数理解析研究所講究録
第 140 巻 1972 年 379-394

多値論理による非同期論理構成について

古賀 義亮

1 はしがき.

情報伝送の分野では，伝送路の情況によって伝送速度が変化するような場合に，非同期情報伝送を行う方法がある。[1)2)] 電子計算機などの論理回路においても一般には，情報伝送速度，および情報処理速度が変化すると考えた方が都合がよい場合がある。たとえば並列加算回路の桁上げ情報，条件によって変化する制御回路などがその例としてあげられる。

また最近ではCDC（Control Data Corp., Minneapolis）が開発を行っているSTAR電子計算機は，パイプライン方式をとっているといわれている。このパイプライン方式とは，たとえば演算回路のうち加算回路をいくつか，たて方向につないで入力側からつぎつぎに異った数値を連続的に入れ，この加算回路の中を数値が流れていく途中で，数々の計算を行わさせるように構成したものである。Illiac Ⅳのように，演算部の

みを並列に配置した方式よりも、このような方式によって構成を行った方が、計算の種別によっては、より速く計算処理が行なわれるといわれている。このようなパイプライン方式に非同期論理回路を用いることが考えられる。

一方、最近の集積化回路技術の進歩によって、集積化記憶装置が実用化の段階（IlliacⅣでは64ビット128KW，188nSecサイクルタイムの半導体化記憶装置が成功している）にはいり、ますます記憶装置が高速化されている。基本論理回路の方も高速化が進み、ECL（Emitter Coupled Logic）論理回路では、ゲートあたりの遅延時間は1nsec以下となりつつある。しかしながらプリント基板上の配線，基板間の配線など信号線上の遅延は、画一的に長さを定めるのは，きわめて困難であり、したがって同期信号の同期時刻は、かなり大きな時間幅をとって設定しなければならず、同期信号の分配も正確に定めなければならない。必ずしも充分に論理回路の持つ速さを生かして設計できるとは限らず、基本論理素子の限界速度で動作させるためには、非同期方式によるシステム構成の方がすぐれているといえよう。

ここでは、組み合わせ論理回路を対象として，非同期論理処理方式に必要な条件について調べ、非同期情報処理には、多値を必要とすることを明らかにし，多値を用いた非同期論

理方式のいくつかの方法を提案し，これについて検討を加えることにする。

2. 非同期情報伝送

非同期情報伝送において，伝送することのできる離散的な信号値の集合Iは $\{i_0, i_1, \cdots, i_{n-1}\}$ と n 個の信号から成るものとする。時間的な信号（タイミング）は少くとも2値を必要とするが，これを $T=\{t_0, t_1\}$ と表わすことにする。非同期情報伝送方式として，つぎの3つに分類することができる。

a. 情報点区切方式.

伝送すべき情報点は常に t_1 に割りあてる。すなわち t_1 時刻に始まるタイムスロット*に，$n-1$ 個の情報点と $\{i_1, \cdots\cdots, i_{n-1}\}$ の中から伝送し，t_0 時刻に始まるタイムスロットでは，情報の区切り表現のため，常に信号 i_0 を伝送する。この方式では $2m$ タイムスロットの中で $(n-1)^m$ 個の情報伝送が可能である。

---

* タイムスロットとは，$\Delta t=|t_1 \sim t_0|$，すなわちある信号値を保持している時間間隔と定義する。

b．情報点切換方式

タイムスロット t_1（時刻 t_1 で始まるタイムスロット）では、タイムスロット t_0 に伝送されている信号値 i_{t_0} とは異った信号値 $i_{t_1} \in I - i_{t_0}$ を伝送する。タイムスロット t_1 のあとに続くタイムスロット t_0 では、伝送すべき信号値は $I - i_{t_1}$ の中から選定する。この方式では $2m$ タイムスロットの中で $(n-1)^{2m}$ 個の情報伝送を行い得る。

c．情報点分離方式

タイムスロット t_0 では $P\,(<n)$ 個の信号値 $\{i_0, \ldots, i_{P-1}\}$ の中から選定した値を伝送し、別のタイムスロット t_1 には、$n-P$ 個の信号値 $\{i_P, \ldots\ldots, i_{n-1}\}$ の中から選定した値を伝送する。この方式では $2m$ タイムスロットの中で $P^m(n-P)^m$ 個の情報を伝送することができる。$P=1$ のときは、情報点区切方式と一致する。

