

実践報告・資料

論理回路による全空気圧式制御回路設計法

青森職業訓練短期大学校 制御システム系 大 槻 彰

Design of Pneumatic Control Circuit
Based on Logic Circuit Expression

Akira Otsuki

要 約 全空気圧式制御は、空気圧駆動機器を空気圧信号だけで制御する方法であり、電気制御やマイコン制御のように電気信号を扱わない。従って、湿気、ほこり、ノイズ対策を気にする必要はなく、また防火や設備面からも、有利性がある。このように「環境」に強い反面、空気圧縮性により、応答性、位置決め精度が劣るなどの短所もあるが、専用加工・組立機械を中心に、様々な分野で広く利用されている。

ここでは、学習者が理解し易いことを目標にして、その制御回路設計法を、タイムチャートと論理式により、教育訓練を展開する方法について述べる。全空気圧式でも、電気式でも、スタート信号が出力されてから、各シリンダーの動作信号を分析・処理するのは同じである。

このような回路設計法は目新しいものではないが、全空気圧式制御では、回路の簡単化について従来の設計資料では殆ど触れることはなく、設計者の経験で処理しているのが現状である。しかし、論理記号と空気圧記号の関係がわかれば、全空気圧制御回路は、論理回路応用設計と考えることができ、タイムチャートと論理式より誰でも制御回路の簡単化を検討でき、必要に応じて論理条件を付加することもできる。このことにより、全空気圧式制御は経験を要する特殊作業ではなく、通常の順序動作回路設計と同様に考えることができるので、カリキュラム上、他の学科や実習との関連性が明確となる。

I はじめに

近年、職業訓練短期大学の機械制御系のカリキュラムに、空気圧制御に関する実験実習が取り入れられるようになってきた。これは、機器の取扱が容易な上に、プログラマブル・コントローラ、マイコンなど様々な制御方法が可能なためであるが、全空気圧式については教育訓練上有効な回路設計法が確立されていないように思われる。そこで、論理回路と空気圧記号の関係からその設計方法について述べる。

II 空気圧記号と論理回路

空気圧バルブは、入力条件が成立すれば明確な出力が得られるので、図1のように論理回路によって記号化できる。例えば、図に示すようにスプリングリターン式(SR式)のバルブ(a)から(c)は、入力ポートへの空気圧供給

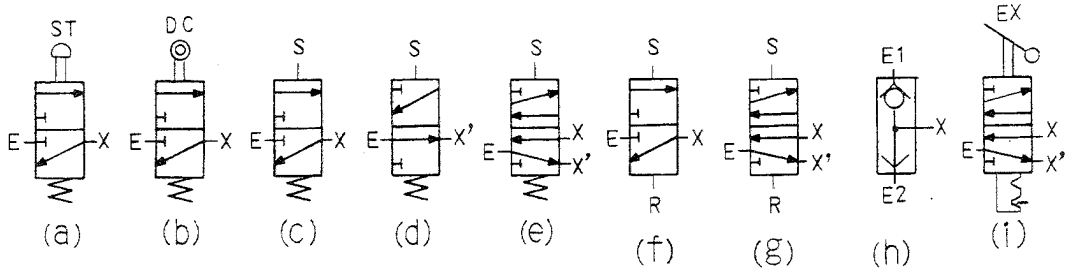
(E入力)と外部操作入力もしくはパイロット信号を入力とするAND素子に相当する。バルブ(a)(b)の外部操作入力は、スタート入力(ST入力)、シリンダ動作完了入力(DC入力)であり、バルブ(c)のパイロット信号はS入力である。これらの入力信号によってバルブは切り替わり、入力ポートEに空気圧が供給されていれば出力Xを得る。ここで、AND素子の例として、リミットバルブ(b)の論理式を示す。

[AND素子例リミットバルブの出力論理式]

$$X = E \cdot DC \quad (1)$$

論理式中の論理関数Xは出力ポート信号に相当し、論理変数EとDCは入力ポートへの供給圧と外部操作入力に相当する。これらの入出力論理は空気圧がある時は1、空気圧がない時は0の値をとるものとする。また、外部操作入力については能動入力とする。ここで、入力ポートへ空気圧を常時供給するとして、つまりE=1の条件で式(1)を考えると、外部操作入力DCはリミットバルブの

