

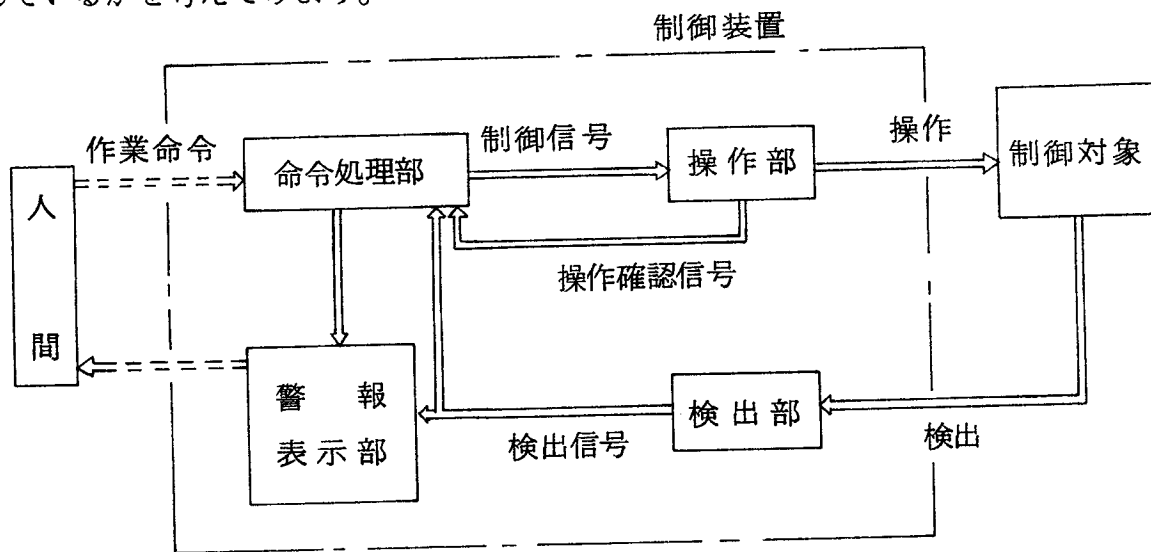
Ⅱ．シーケンス制御の捉え方

1. 制御系との関わりからの捉え方

どのような制御をするかという制御内容は、シーケンス制御系全体との関わりの中で確定される。このことを明らかにするために、まずシーケンス制御系の構成と各部の働き・関係を考えてみることから始めよう。

シーケンス制御系は、図Ⅱ-1に示すように、大きく人間と制御装置と制御対象とから構成される⁽⁷⁾ものである。さらに制御装置は、機能を中心に見てみると、命令処理部、操作部、検出部、警報表示部に分けられる。

この図を参考にして、制御系全体の中で、制御装置の各部それぞれがどのように機能しているかを考えてみよう。



図Ⅱ-1 シーケンス制御系の構成

まず、人間より制御装置の命令処理部に、押ボタンスイッチを押すことなどによって作業命令が与えられる。すると命令処理部は必要な命令処理を施し、操作部に制御信号を出す。さらに警報・表示が必要な場合は、警報・表示部へも信号を出すことになる。制御信号を受けた操作部は、制御対象を操作し、制御対象の状態を変えることになるが、同時に操作したことの情報を取り入れた制御信号を作り出すことが必要な場合には、命令処理部において操作部から図に示すような操作確認信号を受けて、それに命令の処理

をすることになる。また、制御対象の状態は、検出部において検出され、命令処理部と警報・表示部とへ信号を帰還させる。そして再度、命令処理部は先の作業命令およびこれら帰還された操作確認信号と制御状態の検出信号とから、次の状態の制御信号を出すために必要な命令処理をすることになる。

こうして命令処理部は、次々に自動的に制御信号を送り出し、制御の各段階をシーケンシャルに進めてゆくことになるのである。

以上のように命令処理部は、制御装置の中でも他に比べて中心的な機能、役割を担っていることがわかる。また、制御対象の操作は、全て命令処理部から出される制御信号によって決定されることもわかる。つまり、制御装置の中で制御内容を決定づけているところが命令処理部なのである。

以上のように、制御系の構成要素のかかわり方から、制御内容の決定付けを整理したが、次に生産システムの動きから、制御内容をどのように確定されていくかを、その過程において調べてみよう。

制御内容を作る（設計といってもよい）に当って、まず最初に必要なことは、制御対象にどのような一連の動作をさせるかを明らかにすることである。自動化に向けての制御対象の動作分析⁽⁶⁾である。

たとえば、機械工業などの生産工程には、各工程それぞれの作業目的のために必要な機器が配置してある。これら機器を制御する側から見たものが制御対象であるが、各工程はこれら制御対象の各部の機器のどれをどのように動かすかによって、工程の目的を達成し、工程はひとつひとつ順次進められて、一連の作業を行うことになる。そして、この一連の作業は、工程の時間、空間的關係のつながりとして表現される。

