



研究ノート

離散事象システムの解析と制御

— ネットモデルによるアプローチ —

児 玉 慎 三*

1. はじめに

システム制御の方式には、よく知られているようにフィードバック方式とシーケンス方式がある。フィードバック方式は定量的制御を目的としており、プロセスオートメーションはこの方式が主体である。一方、搬送、加工、組立などの不連続工程を含む機械工業のオートメーションにおいては、定性的制御を行うためにシーケンス制御が用いられることが多い。

このようにシーケンス制御はオートメーション技術を支える一つの柱であり、その実用化の歴史はフィードバック制御と同様に古いが、理論的な体系化はフィードバック制御に比較して大幅に遅れているのが現状である。シーケンス制御系においては、制御対象および制御仕様が多種・多様であり、フィードバック制御系のようにその設計過程を規範モデルのうえの統一的な問題としてとらえるのがむづかしい。したがってその設計の体系は、これまで一品料理の形で処理されることが多く、現場主導の形でノウハウが積み重ねられてきたといえる。

しかしながら、最近シーケンス制御に対する技術環境が急変しつつあり、それに対応して理論の体系化が要求されるようになってきた。すなわち FA (フレキシブルオートメーション) の名称とともに、ロボットなどを含むフレキシブル生産工程が普及するにつれ、シーケンス制御はこれまでのように単一の機械 (対象) を制御するだけでなく、機械の群制御、あるいはラインのジョブコントロールなど対象システムの複雑大規模化、あるいは階層化に対応することが要求されるようになった。それと同時に制御を実施するハードウェアとしてのプログラム

コントローラや制御計算機の機能・信頼性および経済性の向上もこの対応を可能にする技術的要因となっている。

2. ネットモデル

シーケンス制御の対象となる上述のシステムにおいては、たとえば部品が到着し→機械加工され→加工済部品として送り出される、というように、一連の離散的な事象が発生し、これにより全体の活動が支えられている。この点において、フィードバック制御の対象となるシステムが微分方程式により記述される連続事象を呈するのと対比的で、上記のクラスのシステムは離散事象システムとよばれる。

離散事象システムにおいては、システム内においていくつかの離散事象が状況に応じて互いに干渉したり、あるいは独立に (すなわち並行に) 発生する。また事象は条件さえ整えば発生しうるもので、時間軸に同期する必要はなく原則として非同期である。したがって離散事象システムの解析・設計に役立つモデルは、このようなシステムの特徴的な側面である並行動作や非同期性を表現できるものでなければならない。さらに解析・検証能力に優れ、システム設計に際して仕様記述から回路実現まで一貫して用いることのできる形式性・階層性および設計変更に対する柔軟性といった能力が望まれる。シーケンス制御で伝統的に用いられているラダーダイアグラム、論理回路図、フロー線図等はいずれも順序回路モデルに基づく動作の図的表現であり、上記の要求から見て満足すべきものではない。現在このクラスのシステムをモデル化するもっとも有力な手段と見られているのはペトリネットである。ペトリネットは計算機科学の分野で提案され¹⁾ (C. A. Petri 1962) そのモデル化能力の大きさと簡潔さのため計算