空気圧バルブ記号



論理回路記号

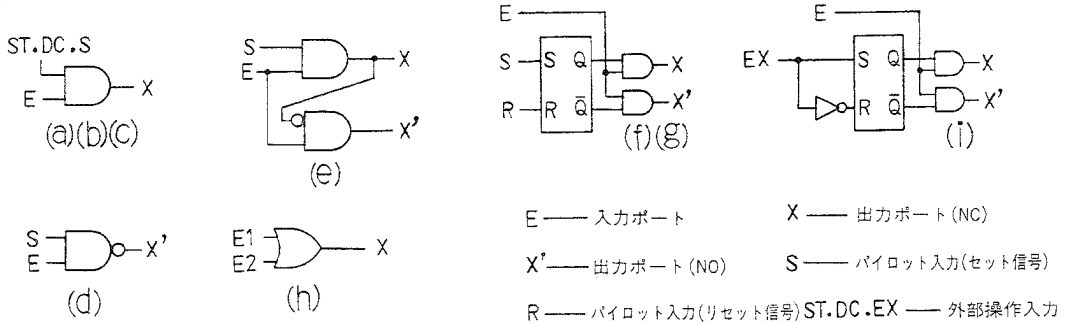


図 1 空気圧バルブの論理回路記号化

ゲート動作により、空気圧出力信号Xに変換されること
が解る。バルブ(a)(c)の場合は、式中のDCをSTまたはS
に変えればよい。

バルブ(d)は常時開出力の3ポートバルブで、負論理素
子と考えることができる。入力ポートに常時空気圧を供給
しておけば (E = 1)、パイロットS入力に対する反転
出力X'を得る。

[常時開バルブの出力論理式]

$$X' = 1 \cdot \bar{S} \quad (2)$$

バルブ(e)はスプリングリターン式の5ポートバルブで、
1入力ポートと2出力ポート及びパイロットS入力口を
持っており、2つの出力論理を得る。

[5ポートSR式バルブの出力論理式]

$$X = E \cdot S \quad (3)$$

$$X' = E \cdot \bar{S} \quad (4)$$

ここで、入力ポートに常時空気圧が供給されていれば
E = 1となり、 $X = \bar{X}'$ の関係が成り立つ。

バルブ(h)はOR素子に相当するものであり、シャトル
バルブ (SH) と呼ばれている。いずれの入力ポートE
1、E2に入力しても出力Xが得られる。

[シャトルバルブの出力論理式]

$$X = E1 + E2 \quad (5)$$

バルブ(f)(g)はフリップフロップ型 (FF型) のバルブ
で、全空気圧式制御回路を設計するうえで重要である。3
ポートバルブ(f)は5ポートバルブ(g)の \bar{Q} とX'を省略した
ものと考えることができる。ここで、バルブ(g)出力ポート
は2つあるので、出力論理式も2式となる。

[フリップフロップ型バルブの出力論理式]

$$X = (S + Q) \cdot \bar{R} \cdot E \quad (6)$$

$$X' = (R + \bar{Q}) \cdot \bar{S} \cdot E \quad (7)$$

但し、式(6)(7)の入力条件式として

$$S \cdot R = 0 \quad (8)$$

まず、式(8)はFF論理素子の条件式で、S入力とR入力
の同時入力が許されないことを示している。バルブ(g)は
パイロットセット入力 (S入力) によりQというスプール
位置に、パイロットリセット入力 (R入力) により \bar{Q} とい
うスプール位置に切り替わり、一旦セットされると、たと
えS入力が消えても、次にリセットされるまでQ状態を
保持し続ける。これはR入力でも同様である。この考え
方はリレーコイルを用いた自己保持回路と同じであり、式
(6)(7)として表すことができる。

ここで、出力X及びX'を得るためには、入力ポートに空気が供給されていなければならない。式(6)(7)においてE=0である場合は、如何なるS及びR入力が存在しても、出力X及びX'は共に0であることに注意しなければならない。式(6)(7)にE=1の条件を代入すると次式が成り立つ。

$$X = (S + Q) \cdot \overline{R} \quad (9)$$

$$X' = (R + \overline{Q}) \cdot \overline{S} \quad (10)$$

式(9)より \overline{X} を求めてみると

$$\overline{X} = \overline{(S + Q) \cdot \overline{R}} = \overline{(S + Q)} \cdot R$$

ここで、ド・モルガン則と補元則より

$$\overline{X} = (R + \overline{Q}) \cdot \overline{S} - S \cdot R$$

入力条件式(8)を代入して

$$\overline{X} = (R + \overline{Q}) \cdot \overline{S} \quad (11)$$

ゆえに、E=1の条件下で次式が成り立つ。

$$X' = \overline{X} \quad \text{または} \quad X = \overline{X'} \quad (12)$$

バルブ(i)は回路の切り替え操作などに用いられ、位置止め機構をもつ。これは切り替え位置を記憶する機構で、そのノーマル位置は、JISに基づき位置止め記号の切

り欠き部に短い横棒を引いて表す。外部操作入力はEXで、切り替えレバーから手を離しても、その位置で保持され、このようなバルブはD型(データ)FF論理素子と考えることができる。

[5ポート切り替えバルブの出力論理式]

$$X = EX \cdot E \quad (13)$$

$$X' = \overline{EX} \cdot E \quad (14)$$

ここで、E=1の条件下で

$$X' = \overline{X} \quad \text{または} \quad X = \overline{X'} \quad (15)$$

以上の説明の通り、空気圧バルブの入力ポートEへの空気圧供給条件は、バルブをイネーブル(能動)状態にする必要条件である。すなわち、他の入力条件が如何なる状態にあっても、E入力が存在しない時は、バルブ出力はX及びX'とも0となり、空気圧信号処理の意味を持たない。

