクシステム

Fig. 7. An example of a tank system.

図 8 タンクシステムのラダー図

Fig. 8. A ladder diagram for a tank system.

表2 タンクシステムの変数表

Table 2. Variables of a tank system.

y_1	タンク A へ注入バルブ
y_2	タンク B へ注入バルブ
y_3	タンク A からタンク C へ注入バルブ
y_4	タンク B からタンク C へ注入バルブ
y_5	タンク C から外へ放流バルブ
y_6	搅拌ミキサ回転
y_7	オンディレイタイマ (10 分)
u_1	開始指令
u_2	停止指令
x_1	タンク A 下センサ
x_2	タンク A 上センサ
x_3	タンク B 下センサ
x_4	タンク B 上センサ
x_5	タンク C 下センサ
x_6	タンク C 上センサ

注入を停止する。一方でタンク C は、タンク A, B からの注入によって、溶液が一定量 (x_6) に達すれば搅拌ミキサ (y_6) を一定時間回転させる。一定時間、タンク C のミキサを回転させたのち、タンク C に取り付けられている放流バルブ (y_5) を開き、液面が下限 (x_5) に達するまで外部へ溶液を流出させる。図 8 のラダー図は、以上の一連の動作をするようにプログラムされている。なお、プログラムに用いている変数を表 2 に示す。スタートスイッチ (u_1, u_2) に関しては、オルタネート動作をするスイッチを想定しており、同時に ON になることや、OFF になることはないものとする。

生成条件となる接点がコイルに直列的 (AND) に作用しているか並列的 (OR) に作用しているかは問わず、その因果関係のみを抽出し接続行列を求めると、(17) のようになる。

$$T = \begin{matrix} & y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_5 & y_6 & y_7 & u_1 & u_2 & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 \\ \begin{matrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ u_1 \\ u_2 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (17)$$

図9 受容度・波及度により抽出された階層構造
Fig. 9. Extracted layerd structure using donatable indices and receptive indices.

$$M = \begin{matrix} & y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_5 & y_6 & y_7 & u_1 & u_2 & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 \\ \begin{matrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ u_1 \\ u_2 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (18)$$

(17) の接続行列から可到達行列 M を求めると (18) が得られる。受容度・波及度を用いた〈3・1〉節の手法により階層構造を抽出すると、図 9 のようになる。それぞれ、入力変数や、センサに対応する変数が上位となり、関連する出力変数のグループに影響を与えていることが抽出されている。ただし、変数 u_1, u_2 のグループ、 y_5, y_6, y_7 のグループ、 y_2, y_4 のグループ、 y_1, y_3 のグループがそれぞれ強連結となり、これらグループ内では詳細な階層構造は抽出されなかった。ラダー図からも自明のように、これらの変数は強連結でお互いに影響を及ぼしあうために同じ階層として表現されてしまう。しかし、同一階層に属する変数でもラダー図で使用されている頻度は異なっているため、同一階層内においてもより詳細な階層構造が存在すると考えられる。

次に、互いに強連結な同一階層内の変数間の詳細な階層構造を抽出するため、まず、〈3・2〉節の手法を適用する。このタンクシステムの場合、部分的に強連結な構造を有しているが、システム全体は強連結ではない。正規化接続行列 P は重複する固有値 1 を持っており、対応する固有ベクトルは 2 本存在し、 $\alpha = [0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]^T, [1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$ となっている。すなわち、影響度 α には 2 つの解が存在し、図 9 の最下層の (y_2, y_4) のグルー

表3 タンクシステムの固有ベクトルの値

Table 3. An eigenvector of a ladder diagram for a tank system.

y_1	0.192826
y_2	0.192826
y_3	0.2077
y_4	0.2077
y_5	0.0312132
y_6	0.0244692
y_7	0.011124
u_1	0.0285714
u_2	0.0285714
$x_1, \dots, x_6$	0.0125

ブに集約される解と、最下層の (y_1, y_3) のグループに集約される解が得られ、望むような階層構造は抽出できていない。この場合のように既約でないシステムに〈3・2〉節の手法を適用しても、有効な構造は抽出できないことが分かる。

そこで、入力変数 ($u_1, u_2, x_1, \dots, x_6$) を考慮した〈3・3〉節の手法を適用する。このとき、タンクシステムの正規化接続行列 P' は、

$$P' = \begin{bmatrix} 0.45 & 0 & 0.45 & 0 & 0 & 0 & 0.1125 & 0.45 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.45 & 0 & 0.45 & 0 & 0 & 0.1125 & 0 & 0 & 0.45 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.45 & 0 & 0.45 & 0 & 0.18 & 0.225 & 0 & 0.1125 & 0.45 & 0.3 & 0 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0.45 & 0 & 0.45 & 0.18 & 0.225 & 0 & 0.1125 & 0 & 0.3 & 0.45 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.18 & 0.225 & 0 & 0.1125 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.18 & 0 & 0.9 & 0.1125 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.45 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.18 & 0.225 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \chi & \phi & \phi & \phi & \phi \\ \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \chi & \phi & \phi & \phi & \phi \\ \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi \\ \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi \\ \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi \\ \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi \\ \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi \\ \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi \\ \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi & \phi \end{bmatrix}$$

..... (19)

となる。ただし、 $\phi = 0.0125$, $\varphi = 0.4625$, $\chi = 0.125$ である。また、 $\lambda = 0.9$ として計算を行った。重み係数 λ は、元の正規化接続行列を大きく変化させることなく、入力変数の影響を付加する役割を担うことから、1 に近い値に設定することが望ましく、経験的に 0.9 程度に決定している。

この正規化接続行列から固有値 1 に対応する固有ベクトルを求めた。得られた変数順位 (固有ベクトルの成分) を表 3 に示す。

この結果に基づいて階層構造を求めると、図 10 のようになる。図 9 と比較すると、同一階層に属していた変数がさらに順位付けされていることが分かる。例えば、タイマー変数 $y_7 \rightarrow$ 攪拌ミキサ回転 $y_6 \rightarrow$ 放流バルブ y_5 という関係が抽出されている。

5. 機能モジュール抽出支援

本章では、4 章のタンクシステムの例を用いて、提案する手法により階層構造を抽出したのちに、これをラダー図に活用する方法について述べる。

図 10 提案手法による階層構造抽出

Fig.10. Extracted layered structure using proposal method.