これら一連の作業の各工程を人に代って各機器に行わせようとするのが自動化であるから、以上のように制御対象の動作ひとつひとつの洗い出しがまず行われなければならないのである。即ち、これが制御対象の要求動作分析で、おおまかな外面的、現象的な制御内容作りの第1段階である。

ただし、この段階は制御全体の認識からすれば、いわば感性的段階であって、確かに認識の1段階ではあるが、これから直ちに制御の論理を備えた、いわば理性的段階の制御内容を作ることはできない。そこに至るには、さらに、さまざまな制御の諸条件である中間項を加味する必要がある。

そこで次は、第2段階として、この制御の諸条件を明らかにすることである。それは、

一般には制御の論理と言われるものであって、次のような例があげられる。

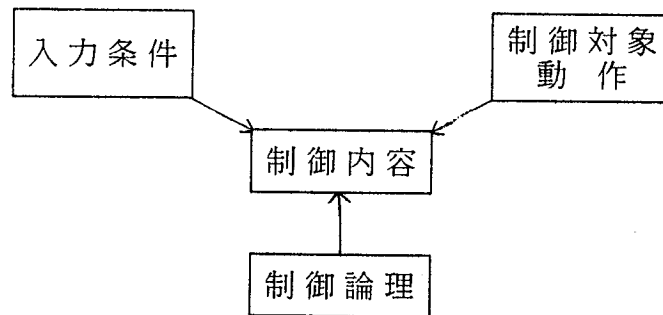
シーケンス制御においては、人間の判断と操作が介在することが多く、人間と制御装置との情報交換が重視される⁽⁹⁾ と言われているが、制御系に対する人間の介入、いわゆるマン・マシン・インタフェースをどのように作るかを明らかにすることなどがその例である。たとえば、予期しない非常事態の発生に対して、人間からの命令で制御系の運転を緊急に停止できるようにしておくことが必要であるが、そのための論理を制御内容の中にあらかじめ作っておくことなどである。

また、制御対象機器の動きで、行われてはならない動きというのがある。これをどのように禁止しておくかも制御の論理の部類に入る。今、右回転をしている機械に対して、同時に左回転の動きは許されない。この防止の論理もあらかじめ作っておかれることになる。この第2の段階は、先の第1の段階が制御の外面的、現象的認識であったのに比べると、制御における内面的、本質的観点からの配慮であるといえよう。

さて、制御内容を作る過程の最終の第3段階は、命令処理部の内容を決定する段階である。この段階は、第1段階で明らかになった制御対象の外面的、現象的要求動作に、第2段階で検討した制御の内面的、本質的観点からの論理を付加して、制御内容を具体化する段階である。いわば、感性に理性を与えて、第1、第2段階に比べて高次で具体的で、詳細な制御内容を確定してゆく段階といえよう。

制御内容は、制御装置によって実現されるので、この第3段階は、制御装置に適合した形式に具体化することでもある。例えば、リレーであれば回路に、PCであればアルゴリズムに従ったプログラムに作ることである。

以上、制御系の構成要素のかかわり方および設計過程のかかわり方のふたつから、制御内容の確定を述べたが、これから次のようなことが言える。でき上がった制御システム機能の制御内容を決定しているのは、命令処理部であり、図Ⅱ-1からわかるように、人間、制御対象という制御系の他の主要構成要素とは区別された存在である。そのため、命令処理部はそれが持つ独自の機能から制御の内容を決定しているとも見られる。一面では確かにそうである。しかし、ここで重要なことは、これまで見てきたことからわかるように、命令処理部が決定している制御内容には、制御対象の動作も、人間の操作介入や機器相互間での不都合動作の禁止等の制御論理も、全て織り込まれているということである。部分である命令処理部が担っているものは、制御系全体が関わったものなのである(図Ⅱ-2)。この認識が極めて重要である。



図Ⅱ-2 制御内容を確定する諸要因

この点を理解しないと、次のような不都合が生じる。例えば、制御装置の命令処理部から制御信号が出されていることに着目して、制御内容を制御装置の機能を基準にして表現する方法と一方、制御対象の動作を手がかりにして、これを基準に表現する方法とが、個々別々に関係なく存在するかのように受け取ることである。このような認識からは、制御対象の動作を手がかりにしながら、それから高次の制御内容を作っていくと考えることはできないのである。

そこで次に、制御対象の動作に制御の論理を付加して、制御内容を確定していくことを具体的に考えてみよう。そのためには、現実の制御対象の動作をモデル化すると、制御内容確定の考え方が明確にできるので、モデル化について概観しよう。

2. 制御遷移からの捉え方

先に見た機械工業などの生産システムでの一連の作業は、工程の時間、空間的なつながりで構成されていた。ところで、このつながりを注意深く観察してみると、工程が、ある工程から次の工程に進むにあたり、「ある工程が終了した後に次の工程が開始される」という工程間の変り目が必ず存在していることがわかる。「変り目」という非連続性から、このような生産システムは「非連続生産システム」と呼ばれている⁽¹⁰⁾が、非連続生産システムは、工程の各段階とその間の変り目のつながりとして捉えることができる。

