

ベネス網を用いた回線設定法

岸本 了造

奥村 康行

日本電信電話株式会社 伝送システム研究所

本論文では、高速大容量なノードが構成できるスイッチング回路網として、2つの自己ルーティング多段スイッチング回路網、すなわち、接続網アルゴリズムによる同期式ベネス網および非同期式の分散制御型負荷分散ベネス網を提案している。接続網アルゴリズムは、ベネス網を2つの基本結合網、即ち、分散網とルーティング網が接続したものと捉え、分散網、ルーティング網双方で衝突が起こらないように、基本結合網の接続端子での入力端子番号の最適な組合せを、入力端子、出力端子番号より決定する、新しいセルフルーティング網の制御アルゴリズムである。この接続網では、決定された接続端子番号をそれぞれの入力端子において各パケットに出力端子番号とともにアドレスとして付加することにより、スイッチング内部ではそれぞれ自己ルーティングに経路を選択し、出力端子に到着する。また、具体的な制御アルゴリズムを示し、従来のLooping アルゴリズム及びLee アルゴリズムとの比較を行い、その高速制御性を明らかにしている。また、同期網から非同期網への移行形態についても論じた。

Cross-connect method using Benes network

Ryozo Kishimoto Yasuyuki Okumura

NTT Transmission Systems Laboratories
1-2356, Take, Yokosuka, Kanagawa, 238-03 Japan

Self-routing control algorithm for Benes network is proposed for super high-speed transport processing. A new control algorithm is called "Concatenated network algorithm". This Benes network consists of distribution and routing networks, which are the basic interconnection networks. In this Benes network, the path which the data takes through the network is calculated in a concentrated control circuit from the interconnection between input ports and output ports. This concatenated network algorithm is superior to the previous algorithms, that is, Looping algorithm and Lee algorithm from the viewpoint of high-speed path setting. We also proposed a self-routing Benes network distributively controlled by dynamic load balance in asynchronous transfer mode (ATM).

1. まえがき

情報化社会の進展とともに、通信の多様化、大容量化に対する要望が高まってきている。また、メディアとして、今後、音声は勿論のこと、データ、映像も重要な通信メディアになろうとしており、そのための大容量伝送システムの開発が重要となっている。このような状況に対して、伝送技術として光ファイバを用いた光伝送方式が実用化されており、現在では、1.6Gb/sの情報量を伝送出来るF1.6G方式も運用されている。今後は、大容量の回線を伝送路に効率的に収容するための回線設定(Cross Connect)機能を有する大容量端局の実現が望まれる。

本論文は、今後、伝送需要が想定されるハイビジョン⁽¹⁾に代表される大容量な情報を伝送路に効率的に収容する際の、自由度の高い回線設定に不可欠の、簡易な回線設定制御が可能な自己ルーティング・スイッチを用いたノード構成について述べたものである。最初に、通信網における伝達システムについて述べる。次に、入力バッファ蓄積型のベネス網の自己ルーティング回線設定法により無瞬断切替が可能になるクロスコネクト・ノード構成を提案し、次に、回線設定制御アルゴリズムとして、従来のLoopingアルゴリズム⁽²⁾、Leeのアルゴリズム⁽³⁾に較べて高速に回線設定が可能な接続網アルゴリズムを提案する。最後に、同期転送網(STM)をベースにした通信網から非同期転送網(ATM)をベースにした通信網に移行する場合のノード構成について述べる。

2. 通信網における伝送技術の動向

通信網においては、今後、ハイビジョンのような大容量な映像情報を伝送する要望が顕在化すると想定される。

図1に、ハイビジョンに代表される大容量な映像情報を全国に中継分配するための通信網の構成を示す。映像スタジオやビデオ・センタにおいて符号化装置によってデジタル映像信号に変換された信号は、全国網に配備されたクロスコネクト・ノード(端局装置)によって伝送路に効率的に収容され、中継分配される。端局装置では、ユーザからの要望により分配する地域等を変更するため、大容量デジタル信号を①スイッチングしたり、②分岐、③挿入、④接落ち等の回線設定を行う。端局の制御装置は信号線を用いて、大容量デジタル信号をどのように全国に中継分配するかを制御する。以下に、通信網の動向を概説する。