以上3つの方式について、$n \geq 3$，$n > P > 1$ のとき

$$(n-1)^{2m} > P^m(n-P)^m > (n-1)^m \qquad (1)$$

であるから、情報点切換方式が、単位時間内に送り得る情報点の数が最大であるという点からみて、もっとも能率のよい伝送方式であるといえよう。この情報点切換方式の符号化法については文献(1)に述べてある。

3. 非同期論理構成方式

非同期論理回路構成については，Illiac II で用いられた speed independent 回路構成があるが，これは前節の情報点区切方式に相当するものと考えられる。情報処理における情報点切換方式および情報点分離方式については，いまだ明確な議論は行なわれていないようである。本節では，これ等の方式に相当する組み合わせ論理回路構成上要求される条件などについて検討を行う。

一般に組み合わせ論理回路は，g 個の入力変数 $x_0, x_1, \cdots, x_{g-1}$ の結合として，つぎのように表わすことができよう。

$$f(x_0, x_1, \cdots, x_{g-1}) \tag{2}$$

この g 変数関数は，万能*な 2 変数関数

$$g(x_0, x_1) \tag{3}$$

によって展開することができる。ここでは，一般的な 2 変数論理関数の非同期化論理構成方式について述べる。この手法は g 変数関数の構成にも拡張することができる。

---

* 万能な関数とは sheffer function のこと。

a. 情報点区切論理方式

変数 x は，タイムスロット t_0 では，タイムスロット t_1 に送られる情報（信号値）との区切りのため，必らず特定の値 ϕ ($\in$ I) をとるものとする。このとき関数 $g(x_0, x_1)$ の値は，

$$g(x_0, \phi) = g(\phi, x_1) = \phi \qquad (4)$$

となるように論理関数 g を構成する。つぎにその例をあげる。

例 1. 2重2値論理[3)] を用いて，3値非同期論理回路の構成を行う方法について述べる。こゝでは3値論理のST方式半加算器[4)] のうち同位桁の値を与える関数を扱う。すなわちこの関数は，

		x_1: $\bar{1}$	0	1
x_0	$\bar{1}$	1	$\bar{1}$	0
	0	$\bar{1}$	0	1
	1	0	1	$\bar{1}$

なる真理表で与えられる。この関数を2重2値（4値）を用い，ϕ を (0, 0) に割りあてて，つぎのような真理値表を構成する。

		x_1: ϕ	$\bar{1}$	0	1
	$x_0'\ x_0''$ \ $x_1'\ x_1''$	00	01	10	11
ϕ	00	00	00	00	00
x_0: $\bar{1}$	01	00	11	01	10
0	10	00	01	10	11
1	11	00	10	11	01

$g(x_0', x_0'', x_1', x_1'')$

$$g' = x_0' \cdot x_1' (\overline{x_0''} + \overline{x_1''}) + x_0'' x_1'' (\overline{x_0'} + \overline{x_1'}) \quad (5)$$

$$g'' = x_0'' x_1' \overline{x_1''} + x_0' \overline{x_0''} x_1'' + x_0'' x_1'' (\overline{x_0'}\,\overline{x_1'} + x_0' x_1') \quad (6)$$