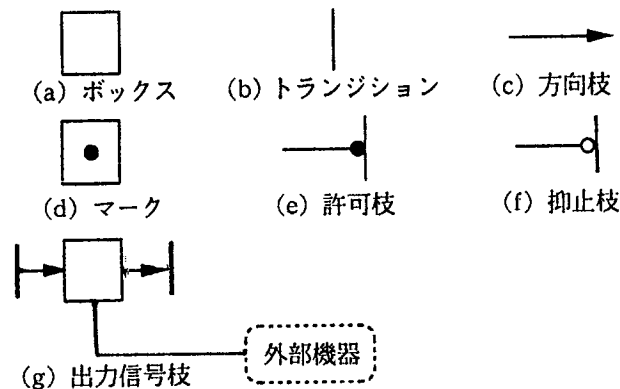
一方、でき上がった制御内容で、このような非連続生産システムの制御をする場合には、非連続な各工程に対して、非連続な制御の各段階が考えられる。このため、非連続な制御を行うシーケンス制御も、制御の各段階とその間の変り目のつながりとして捉えるこ

とができることになる。

ここでは、この動的な制御遷移状況を、モデルを用いて表現するモデル化の手法と簡単な例のモデル化について考える。

(1) モデル化の手法

モデル化には、線形グラフの一種であるマーク流れ線図 (Mark Flow Graph, MFG)⁽¹¹⁾ の手法を活用する。MFGは制御系の設計、解析に有効な手法として提案されていて、制御の概念レベルから詳細レベルまで表現できると言われているものである。



図Ⅱ-3 MFGの構成要素

MFGは次の要素で構成される。

- ①ボックス：状況を表現するもので四角形で示される [図Ⅱ-2 (a)]。前に述べた制御の各段階の状況である。
- ②トランジション：事象を表現するもので棒で示される [図Ⅱ-2 (b)]。前に述べた制御の各段階の変わり目である。この変わり目には、ある事象（できごと）が関係する。
- ③方向枝：ボックスとトランジションを状況と事象間の関係に従って結ぶもので、矢印で示される [図Ⅱ-2 (c)]。
- ④マーク：ある状況の保持を示すため、ボックス中に付けるもので「・」印で示される [図Ⅱ-2 (d)]。
- ⑤ゲート信号枝：トランジションに対する事象の発生を許可あるいは抑止するもので、許可枝と抑圧枝がある。許可枝は、図Ⅱ-3 (e) に示すように、トランジションに付く黒丸を先端にもつ枝で、信号が「1」のとき事象の発生を許可する。抑止枝は、図Ⅱ-3 (f) に示すように、白丸の付いた枝で、信号が「1」のとき事象の発生を抑止する。

⑥出力信号枝：ボックスから外部の機器に信号を出すもので、図Ⅱ-3 (g) のようにボックスと外部機器とを線で結ぶことで表わす。信号値はボックスにマークがあるときに「1」、ないときに「0」とする。

MFGでは、制御の動的状態はマークの動きで表現されるが、これに関するMFG上の規則は次のように定められている。

①あるトランジションについて、その入口側ボックスにマークの入らないものがなく、出口側ボックスにマークの入ったものがなく、かつ内部許可が真「1」、内部抑止が偽「0」であるとき、そのトランジションは可点弧という。

②可点弧のトランジションの外部からの許可が真「1」、抑止が偽「0」であれば、そのトランジションは点弧する。なお、外部からのゲート信号枝がないトランジションは、可点弧のとき無条件に点弧する。