2.1 同期転送網(STM)の動向

現在、通信網では、通信の大容量化に対応するため、高次群同期網の建設が進められている。今後は、光伝送方式の積極的な導入により伝送路の大容量化が更に進むとともに、回線交換網の信頼性の向上が重要となってきている。この観点から、従来にも増して大容量かつ自由度の高い回線設定(Cross Connect)機能を有する端局の実現が望まれている。そのため、従来のゲート素子を用いた空間スイッチに比べて①スイッチ素子数が少ない、②多段スイッチのスイッチング制御が容易なことから、セルフルーティング制御によるT-S-T型スイッチ構成⁽⁴⁾が検討されている。

2.2 マルチメディア通信を指向した非同期転送網

マルチメディア通信を扱う通信網として非同期転送網(ATM)がある。この方式は、データだけでなく、音声、映像等すべてのメディアをパケット化し、ネットワークの柔軟で効率的な運用を行うもので、次世代の通信網として世界各国で現在活発な研究が進められている。

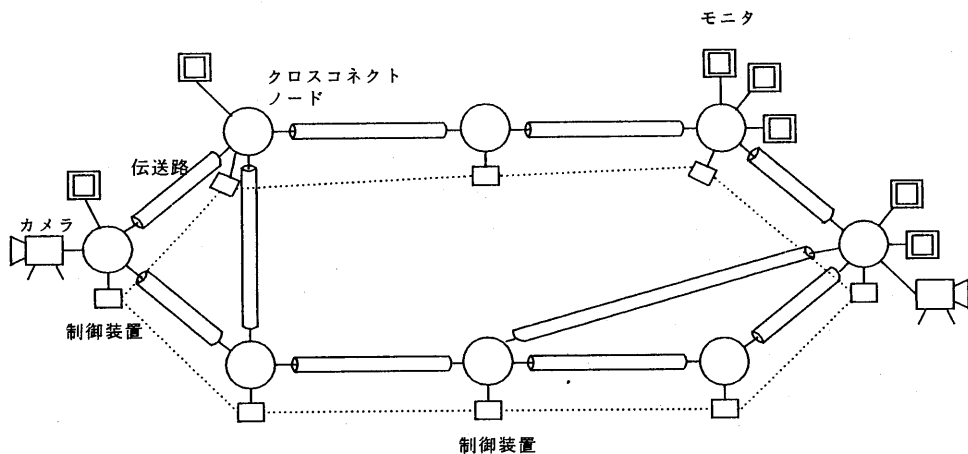


図1 高精細画像の全国中継分配網

このようなネットワークにおいては、従来のプログラム制御の処理ノード構成では、速度上限界があり難しい。そのため、ソフトウェアの呼設定処理で決定されたルーティング情報を元に、データパケットをハードウェアが自律的に交換する自己ルーティング方式等が提案されている。

3. 同期網における大容量クロスコネク・ノード構成

伝送路の大容量化に伴い、今後、益々、回線の大容量化が必須となる。このような伝送システムにおいて複数の回線を設定するノード構成はTスイッチにより構成することは速度上難しく、空間スイッチにより大容量クロスコネク・ノードを構成することになる。

大容量のクロスコネク・ノードの構成法として種々のものが考えられるが、多段スイッチング回路を用いたクロスコネクは、所望の入出力回線を構成する場合、単位スイッチ・エレメントの数を少なくするメリットがある。図2に多段スイッチング回路を用いたクロスコネク・ノード構成を示す。この場合、ベネス網を用いているが、入出力の回線の設定変更が生じた場合、入出力の回線の組合せを集中制御回路を用いて再配置により変える必要がある。