*児玉慎三 (Shinzo KODAMA), 大阪大学, 工学部, 電子工学科, 教授, 制御電子工学

機のソフトウェア・ハードウェアのモデルとして使用されているのをはじめ、離散システムと

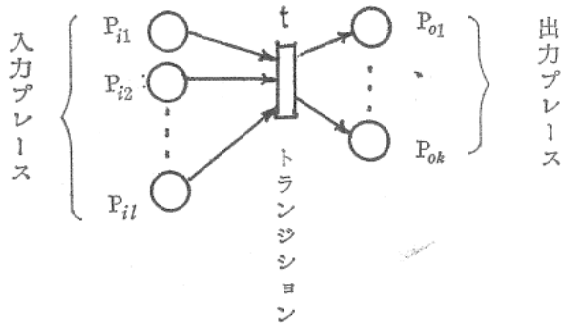


図1 ペトリネットの要素

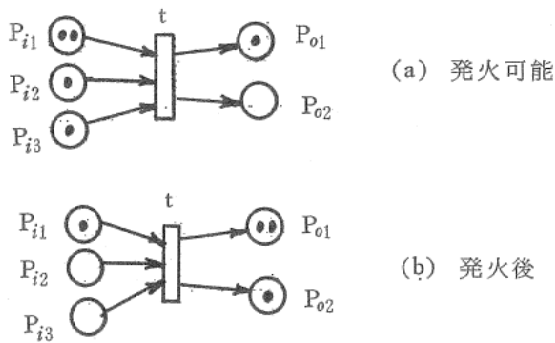


図2 発火規則

としてのオフィスシステム、法律システム、通信システム、言語理論、プロダクションシステム、それに最近ではシーケンス制御系のモデル²⁾として注目を集めてきている。

ペトリネットの構成要素(図1)でトランジションは事象に、入出力プレースはそれぞれ入出力条件に対応する。すなわち図1は、条件 $P_{i1} \sim P_{il}$ が成立すると事象 t が発生し、 t が発生すると条件 $P_{o1} \sim P_{ok}$ が成立することを表わしている。さらに、あるプレース \circ で表わされる条件が現時点(現段階)で実際に成立していることを示すのに、トークンと称する黒丸を置き \bullet で表わすものとする。図2-(a)のようにトランジションの入力側のすべてのプレースに少なくとも1個以上のトークンが存在するとき、そのトランジションに対応する事象は発生でき、このときトランジションは発火可能という。発火すると図2-(b)に示すように各入力プレースのトークンは1個ずつ減少し、各出力プレースでは1個ずつ増加する。これがトランジションの発火規則である。図2-(a)のプレース P_{i1} のように、一つのプレースに2個以上のト

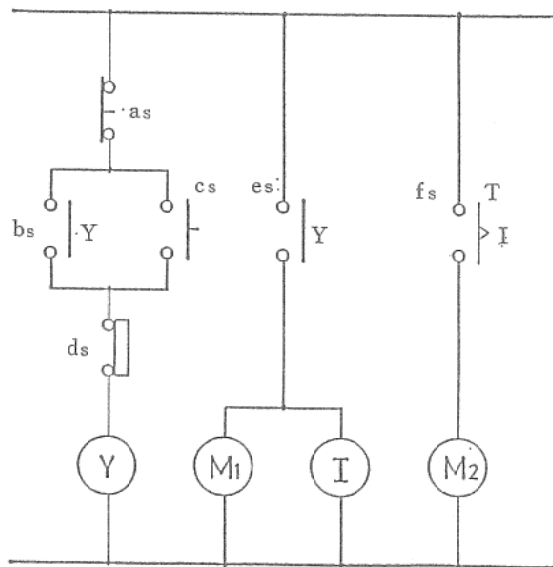
表1 基本構成要素とペトリネットモデル

名称	シンボル	ペトリネットモデル	名称	シンボル	ペトリネットモデル
復帰形スイッチ	a 接点		時 限 動 作	a 接点	
	b 接点			b 接点	
検出用スイッチ	a 接点		時 限 復 帰	a 接点	
	b 接点			b 接点	
電磁リレー	コイル		遅 延 動 作	a 接点	
	a 接点			b 接点	
	b 接点				

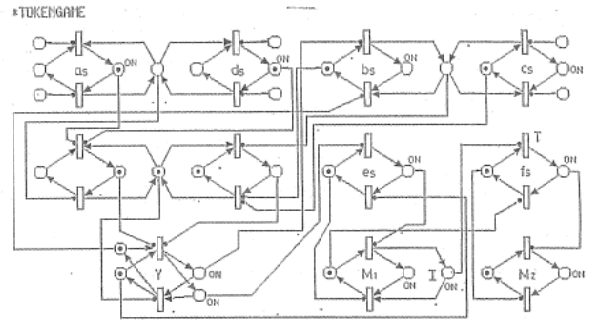
ークンが置かれることは、たとえば P_{i_1} に相当する部品が2個以上存在することをモデル化するものとして、許すものとする。複数のサブシステムからなる複合系に対しては、図1のペトリネット要素をいくつか結合してモデル化することになる。