階層構造が抽出されると、変数がお互いにどの様に影響を及ぼし合っているか視覚的に理解可能となる。そこから関係の近い変数群をファンクションブロックとして抽出し、その変数群に影響を及ぼす変数をそのファンクションブロックの入力、その変数群の中で他の変数に影響を与える変数をそのファンクションブロックの出力とすることで、カプセル化された機能モジュールがファンクションブロックとして抽出できる。

タンクシステムの例では、図 10 の階層構造から、例えば、お互いに関係の近い y_7 , y_6 , y_5 を一つのブロックとして考えると、入力が u_1 , u_2 , x_5 , x_6 、出力が y_5 , y_6 というファンクションブロックとなり、攪拌ミキサを起動し、一定時間回転させたのち停止し、溶液を放流する、という一連の制御を担う機能モジュールを抽出することができる。同様に、一つのプログラムから複数の機能モジュールを抽出できる。

ところで、実システムにおけるラダー図では、相互インターロックが多用されることが多く、相互インターロックに関わる変数は強連結になるので、同一階層に属する変数の数が多くなることが想定される。このような場合、〈3・1〉節の手法では、同一階層内で機能を分割することができず、その適用範囲は限定的となる。〈3・3〉節の手法を用いることで、この問題を部分的に解決することができる。例えば、図 10 より y_7 , y_6 , y_5 からなるブロックを更に分割し、 y_6 , y_5 を一つの機能ブロックとして抽出することが可能である。本モデル例よりもシステム規模が大きい場合にその有効性が発揮されると考えられる。

なお、現時点では、どの変数群を一つのブロックと捉えるかは人間の判断によるため、本手法は機能モジュールを抽出するための支援システムという位置付けとなっている。

6. まとめ

ラダー図の変数間の関係をグラフにおける接続関係とみなし、受容度、波及度を用い、かつ、マルコフ連鎖に類似した正規化接続行列を導入することによって、変数の影響

度を求め、変数の受容度、および、機能モジュールの抽出を支援する手法を提案した。タンクシステムをモデル例として、各変数間の階層構造を詳細に抽出できることを示した。これにより、過去のラダープログラムから、有効な機能モジュールを抽出する際に有益な情報を提示することができる。

今後の課題として、より複雑な、相互インターロックを多用した強連結の多いラダー図の場合でも、同様の結果が得られることを確認することが挙げられる。

(平成18年10月12日受付, 平成19年3月23日再受付)

文 献

- (1) S. Nakamura and Y. Fujimoto: "Structure Analysis of Logic Control Programs", IECON'04, FC-7-26 (2004)
- (2) Y. Uchimura, T. Yakoh, and K. Onishi: "A Controller Design Method on Decentralized Systems", IECON'04, SA-6-6 (2004)
- (3) S. Brin and L. Page: "The Anatomy of a Large-Scale Hypertextual Web Search Engine", WWW7/Computer Networks, Vol.30, pp.1-7: 107-117 (1998)
- (4) T. Seki, Y. Fujimoto, T. Yakoh, and K. Onishi: "An Expression of Dynamical System Connection in Decentralized Autonomous Control", *Trans. IEE of Japan*, Vol.120-D, No.1, pp.80-87 (2000-1) (in Japanese)
石健 信・藤本康孝・矢向高弘・大西公平:「自立分散制御におけるシステムのダイナミカル結合の一表現法」, 電学論 D, **120**, 1, pp.80-87 (2000-1)
- (5) S. Nakamura and Y. Fujimoto: "A Basic Analysis of Structure of Sequential Control Programs for Extraction of Function Modules", Proc. of IEEE Electronics, Information and Systems Conference, GS16-4, p.77 (2003) (in Japanese)

中村 聡・藤本康孝:「機能モジュール抽出のためのシーケンスプログラムの構造解析に関する基礎研究」, 電学電子・情報・システム部大, GS16-4, p.77 (2003)

- (6) 関口 隆・高橋 浩・青木正夫・下川勝千・薦田憲久:「シーケンス制御工学 新しい理論と設計法」, 電気学会 (1988)
- (7) 森村英典・高橋幸雄:「マルコフ解析」, 日科技連 (1979)

中 村 聡 (非会員) 2003年3月横浜国立大学工学部電子情報工学科卒業。2005年3月横浜国立大学大学院工学府物理情報工学専攻博士課程前期修了。同年4月より日立製作所勤務, 現在に至る。主として, シーケンス制御に関する研究に従事。

藤 本 康 孝 (正員) 1998年3月横浜国立大学大学院工学研究科電子情報工学専攻博士課程修了。同年4月慶応義塾大学理工学部嘱託助手。1999年4月より横浜国立大学工学部電子情報工学科助手, 2000年4月同講師, 2001年4月工学研究院知的構造の創生部門助教授, 現在に至る。博士(工学)。主として生産システム, シーケンス制御, モーションコントロール, ロボティクスに関する研究に従事。IEEE, 日本ロボット学会等の会員。