再配置を集中制御により行う場合、

①個々の単位スイッチ・エレメントを制御する制御線が必要となり、配線構成が難しくなるとともに、高速制御が伝搬遅延の点で困難となる、

②入出力回線の組合せを変更する場合、信号が通過する各単位スイッチ・エレメントを同期をとって無断に切り替えることが困難となる、

等の点から、集中制御により単位スイッチ・エレメントを同期をとって切り替えることは極めて困難である。そのため、入力バッファ蓄積型のベネス網自己ルーティング回線設定法を提案する。

3.1 入力バッファ蓄積型のベネス網自己ルーティング回線設定法

図3にベネス網の自己ルーティング・ノード構成を示す。入力バッファ蓄積型のベネス網では、入力信号は入力側のパケット・アセンブラ (PA) 内バッファに一旦蓄積され、速度変換が行われる。この場合、図4に示すように、伝送路での信号はある単位時間で1フレームを構成するとし、この1フレームの速度を上げるにより、生じた隙間に1フレーム単位で信号をパケット化し、ヘッダを付ける。このヘッダは、本来、入力信号が出力すべき出線の番号が2進表示で表されている。

ヘッダが付与された1フレーム分のパケット信号は多段スイッチング回路を自己ルーティングにより通過する。次に、回線の設定変更が生じた場合は、再配置計算回

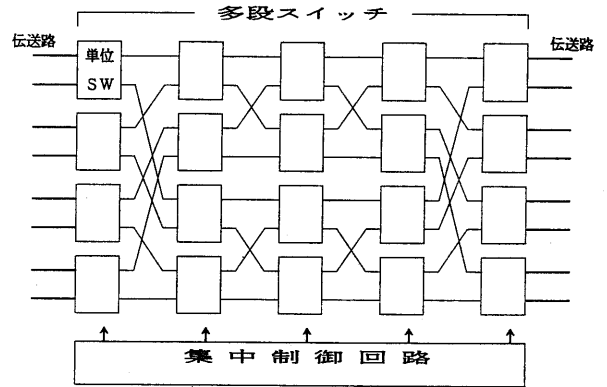


図2 多段スイッチ回路によるノード構成

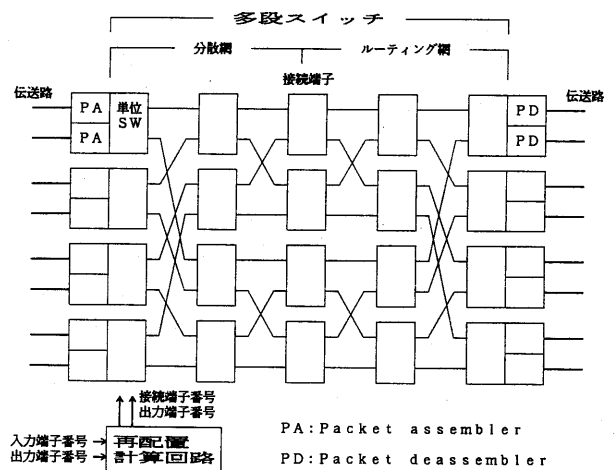


図3 同期網における自己ルーティング多段スイッチ・ノード構成

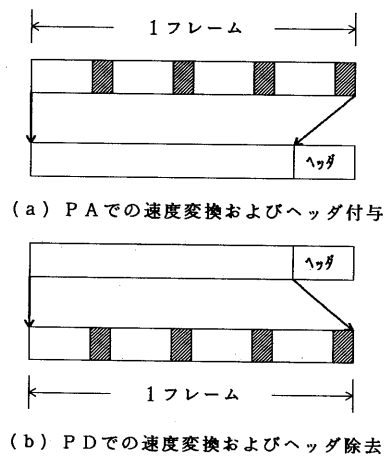


図4 速度変換およびヘッダ付与・除去

路で組合せを計算し、設定変更の時刻に、ヘッダを取り替える。この新しいヘッダにより、それぞれの入力信号は多段スイッチング回路内の別のルートを通して出力側に伝達される。このようにすることにより、同期をとって、回線の設定変更が出来る。また、工事等に伴う回線の移転に際しては、あらかじめ予備回線を指定しておく、その際、回線組合せは再配置計算回路にあらかじめロードしておくことにより対処出来る。