II 制御回路設計

1. 設計課題と空気圧基本回路図

課題として、3本のシリンダが連続動作する制御回路を設計する。各シリンダは初期状態で後退端で停止して、その動作順序は次のようになるとする。

第1位相……シリンダA前進

第2位相……シリンダB、C同時前進

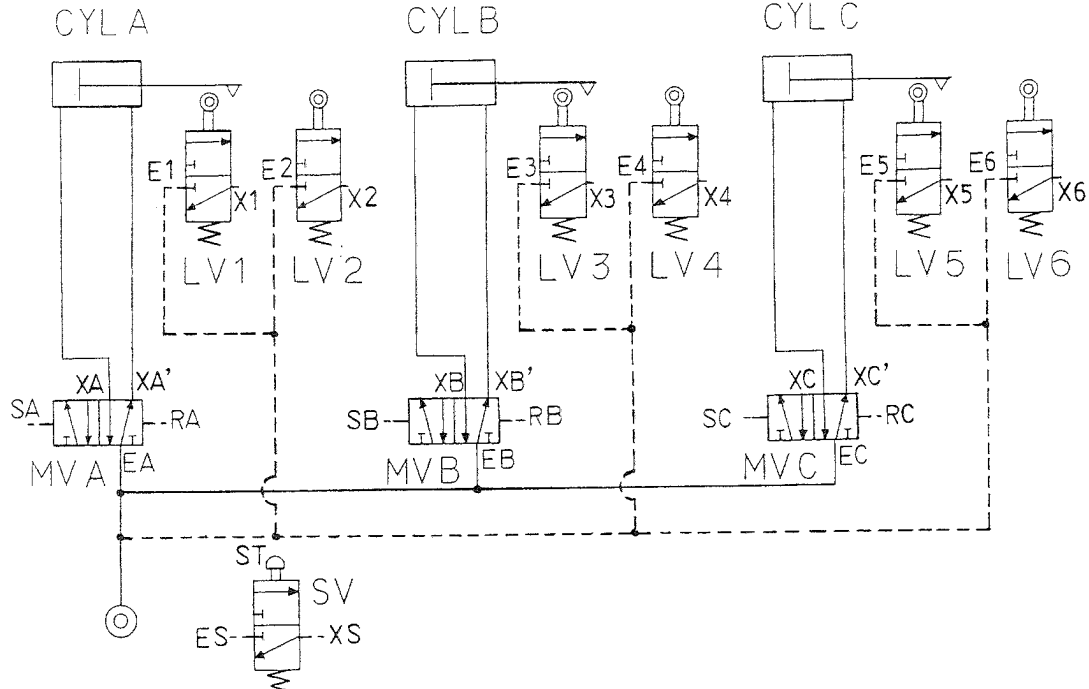


図2 空気圧基本回路図

- 第 3 位相……シリンダ C 後退
- 第 4 位相……シリンダ C 前進
- 第 5 位相……シリンダ B、C 同時後退
- 第 6 位相……シリンダ A 後退

但し、第 3、第 6 位相は前の位相でシリンダ B、C の動作が共に終了していることを条件とする。

課題の制御回路を設計するに当たり、空気圧基本回路を図 2 に示す。シリンダ A、B、C の方向を制御するために、図のように各シリンダに対してマスターバルブ(MV A、MVB、MVC)を設ける。マスターバルブは 5 ポート、FF 型の方向制御弁とし、入力ポート (E A、E B、E C)には空気源から直接空気圧を供給する。また、出力ポートの常時開側 (X'A、X'B、X'C) はシリンダロッド側へ、常時閉側 (X A、X B、X C) はシリンダヘッド側へ配管する。この状態で、各マスターバルブの S 入力 (S A、S B、S C)があればシリンダは前進もしくは前進端で停止し、R 入力 (R A、R B、R C)があればシリンダは後退もしくは後退端で停止する。また、シリンダの前進及び後退完了信号を検出するために 6 個リミットバルブ (L V) を設ける。リミットバルブはシリンダが停止端に留まっている間だけ空気圧信号を出力するため、3 ポート、スプリングリターン式とする。回路設計初期段階では、リミットバルブの入力ポート (E 1 から E 6 まで)へ空気源から直接空気圧を供給するように設定しておく。従って、リミットバルブ出力ポートからバルブゲート動作による空気圧信号 X 1 から X 6 までが出力される。スタート信号はスタートバルブ (S V) によって出力される。スタートバルブがスプリングリターン式ならば、押しボタンを押し続ける間だけ動作する単動回路となり、位置止め機構付きならば連続動作回路となる。

2 タイムチャート (1) の作成

イ、シリンダ動作とリミットバルブ出力信号状況

タイムチャートには色々あるが、全ての要素の状態を一枚の様式上に表現し得る方式が望ましい。その例として、図 3 のタイムチャートを説明する。まず、図 3 上の動作仕様欄にシリンダの動作順序を書き込み、運動機器欄に各シリンダの各位相における動作状況を記入する。そして、各シリンダに所定の動作を行わせるために、制御機器欄のマスターバルブの切り替え状態を横方向に破線で記入する。上側の破線は S 入力によってバルブスプールが Q の状態にあることを示し、下側の破線は R 入力によってバルブスプールが \bar{Q} の状態にあることを示す。この時、入力ポートに常時空気圧が供給されているので、シ