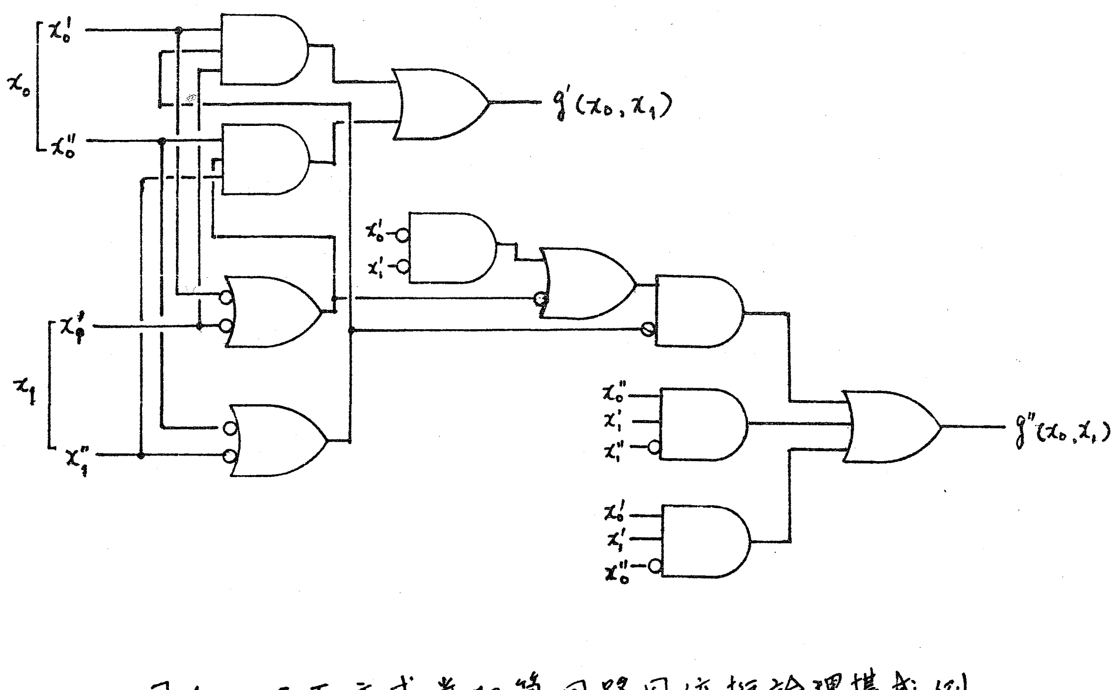

図1. ST方式半加算回路同位桁論理構成例

6. 情報点切換論理方式.

この方式では、関数 $g(x_0, x_1)$ の変数 x_0, x_1 ともに、タイムスロット t_0 における値と，つぎのタイムスロット t_1 とでは必らず別の値をとるようにする。x_{0t_0} の値を $i_{x_0t_0}$ とすれば、x_{0t_1} の値は $I - i_{x_0t_0}$ より選定する。ここで情報点の $n-1$ 個からなる集合を $S = \{s_0, s_1, \cdots\cdots, s_{n-2}\}$ としよう。この情報点切換方式では、情報点の数は、信号値より1つだけ少い。このように情報点と信号値との対応をつけた系で

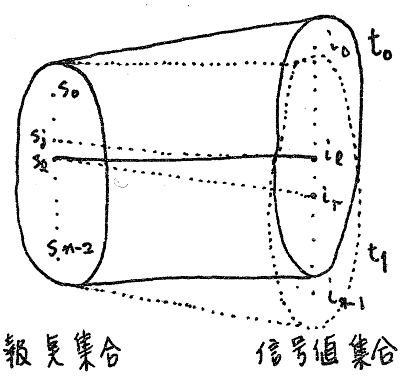

図2　情報点切換方式における対応関係

は、ある値 i_ℓ が送られたとき，その i_ℓ の信号値によって対応づけられた情報点は、必らずしも一意に定まらない。いまタイムスロット t_0 のとき、情報点 s_ℓ を伝送するのに信号値 i_ℓ が用いられたものとする。つぎのタイムスロット t_1 においても同一情報点 s_ℓ を伝送しようとするときには、信号は $I - i_\ell$ の中から選定しなければならない。この値をかり

に i_r とすれば、前のタイムスロット t_0 において、信号値として i_r が、もし用いられていたとするならば、このタイムスロット t_1 で信号値 i_r が用いられることはない。このように、あるタイムスロットの信号値に対応する情報点は、前のタイムスロットの信号値、または情報点を知っておかなければ一意に定まらないことがある。しかしながら一般には1つだけ前のタイムスロットの信号値、あるいは情報点を知れば充分に情報点を定めることができる。