3.2 スイッチ構成例

クロスコネクト・ノード構成に用いる自己ルーティング多段スイッチング回路としては、回線の設定変更が生じた場合の組合せ計算が高速に処理出来ることが重要である。

従来、多段スイッチング回路の研究は、大別して2つに分けられる。1つは、同期式の再配置型非閉塞網で、他の1つは非同期式閉塞網である。STMにおいて使用されるのは、同期式の再配置型非閉塞網であり、非同期式閉塞網はATMのようなパケット網で使用される。表1は従来から提案されている自己ルーティング多段スイッチング回路をまとめたものである。

再配置型の多段スイッチング回路としてはベネス網やBatcher-Banyan網⁽⁴⁾が従来より提案されている。なお、Batcher-Banyan網はATMにおいても使用される。ベネス網の経路設定のアルゴリズムとしては、Loopingアルゴリズム⁽²⁾、Leeのアルゴリズム⁽³⁾が従来提案されている。本論文では、従来のものより高速制御が可能な接続網アルゴリズム⁽⁵⁾⁽⁶⁾を以下に提案する。

4. 接続網によるセルフルーティング網の提案

4.1 基本構成

任意の入出力を結ぶ結合網として、基本結合網を接続する。接続した結合網のうち、入力側を分散網、出力側をルーティング網とする。また、分散網の出力端子およびルーティング網の入力端子いずれも接続網の接続端子と呼ぶ。接続網の分散網とルーティング網双方の網で衝突が起こらないように、網の接続端子上での入力信号の組合せを入出力端子番号より決定する。このことにより、入力信号は分散網での出力端子すなわち接続端子とルーティング網での出力端子のアドレスが決まったことになる。一般に、基本結合網においては、出力端子さえ明らかになれば、経路選択は一義的に決まり、セルフルーティングが可能となる。実際には、図3に示すように、再配置計算回路において入出力端子番号より接続端子番号を決定し、その接続端子番号と出力端子番号をヘッダとして入力端子において入力信号に付与する。その後、データパケットはセルフルーティングによりスイッチング網内を自律的に進行することとなる。

4.2 接続網のルーティング設定制御法

図5に示す、16入力16出力の接続ベースライン網を対象に、接続端子上での入力端子番号の組合せを決定する接続網の制御アルゴリズムの具体例を以下に示す。

〔段数3の部分網での上下の分類〕

2進表現された接続端子において、最上位ビットが同じ接続端子の中には、

(i) 入力端子において上位3ビットが同じものを入れてはいけない。例えば、

表1 同期式自己ルーティング多段スイッチング回路

	スイッチ網		経路設定		遅延 時間	提案元 (年代)
	トポロジー	スイッチ規模	アルゴリズム	処理時間オーダ		
同期式 再配置 非閉塞網	Benes網	$n(\log_2 n - 1/2)$	Looping アルゴリズム	$n/2 \times \log_2 n$	—	ATT ベル研 D. C. Opferman (1971)
			Lee アルゴリズム	$n/2 \times \log_2 n$	—	オハイオ 州立大 K. Y. Lee (1984)
			接続網 アルゴリズム (本論文)	$(1 \sim n/4) \times \log_2 n$	—	NTT 岸本 (1986)
	Batcher- banyan 網	$(1/4)n \log_2 n \times (\log_2 n + 3)$	ソーティング アルゴリズム	リアルタイム (ハード処理)	—	BellCore ATT ベル研 A. Huang (1984)

入力端子 $\begin{matrix} 0000 \\ 0001 \end{matrix}$]