リンダは駆動状態にあることが解る。次に、リミットバルブ欄に、各リミットバルブがどの位相において信号を出力しているかを黒棒で記入する。信号はタイムライン上 (位相を仕切る縦線のこと) で出力し始め、シリンダロッド先端部のドックとリミットバルブのローラ部の位置関係によって、若干のタイム・ラグが生ずるので、これを表現するために、タイムラインから多少はみ出た位置で終了させる。ここでは図 2 に基づき、リミットバルブの出力信号を X 1 から X 6 として記入する。

ロ、論理バルブの導入と位相検出信号の選定

次に、動作仕様に従い論理バルブを導入する。論理バルブ欄においてスタートバルブを設定し、第 1 位相でスタートバルブの動作開始信号 X S を得る。これは第 6 位相終了信号 X 1 とスタートバルブの外部操作入力 S T の AND 回路となる。そのため、スタートバルブとして図 1 のバルブ(a)を選択しているが、ここでは連続動作も考慮して外部操作力 S T を押し続けるものとする。論理バルブ G V 1 と G V 2 は第 3 及び第 6 位相の動作仕様を満たす AND 回路を得るため設置する。論理バルブ G V 1 は AND 素子であるので図 1 のバルブ(c)とする。論理バルブ G V 2 はバルブ(e)とする。これは論理バルブ G V 2 にバルブ(c)を用いて出力論理 $X 5 \cdot X 3$ を得た時、第 4 位相における出力信号 X 5 が消えてしまうからである。この対策としてバルブ(e)を用い、第 4 位相で $X 5 \cdot \overline{X 3}$ の出力信号を得る。これらの出力論理式は(1)(3)(4)より次のようになる。

[論理バルブ S V、G V 1、G V 2 の出力論理式]

$$S V \text{ 出力} \quad X S = X 1 \cdot S T \quad (1)$$

$$G V 1 \text{ 出力} \quad X G 1 = X 4 \cdot X 6 \quad (2)$$

$$G V 2 \text{ 出力} \quad X G 2 = X 5 \cdot X 3 \quad (3)$$

$$G V 2 \text{ 出力} \quad X G 2' = X 5 \cdot \overline{X 3} \quad (4)$$

ここで論理バルブの入力ポート E へ供給する信号と、外部操作入力及びパイロット S 入力を決める。スタートバルブの E 入力信号は X 1 で、外部操作力は S T となる。論理バルブ G V 1 の E 入力は X 4 と X 6 のどちらでもよいが、ここでは長い出力信号 X 4 を E 入力とし、X 6 を S 入力に設定する。論理バルブ G V 2 の E 入力は前述の制約があるので X 5 とし、S 入力を X 3 とする。以上の設定を行い、論理バルブの切り替え状態と信号出力状況をタイムチャートの論理バルブ欄に記入する。論理バルブは外部操作入力とパイロット S 入力切り替えられ、入力条件が 0 となった時、バネの力で元に戻る。それぞれのバルブ切り替え状態で、入力ポートへの E 入力条件が成立した場合のみ式(1)から式(4)に従い各出力を得る。バ