③点弧により、そのトランジションの入口側ボックスすべてについてマークが1つ消滅し、かつ出口側ボックスすべてについてマークが1つ発生する。

なお、ここで内部とは、グラフ内のボックスから出される信号枝に対して用い、外部とは、信号源がグラフの外部、つまり外部機器からの信号枝に対して用いている。

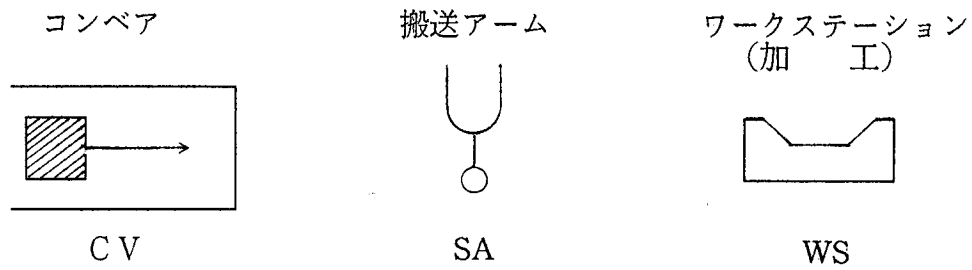
(2) モデル化

MFGでどのように具体的にモデル化するかを簡単な例で示そう。図Ⅱ-4 (a) に示すものは、搬送加工システムの例である。

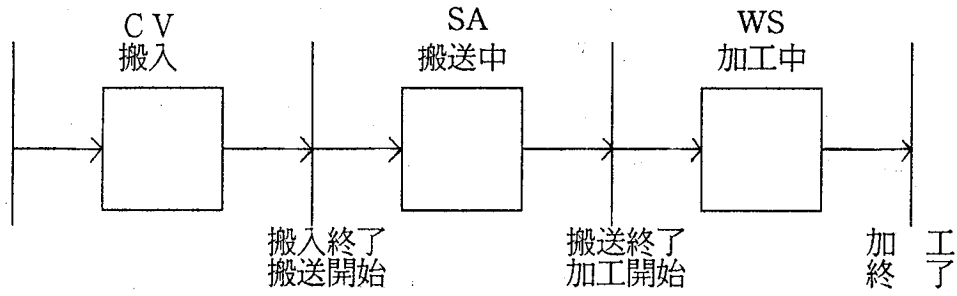
このシステムの工程は、次の3つから成り立っている。

- ①ワークがコンベア (CV) より搬入される。
- ②搬送アームがワークをCVからワークステーション (WS) まで搬送する。
- ③WSで加工する。

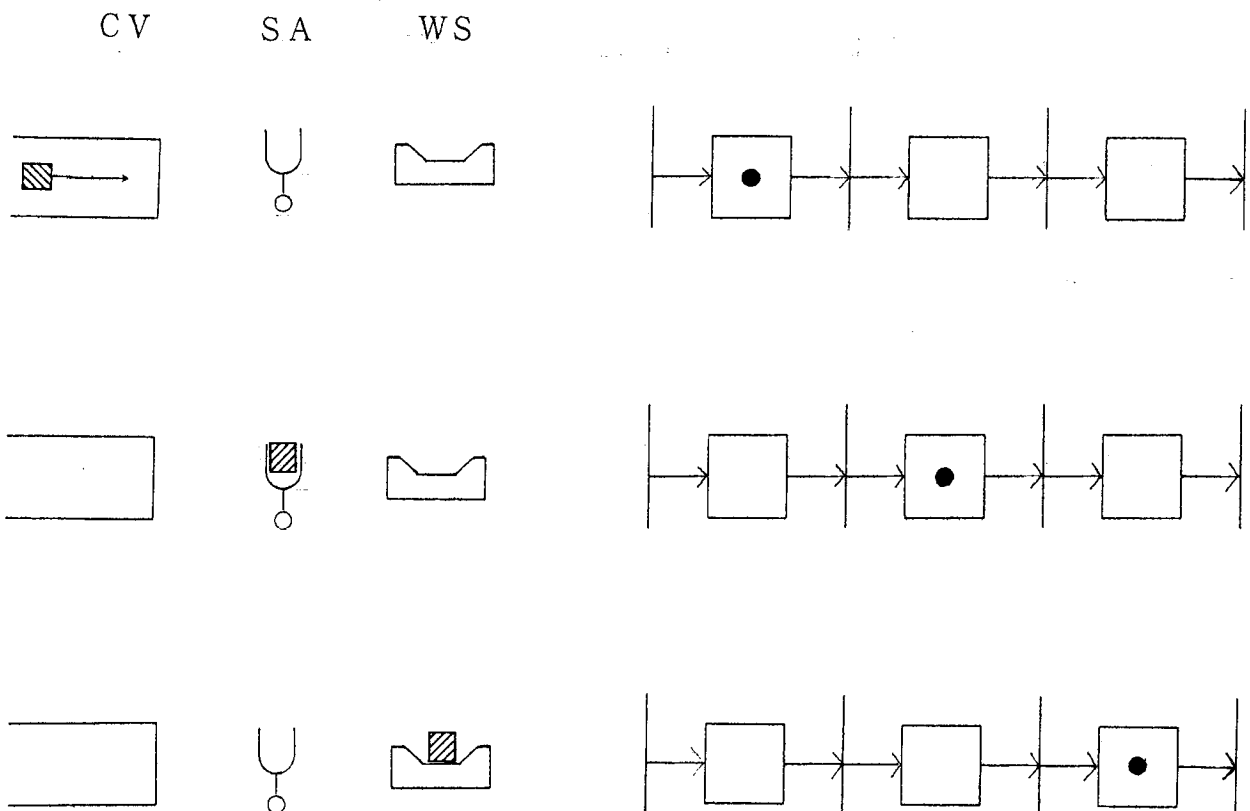
これをMFGでは、図Ⅱ-4 (b) のように、ボックスで動作の各段階の状況を、「搬送中」というように表現し、トランジションで各段階の変り目を、「搬入終了、搬送開始」というように事象によって表現する。また、システムの動作とそれに対応するマークの動きを、図Ⅱ-4 (c) のように表現する。これにより、マークが各段階の状況を持している状況と、その状況が時間、空間的に遷移していく様子を概念的に捉えることができるのである。