のものをに入れてはいけない。

このことは、入力端子において上位3ビットが同じものは接続端子で、最上位ビットが異なるものに分ける必要があることを意味している。

(ii) 出力端子においても上位3ビットが同じものを入れてはいけない。例えば、

出力端子 $\begin{matrix} 0000 & (\text{入力端子 } 7) \\ 0001 & (\text{入力端子 } 11) \end{matrix}$]

のものをに入れてはいけない。

以上の (i), (ii) の処理を具体的に以下で行う。

① まず、(i) の条件より、入力端子において上位3ビットが同じものは、図5の接続網の接続端子において、段数3の上のベースライン部分網を通過するものと、段数3の下のベースライン部分網を通過するものに分ける。ここでは、入力端子番号の偶数番目の信号は、段数3の上のベースライン部分網を、入力端子番号の奇数番目の信号は、段数3の下のベースライン部分網を通過するとして、図6に示すように、入力端子番号を順に上、下に分類する。ここで、図6は出力端子番号の順に、それに対応した入力端子番号と、その時の出力端子での信号の「上」、「下」を表している。

② 次に、(ii) の条件より、出力端子においても上位3ビットが同じものは、信号が上、下の段数3のベースライン部分網を通過する必要がある。そのため、まず、出力端子番号0, 1の入力信号が上、下に分かれている

かを調べる。図6において、出力端子番号0, 1の入力信号はともに「下」となっているため、(ii) の条件を満たすように、出力端子番号0の信号を「上」に反転する。

③ 前の②において、出力端子番号0の信号を「上」としたため、出力端子0に対応した入力端子番号7の信号は「上」となる。そのため、(i) の条件を満足させるためには、入力端子番号7とペアの入力信号の「上」、「下」を反転させる必要がある。そのため、入力端子番号6をサーチし、その「上」を「下」に反転する。

以下、同様の処理を行う。

④ 出力端子で入力番号6とペアになっている入力端子番号9が、入力端子番号6とともに上、下のペアになっているかを調べる。もし、そうでないなら、入力端子番号9の「下」を「上」に反転する。

⑤ 入力番号9が反転したため、その入力番号のペアを探す。それは、入力番号8である。

⑥ 入力番号8の「上」を「下」に反転する。

⑦ 入力番号8と出力でペアになっている入力番号2が上、下のペアになっているかを調べる。ペアになっている。⑧ 処理した出力番号以外の出力番号のペアの入力番号が上下になっているかを調べる。即ち、出力番号2, 3から同様の処理を行う。その結果、ペアになっていることが分かる。