3. ペトリネットによるシーケンス制御系のモデル化

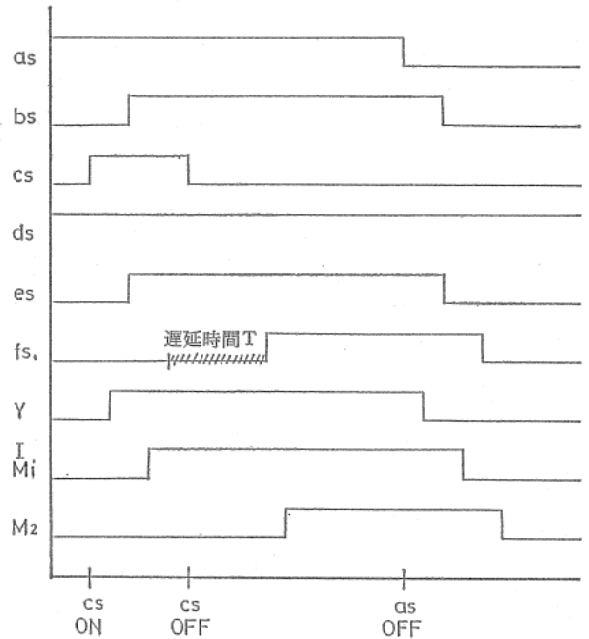
ここで表1にシーケンス制御系の基本構成要素とそのペトリネットモデルを示す、表中一は往復有向枝対 \rightleftarrows を表わし制御枝と呼ばれる。発火規則より明らかなように制御枝をもつプレースは対応するトランジションの発火に対する許可条件を表わし、発火によるトークン変化を伴わない。図3-(a)は主要な構成要素すべてを含むリレー回路の例で、著者らの研究室で開発した動作検証用シミュレータ PCSS (Petri-net-Based Concurrent System Simulator) のグラフィックエディタが自動作成したペトリネットモデルを同図(b)に示す。このモデルを用いて、活性、デッドロック、競合、可到達性などシステムの構造とトークンの初期配置に依存する定性的な性質を解析することができる。復帰形スイッチや時限リレーのような時間要素を含む実システムのモデル化には、トランジション発火に時間遅れを導入する必要がある。表1でトランジション上に示した数字Tはこの時間遅れを



(a) リレー回路の例



(b) ペトリネットモデル



(c) タイムチャート

図3 リレー回路のペトリネットモデル

意味する。ペトリネットでの時間遅れには2通りの解釈があり、一つは発火可能条件が整って t 単位時刻後に発火し同時にマーキング遷移を行う形式と、いま一つは発火可能条件が整うと直ちに発火し入力プレースよりトークン除去が行われ、その後 t 単位時刻後に出力プレースへのトークン追加が行われる形式である。PCSSではこのいずれの形式でも時間遅れを定義できる。同図(c)はシミュレーション結果をタイムチャートで表わしたものである。

4. おわりに

離散事象システムの動作記述モデルとしてのペトリネットについて簡単に述べたが、単純な基本構造の組み合わせにより高いモデル化能力を持ちうるるところから、一種の図的言語とし

てマンマシンインターフェイスに便利な道具であることがわかりいただけと思う。紙面の都合で説明できないが、ペトリネットはさらに制御仕様を表現するのにも適しており、事実、私の自動化推進協議会は、標準的自動化システム仕様記述言語として、ペトリネットに基づく図的言語 GRAFCET³⁾ を1977に制定している。ペトリネットを用いて仕様記述—シミュレーション—動作検証—システム制御の諸機能を一体化した汎用プログラマブルコントローラを実現することが近い将来可能となるのであろう。また階層的表現により上位レベルの制御機構との結合も容易であり、FA などにおける分散制御方式に適合したモデルであるとも言える。すでにこの考えを具体化した実用化研究がいくつか報告されており^{4)~7)}、シーケンス制御系を含む離散事象システムへのシステムのアプローチが開けてきた観がある。しかしながら、これらの応用化の試みに端的にみられるように、特にシステム制御への実用化に際しては時間の導入や、トークンの属性に依存した発火公理の変更、あるいは発火機構に関する付加的条件の導入などペトリネットの拡張モデルを考える必要性を生じることがあり、理論面では、従来のネ

ット理論の枠組みを越えて、これらの拡張ペトリネットの構造論を確立することがこれからの大きな課題である⁸⁾。

参考文献

- 1) C.A Petri: Communication with automata, Supplement 1 to Tech. Rep. RADC-TR-65-337, Vol, 1, Rome Air Development Center, Griffiss Air Force Base, N.Y., 1965 (Translation)
- 2) 長谷川: マークフローグラフによるシーケンス制御の表現, オートメーション, 29-5, 32/41 (1984)
- 3) 戸塚: グラフセ (GRAFCET) の概要と応用, オートメーション, 29-5, 43/50 (1984)
- 4) 長谷川: マークフローグラフと FA への応用, 計測と制御, 22-11, 946/951 (1983)
- 5) 薦田, 村田, 春名, 榎屋: FA 用ステーションコントローラ (SCA) の提案, 計測自動制御学会第9回システムシンポジウム, 261/266 (1983)
- 6) 中村, 阿部, 武田: シーケンス設計支援システム, 電気学会全国大会, 1331 (1984)
- 7) R. Valette and M. Diaz: Top-down formal specification and verification of parallel control systems, Digital Processes, 4, 3 (1978)
- 8) K. Tsuji, S. Kumagai, S. Kodama, S. Takeda: On the liveness of extended marked graphs, Proc. IEEE of ISCAS, Kyoto (1985)