(a) システムの例



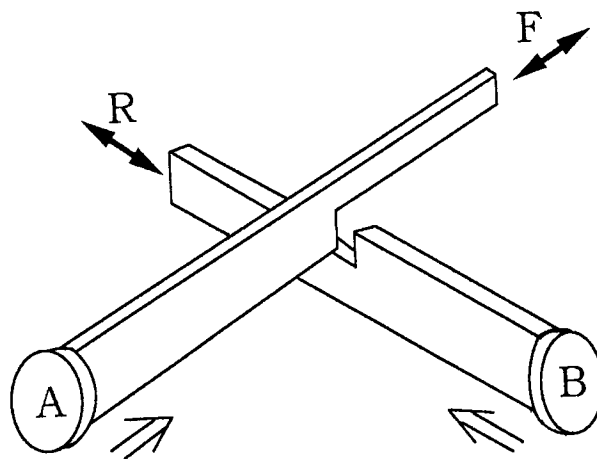
(b) 対応の各要素



(c) システムの動作と
マークの動き

図 II - 4 システムのモデル化例

以上で、MFGによる生産システムの概念レベルのモデル表現についてはつかめると思うが、さらにこれは詳細で具体的な制御モデル表現まで連絡づけられることを示そう。それには、説明の都合上、別の簡単なシステムの例がよいので、図Ⅱ-5の例を取り上げる。



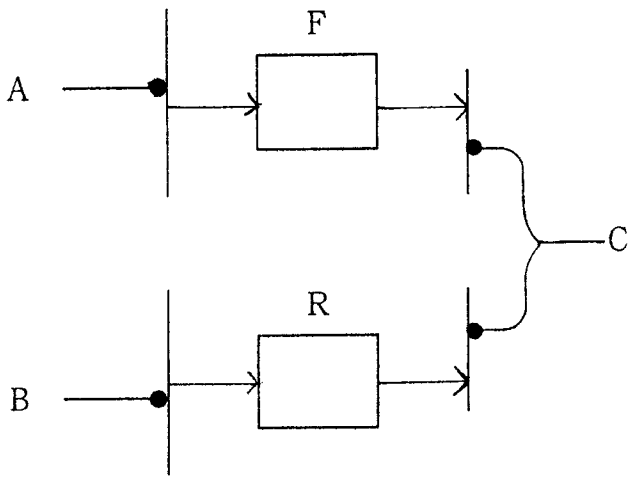
図Ⅱ-5 先着優先

これは先着優先である。図から明らかなように、先着優先とは、先に押ボタンを押した方を優先し、後では押ボタンが押せないかあるいは押しても反応しない仕組みをいう。図はこのシステムの説明のための機械的な機構である。

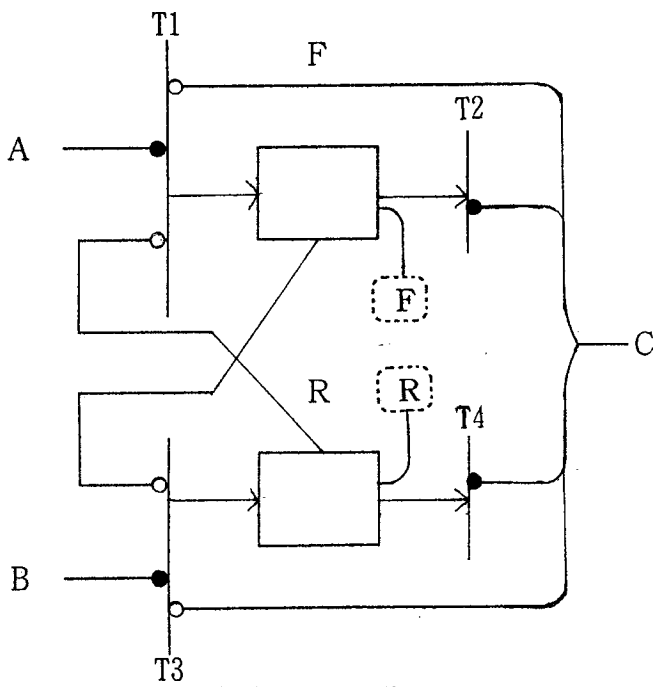
第1段階の外面的・現象的要求動作の表現から始めよう。まず、信号Aによる事象が発生し、その結果Fという動作状況が保持される。そして、この動作状況をボックスに割り当てる(Fボックス)。信号BによるR側についても同様。また、信号Cによる事象の発生でF、Rの保持を解除(リセット)できるようにしておく必要があるので、それをかき込む。[図Ⅱ-6(a)]。