⑨ すべて終了。

以上の結果、図5の接続ベースライン網の場合、入力

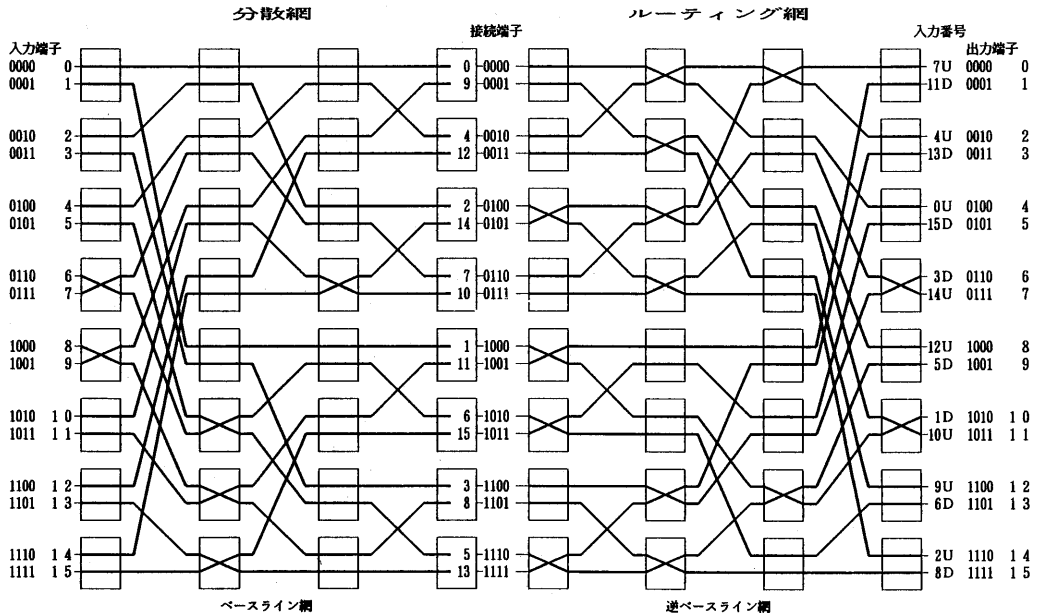


図5 接続ベースライン網の自己ルーティング制御

端子番号が、(0, 2, 4, 7, 9, 10, 12, 14) のものは、上の段数3のベースライン部分網に、入力端子番号が、(1, 3, 5, 6, 8, 11, 13, 15) のものは、下の段数3のベースライン部分網に区分される。

この後、段数2の部分網および段数1の部分網についても、段数3のベースライン部分網の場合と同様の処理を行う。段数1の上部分網、下部分網は接続網における接続端子上での2つの端子のペアを意味するため、接続端子上において、0から15まで順に、入力端子番号の組合せが以下のように出来ることになる(図5参照)。

(0, 9), (4, 12), (7, 10), (2, 14)
(1, 11), (6, 15), (3, 8), (5, 13)

4.3 提案網の制御法と従来法の比較

今回提案したベネス網の接続網アルゴリズムを設定制御アルゴリズムの処理時間の観点から従来のものと比較する。

図6, 図7に16入力16出力のベネス網のそれぞれのアルゴリズムによる具体的なルーティング設定を示す。なお、Looping アルゴリズムとLee アルゴリズムとは基本的には同じであるので、Lee アルゴリズムは省略する。ルーティング設定時間は、それぞれ対応する端子番号のメモリをサーチする時間の合計に対応しており、この場合はサーチする回数に対応している。Looping アルゴリズムによるサーチ回数は、図7に示すように、8回である。それに対して、新提案の接続網アルゴリズムのサーチ回数は、図6に示すように、2通りある。つまり、出力端子番号0の「下」を「上」に変えて処理をする場合と、出力端子番号1の「下」を「上」に変えて処理をする場合があり、サーチ回数はそれぞれ2回と4回である。いずれの場合も、従来の制御法に比べて回数は少なく、高速制御が可能であることが分かる。新提案の接続網アルゴリズムが他のアルゴリズムに比べて設定処理が高速になるのは、以下の理由による。

- ・Looping アルゴリズム、Lee のアルゴリズムいずれにおいても、単位スイッチの設定は、ある連鎖の条件の下に行っていくため、入出力端子数Nのベネス網では、N/2回サーチが必要となる。

- ・それに対して、接続網アルゴリズムにおいては、入力端子側の単位スイッチの設定にあたって、まず最初に入力端子番号順に上下を割りつけておく。その後、出力端子側からみた単位スイッチの上下の設定を調べるため、出力側の単位スイッチの信号が上下に分かれていれば、処理をせず、通過することとなるため、高速サーチが可能となる。

また、図8に示すケース2の場合、接続網アルゴリズム

のサーチ回数は大きい場合で7回となり、従来法に比べて1回少ない。この場合、2種類のサーチ法を並列に処理すると、速い方の1回で済むことになる。図9は入力端子数Nのベネス網を対象として、提案した接続網アルゴリズムとLooping 及びLee のアルゴリズムのそれぞれのサーチ回数を示している。なお、図9におい

図6 提案アルゴリズムによる段数3の部分網の分類(ケース1:図5)