関数 $g(x_0, x_1)$ の値は、上記の条件を満たし、しかも入力変数 x_0, x_1 の値が変化したときに、出力値が変化するように構成する。このような関数の一般形は、

$$g(x_0, x_1, x_0', x_1', g') \qquad (7)$$

として表わされる。ここに x_0', x_1' はタイムスロットが一つだけ前の x 変数の値であり、g' は同じく一つ前のタイムスロットの関数 g の値である。

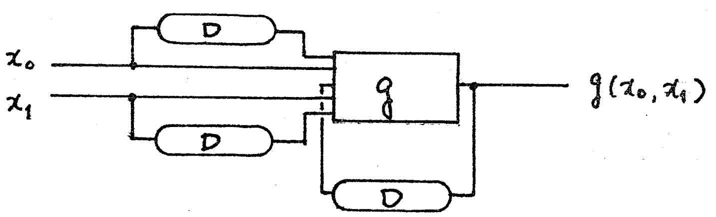

図3. 情報点切換論理方式の一般形.

この方式の中で，信号値に対応する情報点の割りつけ方によって，つぎのような2つの基本的な系に分類することができる。

6－1　全巡回符号化．　いまあるタイムスロット t_0 において伝送されている信号値を i_j とすれば，その i_j について，つぎにとることのできる $n-1$ 個の情報点は図4に示すように巡回的に定められる。このタイムスロフト t_0 の情報点は，その前のタイムスロットの信号値を知らなければ一意に定めることはできない。

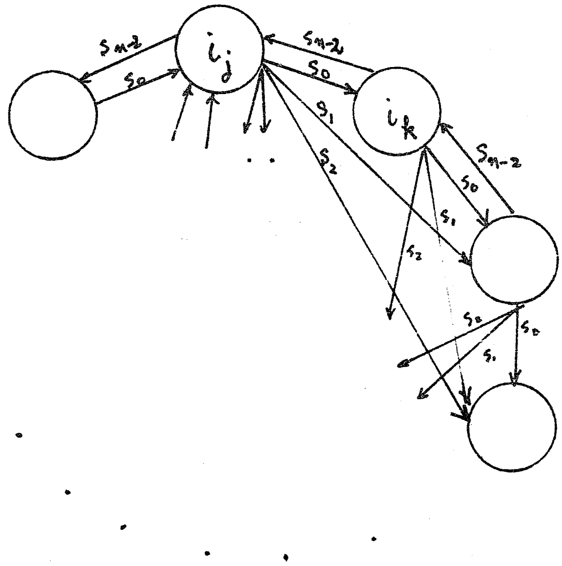

図4　全巡回符号化法．

6－2　部分巡回符号化法　n 個の信号値のうち，$n-1$ 個の信号値は，すべての $n-1$ 個の情報点と1対1の

対応をつけておく。あるタイムスロット t_0 において情報点 s_j が信号値 i_j によって伝送されていたものとする。つぎのタイムスロットでも同一情報点 s_j を伝送する必要があるとき、そのときに限り、信号値 i_r を送出する。すなわち、信号値 i_r が送られてきたときには、前のタイムスロットと同一の情報点が送られたことを示すので、i_r を検出したときのみ、前のタイムスロットの値を用いればよい。ここで信号値 i_r が異ったタイムスロットで引き続いて伝送されることはないことに注意する。