次に、第2段階の制御論理の付加であるが、これは次のことを表現の中に織り込むことである [図Ⅱ-6(b)]。

①Fが既に保持されている(ボックスにマークが入っている)ときに、さらにBよりRの状況を保持することを禁止するため、FよりトランジションT3に抑止枝を出して、こ



(a) 第1段階



(b) 第2段階

$$\left. \begin{aligned}
 t1 &= a \cdot \bar{f} \cdot \bar{r} \cdot \bar{c} \\
 & f : \text{set} \\
 t2 &= f \cdot c \\
 & f : \text{reset} \\
 t3 &= b \cdot \bar{r} \cdot \bar{f} \cdot \bar{c} \\
 & r : \text{set} \\
 t4 &= r \cdot c \\
 & r : \text{reset}
 \end{aligned} \right\}$$

(c) 論理式

図II-6 制御システムのモデル化

れを防止する。R側についても同様。

②Cより、F、Rの解除指令が出されている間は、AまたはBからFまたはRを起動できないように、トランジションT1、T3にそれぞれ抑止枝を出しておく。

そして、最後に完成した図と制御の動的状態を表わすマークの動きの規則とから、論理式を作り [図Ⅱ-6 (c)]、具体的に実行可能なものにしておく。これから汎用PCによるプログラムも可能である (付図1参照, P.40)。

さて、以上のようにMFGを活用することにより、生産システムのモデル化ができ、さらに制御モデルにまで表現できた。このモデルは、制御の動的な挙動をマークの動きによって示すことができるため、どのような制御がなされているのか制御構造を表わしている。また、このことは、制御内容を電流や信号の動きを中心に表わす回路表現にはない特徴である。

このモデル化手法の紹介は、第Ⅲ章の1「制御内容の構造化と分類」へ向けてのものであることを付け加えておこう。

3. 制御内容表現法

制御の内容は、最終的にはシーケンス制御系全体との関わりを明確にして、一目でわかるような図にして、具体的に表現しておくことになる。この図は、シーケンス制御機能を中心に表わしたものであることから、制御機能表現図⁽¹²⁾とも言われている。

ここでは、訓練内容確定の問題を取り扱うための前準備として、現在用いられている表現法について整理しておくことにする。

表現法は、大きくふたつに分けられる。ひとつは「回路表現法」であり、もうひとつは、「制御対象の動作を手がかりにした表現法」である。これらの表現法の使用状況は、1987年現在では圧倒的に回路表現が多い。しかし、制御対象の動作を手がかりにした表現法も、「シーケンス制御における新しい表現法⁽¹³⁾」として注目されていて、今後の発展が期待されているものである。

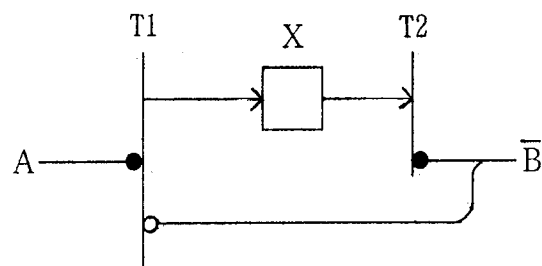
以下、説明の都合上、順序を逆にして述べる。

(1) 制御対象の動作を手がかりにした表現法

代表的表現図としては、次のようなものがあげられる。

ペトリネット (Petri net)、マーク流れ線図 (Mark Flow Graph、MFG)、グラフセ (GRAF CET)、動作線図、フローチャート、タイムチャート

この中でも、ペトリネット、マーク流れ線図、グラフセなどは、線形グラフ表現であって、既に見たように、制御の各段階が進むときの段階の間の変わり目に注目し、この「変わり目」に「事象 (できごと)」を対応させていた。そして、制御の内容を制御の各段階とその間の変わり目のつながりとして表現するものであった。さらにこの図に制御論理を付加して、具体的詳細なシーケンス制御機能表現図とすることができるものであった。その1例 (MFGによるもの) を図II-7に示す。



〔グラフ表現〕

これは線形グラフで表現されたものであり、次のように動作する。Aより運転信号が入り、条件が満たされていれば、Xにマークが入り運転状態になる。そして、この状態は保持される。停止するときは、 \bar{B} より停止信号が入り、条件が満たされていれば、Xが停止状態になる。

図II-7 グラフ表現の例

このグラフ表現の特徴は、最初の制御対象の要求動作を表現する概念的段階から、最終の具体的詳細な図に表現する段階まで、一貫した方法で表現できるところにある。ただ、制御系の運転が異常をきたし、非常停止が必要なときなどがあるが、このときの表現を図に織り込むことには若干難点があると言われている。⁽¹⁴⁾