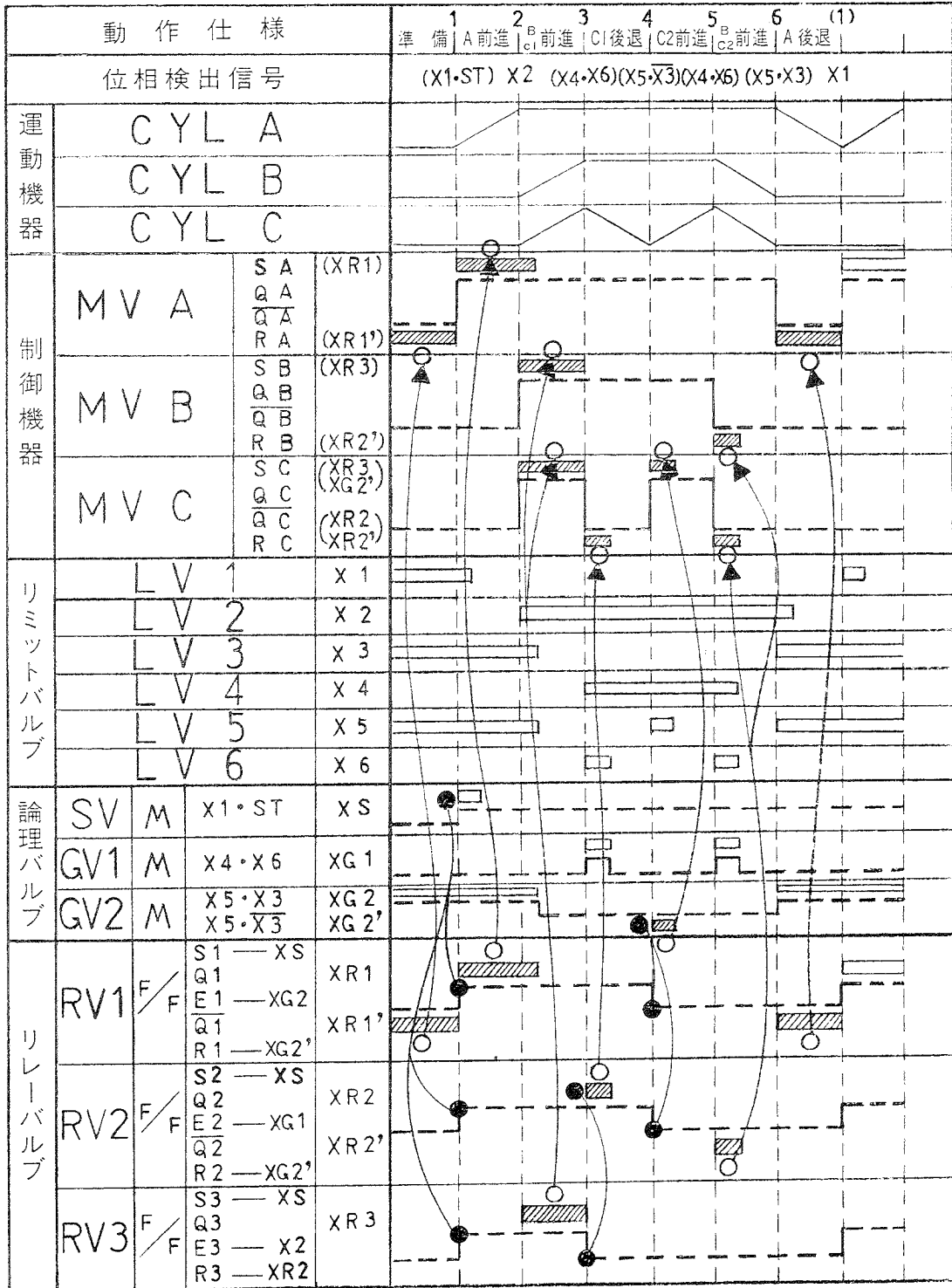


図3 タイムチャート (I)

バルブ切り替え状態はマスターバルブと同様に破線で表し、信号出力状況は黒枠で欄内に書き込む。

次に、タイムチャートの位相検出信号欄に、各位相の始まりを検出する信号を選定して記入する。第1位相-X S、第2位相-X 2、第3位相-X G 1、第4位相-X G 2'、第5位相-X G 1、第6位相-X G 2となる。ここで、後の簡単化の作業をやり易くするため、式(16)から式(19)までの論理式に従い、リミットバルブ信号で書き込んでおく。論理バルブによるものは括弧で囲む。位相検出信号はその位相動作を実現させるスイッチの役目を果たし、各位相に1つ以上存在しなければならない。

ハ、リレーバルブ導入の検討とその方法

これまでの作業は、動作仕様を決定してからの一連の必然的処理であり、現時点で前述の波線アンダーラインの出力信号XS、X 2、X G 1、X G 2、X G 2'に集約される。この出力信号を各マスターバルブのS入力やR入力信号として用いる。しかし、これらのバルブ出力信号が、次の論理式と入力条件式を満足するS入力及びR入力信号ならば、リレーバルブを導入する必要はない。

[マスターバルブの出力論理式と入力条件式]

$$\text{CYL前進信号 } MVX = (S + Q) \cdot \overline{R} \quad (20)$$

$$\text{CYL後退信号 } MVX' = (R + \overline{Q}) \cdot \overline{S} \quad (21)$$

$$S \cdot R = 0 \quad (22)$$

これは、マスターバルブは図1のバルブ(g)と同じ型式で、入力ポートEに常時シリンダ駆動用空気圧が供給されており、式(8)から式(22)までと同じ条件にあるためである。ここで、タイムチャートに基づき各マスターバルブのS入力及びR入力を当てはめてみると、次のようになる。

MVA SA入力=第1位相検出信号XS

RA入力=第6位相検出信号XG 2

MVB SB入力=第2位相検出信号X 2

RB入力=第5位相検出信号XG 1

MVC SC入力=第2、第4位相検出信号

X 2とXG 2'

RC入力=第3、第5位相検出信号XG 1

以上のS入力とR入力はタイムチャートの同一位相上で重なり、式(22)を満足していない。従って、これらの重なりを解消するため、リレーバルブを設定する必要がある。リレーバルブは電気制御で使用されるリレーコイルと同じような役割を果たす。すなわち、空気圧信号による自己

保持機能を有するのは、図1のバルブ(f)(g)であり、これをリレーバルブとして用いる。従って、リレーバルブの出力論理式は式(6)(7)となり、処理すべき信号を入力ポートEに供給しておき、式(8)を満足するパイロットS入力及びR入力を用い、リレーバルブ出力信号XおよびX'を得る。ここからの設計作業は処理する信号により数通り考えられる。ここでは論理バルブ出力信号XG 2を処理する目的で、リレーバルブRV 1を導入する。S 1入力をXSとし、R 1入力をXG 2'とすれば、RV 1出力信号としてXR 1とXR 1'を得る。また、論理バルブ出力信号XG 1を処理する目的でリレーバルブRV 2を導入する。RV 1同様、S 2入力をXSとし、R 2入力をXG 2'とすれば、リレーバルブRV 2出力信号としてXR 2とXR 2'を得る。リミットバルブLV 2の出力信号X 2は4位相以上の長い信号で、第3位相以降を切り捨てないと第2位相検出信号として利用できない。従って、リレーバルブRV 3を導入し、S 3入力をXS、R 3入力をRV 2の出力信号XR 2として、リレーバルブRV 3の出力信号XR 3を得る。