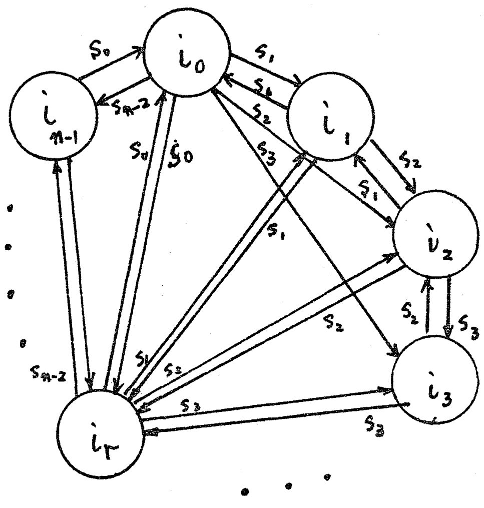

図5. 部分巡回符号化法

この2つの系のうち、6-1の方式では回路構成が複雑になるので、6-2の方式を用いた構成例をつぎに述べる。

例2. 例1と同じST方式半加算3値論理の同位桁を

与える回路構成について調べる。情報点と、信号値との対応関係は図6のように与える。

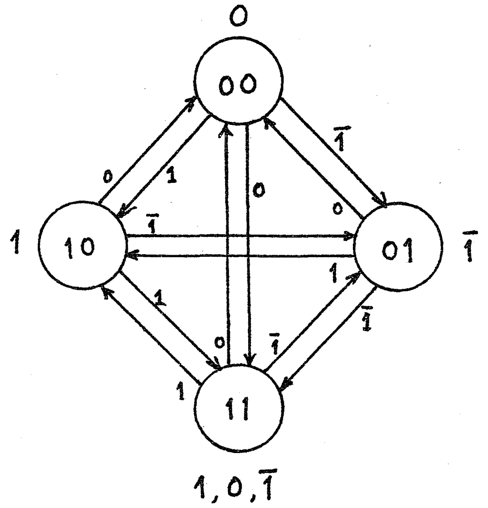

図6. 2重2値部分巡回符号化.

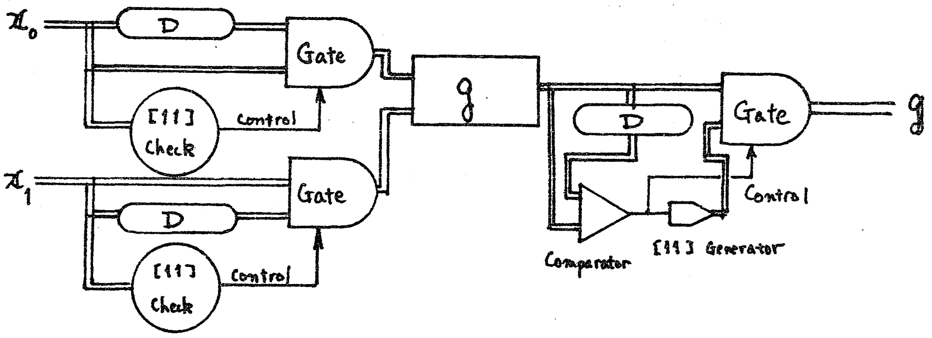

図7. 2重2値情報点切換論理回路ブロック図.

図7にそのブロック図を与える。中央の関数gは、例1と同じように構成すればよく、値[1 1]はこの関数入力に対しては冗長となる。

c. 情報点分離論理方式

情報点の集合 $\{s_0, \cdots, s_{p-1}\}$ (こゝでは $p = \frac{n}{2}$ とする) に対応するタイムスロット t_0 の信号値の集合は $I' = \{i_0, \cdots, i_{p-1}\}$ とし、タイムスロット t_1 の信号値の集合は $I'' = \{i_p, \cdots, i_{n-1}\}$ とする。