(2) 回路表現法

この表現法においても、制御対象の動作分析をして、一連の自動動作を明らかにする

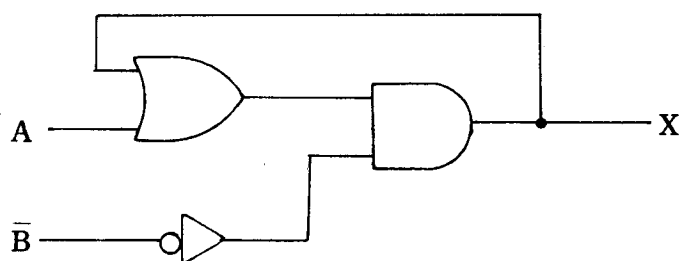
ことは、(1) の制御対象の動作を手がかりにした表現法の場合と同様である。回路表現では、これらの動作に制御論理を付加して最終的に完成された図が、論理回路であり、電気回路であるという点が異なっている。

この回路図は、制御系に与えられる論理条件の信号（入力）が、動作させる機器（出力）へどのように信号として流れてゆくかに着目し、制御系を論理回路の一種である順序回路として表現するもので、主として信号論的立場での表現である。

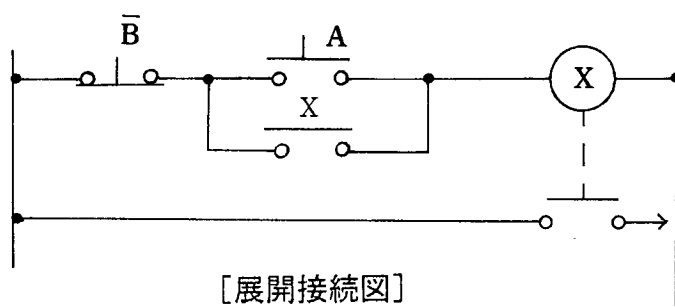
代表的表現図としては、次のようなものがあげられる。

論理図、展開接続図（ラダー図）

その1例を図Ⅱ-8に示す。



〔論理図〕



〔展開接続図〕

これは回路で表現されたもので、次のように動作する。Aより運転信号が入ると、Xとの論理和（または並列回路）が成立し信号が通り、次の論理積（または直列回路）が満たされていれば、Xに運転信号を出し、Xの状態を保持する。停止するときは、 \bar{B} より停止信号が入ると論理積（または直列回路）が成立しなくなり、Xの信号が止まり、運転を停止する。

図Ⅱ-8 回路表現の例

この回路表現の特徴は、最終の回路図にまとめる段階で飛躍があることである。それは次のようなことである。

制御対象の動作分析がされ、この動作を狙いながら、制御系入力として与えられる論理条件を組み合わせて、制御内容が作られる。このとき、制御対象の動作は、制御の流れとして表現されている。しかし、最終的に決められる制御内容は回路であり、制御の流れとは異質な信号の流れの表現となっていることである。つまり、制御の流れ表現をこれとは異質な信号の流れ表現である回路に変換する際の飛躍である。

4. 表現法における内容の捉え方の問題

表現法の相違は単なる形式上の問題で終るものではない。形式の中に内容が盛られる以上、その内容の捉え方は、形式の違いに左右されることになる。ここでは、先に見たふたつの表現法それぞれについて、内容を捉える上での問題点を整理する。

(1) 制御対象の動作を手がかりにした表現の場合

①制御がどのように進行しているかを理解するのに適している。

制御の流れを表現するものであるため、制御が動的にどのように進行しているかの理解が得易い。ただ、制御が正常に進行する場合にはよいが、異常が発生し、それに緊急に対処することなどについて理解するには、若干難点があると言われている⁽¹⁵⁾。

②制御内容を構造化できる。

次章Ⅲで取り扱うことになるが、制御の動的な進行状況は、制御の遷移経路および遷移条件から、パターン化が可能である。これにより制御内容を構造化でき、分類もできる。

③制御内容作り（設計）が体系的に行える。

この表現は、制御対象の要求動作分析という概念的段階から、最終の詳細で具体的段階まで、一貫した表現図で通せる。このため、制御内容作りやその理解を連続的、体系的に行えるようになる。