ニ、空気圧信号の論理式化とタイムチャートのまとめ
リレーバルブにより、新たに得られた信号の論理式は式(6)(7)(8)より次のようになる。

$$XR 1 = (XS + Q 1) \cdot \overline{XG 2'} \cdot XG 2 \quad (23)$$

$$XR 1' = (XG 2' + \overline{Q 1}) \cdot \overline{XS} \cdot XG 2 \quad (24)$$

$$XR 2 = (XS + Q 2) \cdot \overline{XG 2'} \cdot XG 1 \quad (25)$$

$$XR 2' = (XG 2' + \overline{Q 2}) \cdot \overline{XS} \cdot XG 1 \quad (26)$$

$$XR 3 = (XS + Q 3) \cdot \overline{XR 2} \cdot X 2 \quad (27)$$

但し、入力条件式として

$$XS \cdot XG 2' = 0 \quad (28)$$

$$XS \cdot XR 2 = 0 \quad (29)$$

リレーバルブの信号処理作業をタイムチャートのリレーバルブ欄にも記入する。備考欄にはバルブの型式、インポート入力E、パイロットS及びR入力、出力信号名を記入する。次に、パイロット信号によるリレーバルブ切り替え状況を破線で表し、出力信号部を黒枠で記入する。この時、用いたパイロット信号を明かにするため黒丸でマークし、バルブ切り替え時へ実線でつなぐ。得られた出力信号が式(20)(21)(22)を満足するかどうかを確認し、よければ信号の黒枠内にハッチングする。それを各マスターバルブのパイロット信号欄のS入力とR入力に記入して括弧でくくる。更に、各ハッチング部の信号がマスターバルブのどのパイロット信号に対応するか明確にするため、用いた信号に丸印を付けそれぞれ実線で結ぶ。以上のタイムチャート処理作業より得た結果を論理回路に表現す

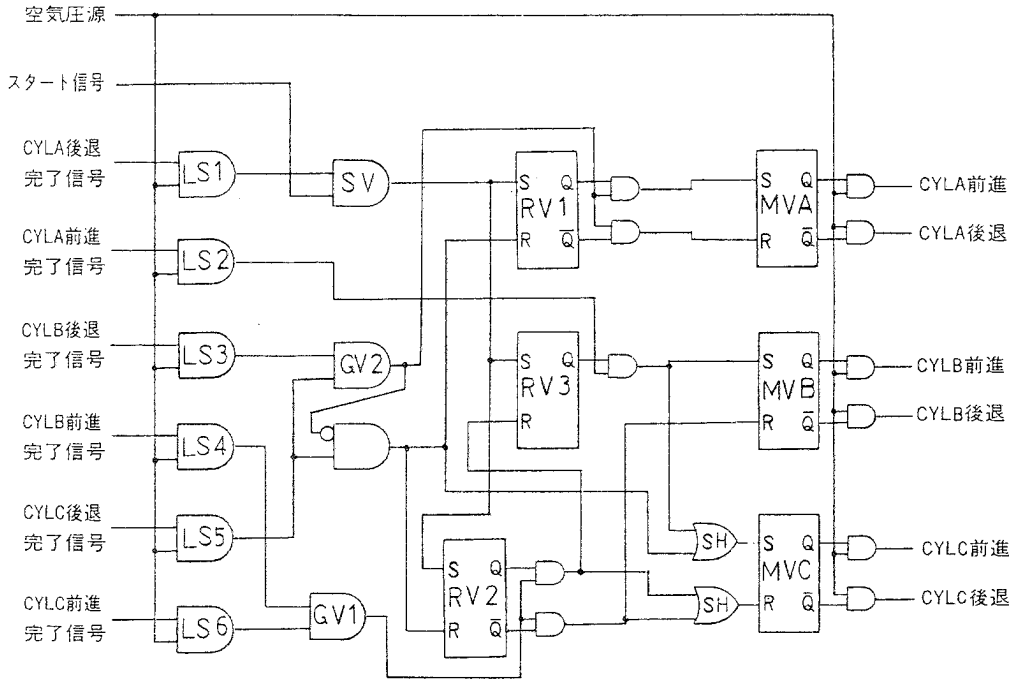


図4 空気圧回路の論理回路化(I)

ると図4となる。但し、マスターバルブMVCのバイロットS及びR入りに接続しているSHはシャトルバルブで、1サイクル中2度の前進後退バイロット信号を受け入れるOR回路である。