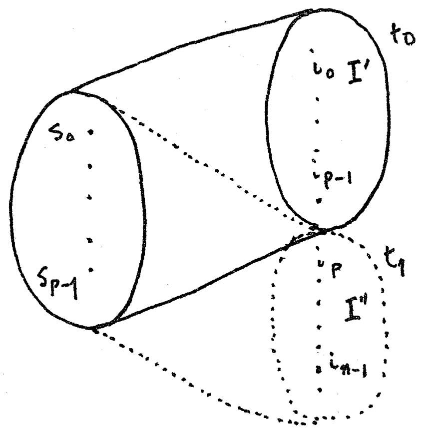

図8. 情報点分離方式における対応関係

タイムスロット t_0 において、変数 x_0, x_1 および関数のとり得る値は I' に制限し、タイムスロット t_1 においては、変数および関数のとり得る値を I'' に制限する。こゝでタイムスロットに関する制限を無視すれば、変数および関数のとり得る値は、$I = I' \cup I''$ である。しかるにタイムスロットの制限を入れゝば、変数 x_0, x_1 について $x_0 \in I'$ でしかも $x_1 \in I''$、あるいは、$x_0 \in I''$ でしかも $x_1 \in I'$ のとき、関数 $g(x_0, x_1)$ の値は定義されていないものとする。この方式

では，とり得る情報点の数は，信号値の数をnとすれば，単位タイムスロットあたり$\frac{n}{2}$である。

例3．例1にならって，2重2値を用いたときの情報点分離論理構成について調べる。2重2値系ではn＝4であるから単位タイムスロットごとに伝送することのできる情報点の数は2であり，したがって従来の2値論理系を実現することになる。これは別の見方をすれば，2重2値を用いて，2値論理と同期信号を同時に取扱っているものとみなすことができる。

4．あとがき．

以上述べた非同期論理構成方式の中で，もっともすぐれた方式は，6－2に述べた論理構成である。その理由として，

1） ある一定時間内に処理することのできる情報点の数は最大であって，

2） ある特定の1つの信号値を除いて，一意に論理構成を行うことができる

などがあげられ，この非同期論理構成の欠点としては，情報点区切論理方式にくらべて，

1) 余分の D type flip flop を必要とし、

2) 余分の信号値 i_r 検出器を必要とする

ことなどがある。

本報告では述べなかったが、非同期組み合わせ論理回路構成上問題となるのは、信号の伝播速度の変動であって、これについてはさらにくわしく検討を行う必要がある。変数 x_0, x_1 の間における信号の伝播速度が変化する場合について考える。いま変数 x_0 が変化して Δt 時間ののちに x_1 が変化するものとしよう。このとき x_0 は少くとも Δt 時間以上同一値をとり続けなければならない。したがって一般には x_0 を Δt 時間以上保持するようにあらかじめ設定するか、あるいは x_1 が到来したことを検知して、1つ前の段の論理回路の出力信号を変化させるようにする。これについては非同期情報伝送の分野[5]で一部検討されている。時間成分を信号値の変化の中から抽出して前段から送出される信号、または前段論理回路を制御するように構成するのが一般的な方法である。しかるに変数 x がある値 i_j をとったときと別のある値 i_k をとったときに伝播速度が違うことがある。変数の数が多いときには、複雑化した動作となり、一段毎に時間成分の抽出器をつけた方がよいか、あるいはある程度段数をまとめて時間成分を抽出した回路によって制御を行うようにした方がよいのか、簡単には

答が出ないであろう。今後の問題の一つであると思われる。

6 参考文献

1) H. Mine, T. Hasegawa and Y. Koga "Asynchronous Transmission schemes for Digital Information". IEEE Trans. on Comm. Tech. Vol. COM-18, No. 5, Oct. 1970 PP. 562-568.

2) 富永英義．時間領域に制限をもつ符号とその再帰級数による表現．電通学会論文誌 A Vol. 54. No. 4 April 1971 PP 201～208.

3) 高岡忠雄．多値論理に対するフェイル・セイフシステムの構成．電通学会論文誌 C Vol. 54-C. No. 1 Jan. 1971. PP41～49.

4) 三根，長谷川．島田．三進四則演算方式について．電通学会論文誌 C. Vol. 54C. No. 1 Jan. 1971. PP66～73.

5). 三根．長谷川．古賀．池田，新谷，三安定回路を用いたエラスティックメモリ．電通学会．通信方式研資 Sept. 29, 1966.

6) 三根．長谷川．島田，三値 NAND 回路を用いた自動タイミング非同期論理回路とその二進加算器における効果．Sept. 1970. 電通学会論文誌 A. Vol. 53. No. 9. PP652～659.