④表現法が一般に受け入れられていない。

この表現法は、歴史的に比較的最近になって提案されているもので、産業界においても十分普及しているものではない。従って、教育・訓練の場においても、一般に受け入

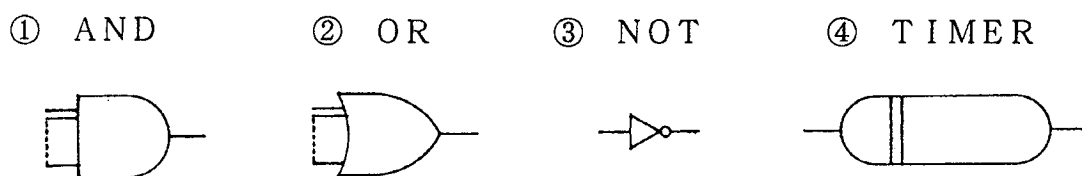
れられるまでに至っていないのが現状である。

ただ、フローチャート、動作線図など電気回路についての素養を必要としない表現法は、一部の機械系担当者の中で用いられてきている⁽¹⁶⁾ものである。

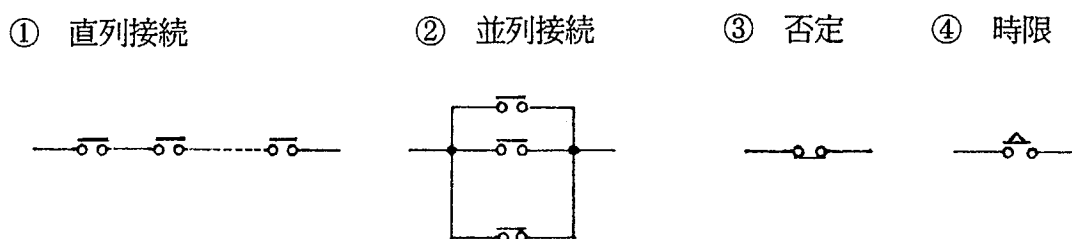
(2) 回路表現の場合

① 回路基本要素についての理解が必要。

シーケンス制御回路は基本的には、図Ⅱ-9に示す4要素の組み合わせによって構成することができる。そこで、まず理解の基本としては、これら要素の機能を知ることである。図には、(a)理論回路と(b)リレー回路とに分けて示してある。これらは図記号が異なることもあるが、(a)論理回路では、論理信号の流れになっているのに対して、(b)リレー回路では、接点と電磁コイルとの間の電流の流れになっている。この区別を知っておくことも必要である。



(a) 論理回路



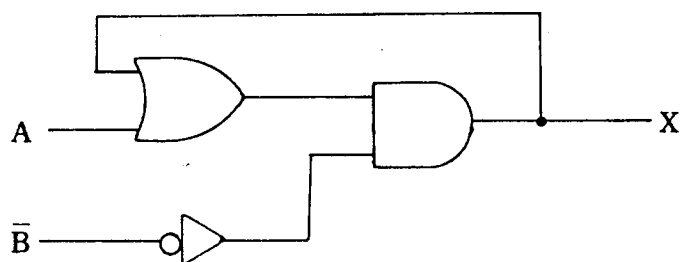
(b) リレー回路

図Ⅱ-9 回路の基本構成要素

② 順序回路についての理解が必要。

次に、回路全体の理解については、基本要素のそれぞれの機能の理解だけでは十分でない。これに加えて、各要素を組み合わせた順序回路全体の理解が要請される。

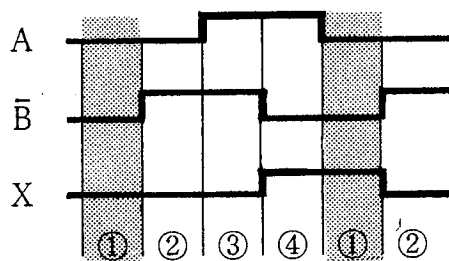
さらに順序回路は、先の回路要素を組み合わせた回路であるということだけでなく、過去の入力の履歴が出力に影響を与えるようにもなっているのである。言いかえると、同じ入力信号が与えられていても、ある動作の1ステップ前の入力信号の状態がどのようになっていたかで、出力状態は別のものになるということである。この例を簡単な回路で示したものが、図Ⅱ-10である。(b) 真理値表および(c) タイムチャートの①の時間区分を見てほしい。入力は、 $A=0$ 、 $\bar{B}=0$ であるのに、出力は、 X が0と1とのふたつの状態を取っていることがわかるであろう。



(a) 回路

	A	\bar{B}	X
①	0	0	0/1
②	0	1	0
③	1	1	0
④	1	0	1

(b) 真理値表



(c) タイムチャート

図Ⅱ-10 順序回路

③ 信号の流れの追跡ができ、故障点の発見等に適している。

回路の性質から、信号や電流の流れの表現になっていた。このため、各要素の機能を通過し、信号が入力から出力へとどのように流れているかを追跡する場合に適している。このような追跡は、制御系における故障点を発見しなければならない保全作業の中にあるものである。

④ 制御内容作り（回路設計）に難点がある。

回路設計は基本的には、順序回路の設計である。この設計では、入力組み合わせと過去の履歴とを関係させて論理式を作るという理論が適用されている。しかし、シーケンス制御に不可欠な時限機能などは論理式表現で包含できない⁽¹⁷⁾ ことなどから、設計は必ずしも理論的に行われるとは言い難い状況である。

そのため、実際の設計では、過去から伝承されている経験的手法や定石が用いられることが多い⁽¹⁸⁾ のである。

⑤ 表現法は一般に受け入れられている。

シーケンス制御は、電磁リレー回路で実現されてきたこれまでの長い実績があるので、回路とりわけ展開接続図（ラダー図）は、電気系の担当者を中心に定着している表現法⁽¹⁹⁾ である。その影響もあり、教育・訓練界においても、回路表現は一般に受け入れられている。