3. 簡単化—タイムチャート(II)の改良

前述の論理回路をタイムチャート(II)により簡単化を検討する。元々、リレーバルブは1入力に対して2出力を得るのみで、省略は難しいが、論理バルブはAND回路が主体で、簡単化し易い。そこで、リミットバルブLV2の出力X2をリミットバルブLV5の入力ポートに供給し、その出力X5をリミットバルブLV3の入力ポートに供給する。この時、LV3を5ポート型にすれば、出力X及びX'が得られる。また、リミットバルブLV4の出力X4をリミットバルブLV6の入力ポートに接続する。この回路変更により、論理バルブGV1とGV2は省略できる。ここで、リミットバルブLV3とLV6の出力信号論理は、 $X2 \cdot X5 \cdot X3$ と $X4 \cdot X6$ である。これらの出力信号は1サイクル中の動作において2度出力するので、信号処理用リレーバルブは2個必要である。図中のリミットバルブ欄の二重丸は空気源より入力ポートに直結したリミットバルブであり、この出力信号を元に、タイムチャート(I)と同様の作業を行うと図5のタイムチャート(II)を得る。

4. 空気圧回路図

簡単化により図6を得る。これを空気圧回路に変換すると図7となる。ここで、新たに付加した回路を補足説明する。ESVは非常停止バルブで、駆動系を急停止させる。シリング内の空気圧力は大気中に排出され、手で移動できる。また、IVは初期設定バルブであり、シャトルバルブSH3からSH7によりOR回路を構成してあるので、動作中であれ停止中であれ、マスターバルブとリレーバルブは初期設定バルブの出力信号でリセットされ、初期状態に戻る。

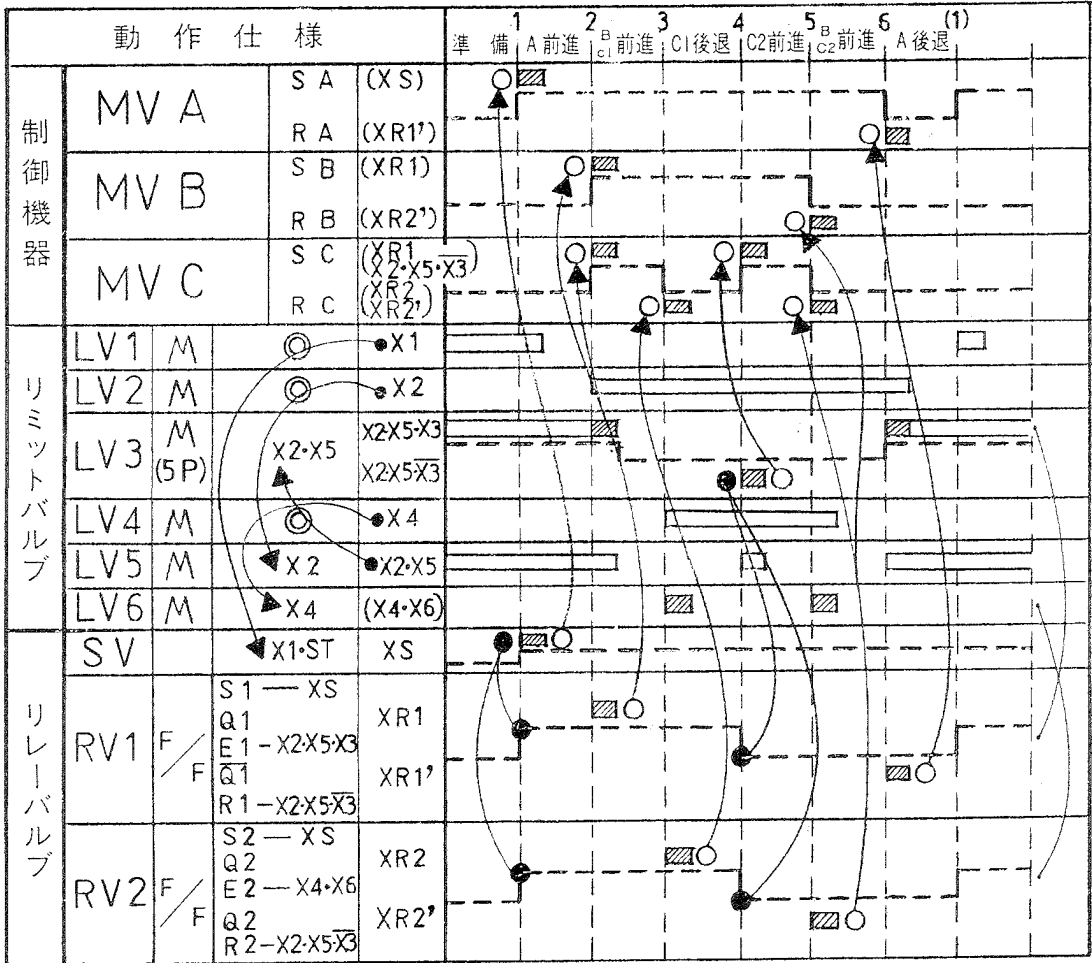


図 5 タイムチャート(II)

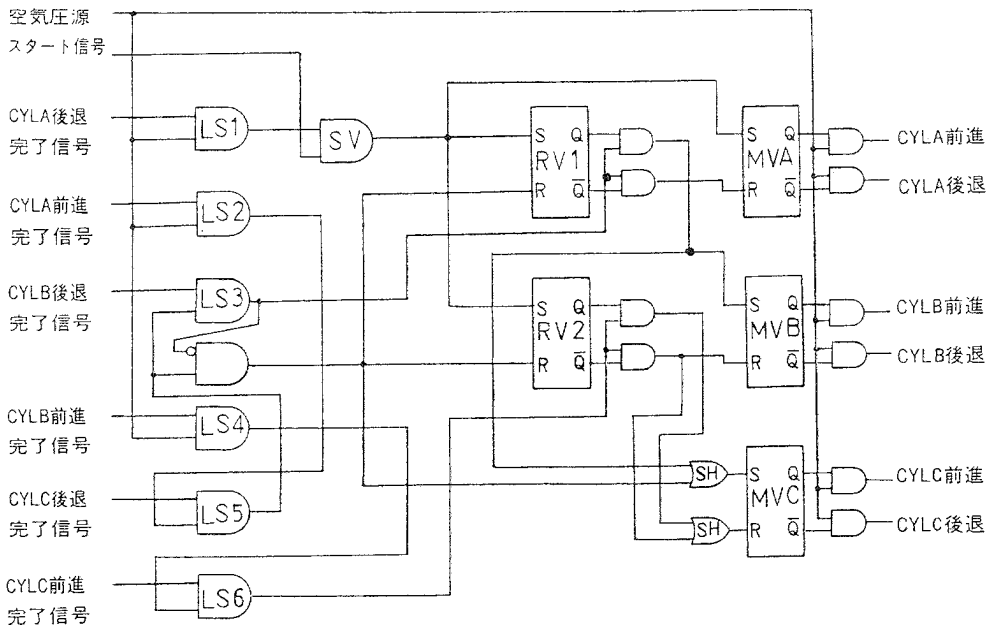


図 6 空気圧回路の論理回路化(II)

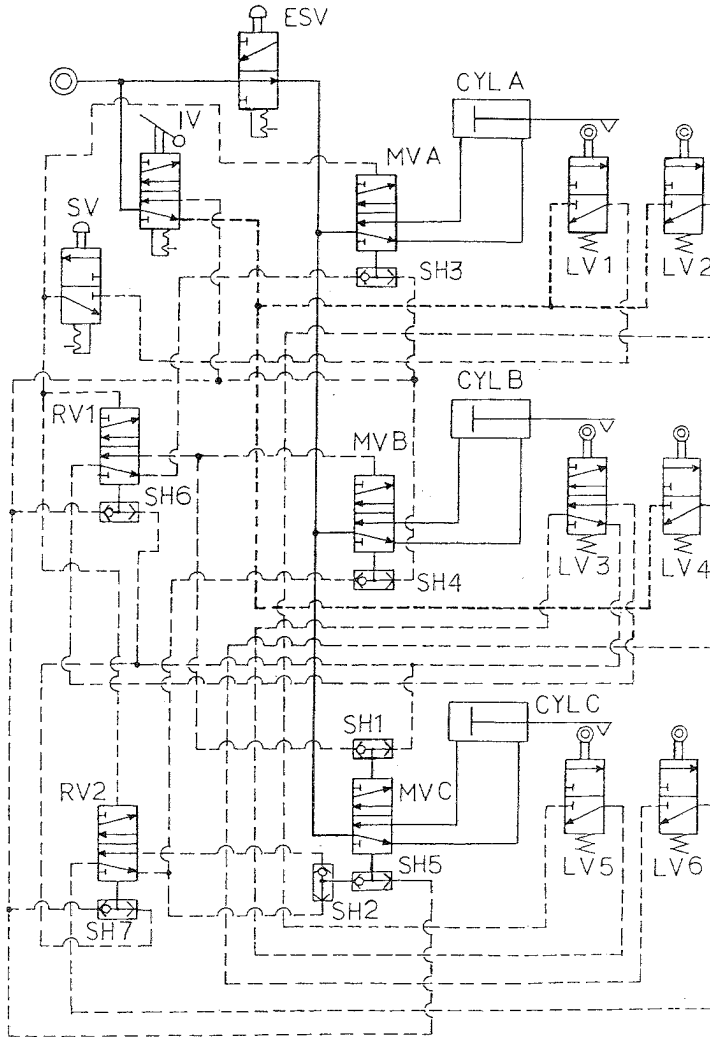


図7 全空気圧回路図

IV まとめ

一連の設計作業により目的の回路図は得たが、実際の装置に利用するためには、操作性や誤作動防止の面から様々な対策がなされる。しかし、タイムチャートを用いた、論理回路設計手法による信号処理作業は、他の回路設計との関連性があり、理解し易く、本手法は教育訓練上から考えても有効性がある。更に、これらの回路設計手順に基づきCAD化することも容易であり、論理回路設計応用課題としての、全空気圧制御の意義は大きいと考える。

参考文献

1. 油圧と空気圧 7巻5, 6 : 8巻1

貫田 (全空気圧制御回路の設計法)

2. 油圧と空気圧 8巻5

戸塚 (空気圧制御の回路設計)

3. Pneumatic Application FEST co., LTD

W. Deppert / K. Stoll