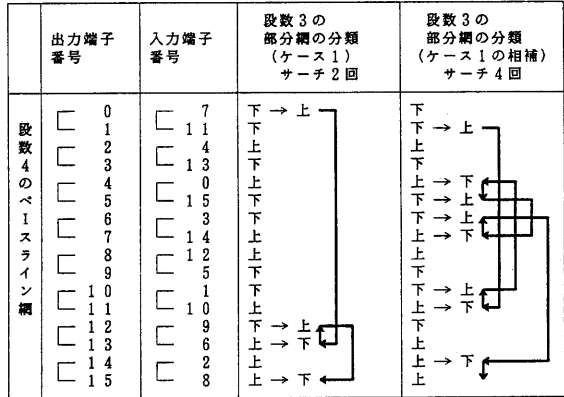


図7 Looping アルゴリズムによる段数3の部分網の分類(ケース1)

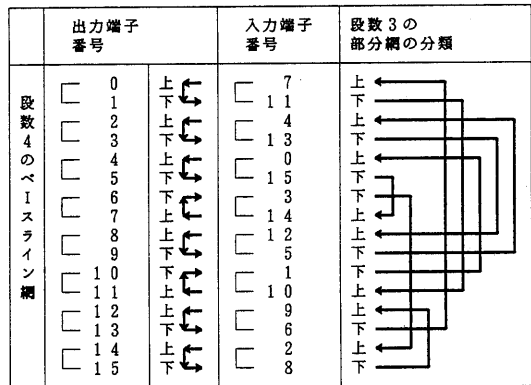
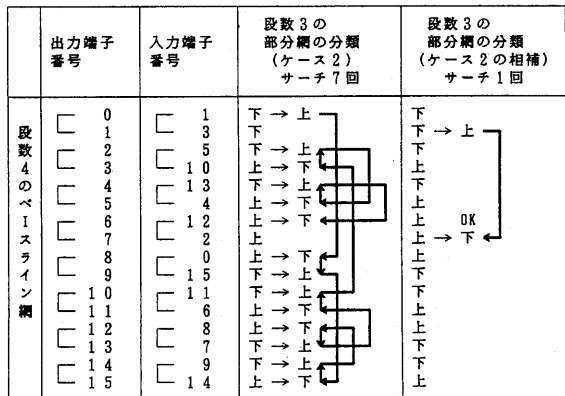


図8 提案アルゴリズムによる段数3の部分網の分類(ケース2)



て、入力端子数 N およびサーチ回数は両対数で示されている。入力端子数を変化させた時のサーチ回数、すなわち、相対的ルーティング設定処理時間は、Looping アルゴリズムおよび Lee アルゴリズムでは $N/2$ である。それに対して、接続網アルゴリズムのサーチ回数は、パラレル・サーチ処理を導入すると、1回 $\sim N/4$ 回となり、従来法に比べて遅い場合で半分で、速い場合は、1回で済むことになる。

5. 非同期網におけるノード構成

高速パケットスイッチングのように非同期に入力してくる高速パケットを即時に処理する場合、経路設定に際して再配置処理を必要としない方式が重要である。これらの方法としては、表 2 に示すように、バンヤン網を用いたもの⁽⁷⁾と、ベネス網を用いる方法がある。しかし、バンヤン網は内部輻輳が起こる可能性が高い。一方、多段スイッチング回路としてベネス網を用いた場合、ベネス網を前半の分散網と後半のルーティング網から構成された回路網と考え、ベネス網におけるルーティング網は基本結合網であるため、パケットは目的の出力端子の 2 進表現された端子番号を用いて自己ルーティング制御が可能である。しかし、偏った入力パケットがあると、ルーティング網内部で衝突が発生するため、分散網において入力パケットを均等に振り分けることが必要となる。従来、分散網で入力パケットをランダムに振り分けるランダム分散方式⁽⁸⁾や最小値負荷分散方式⁽⁹⁾が提案されている。

本論文では、分散網で入力パケットが衝突した場合、図 10 に示すように戻り信号線を使ってその情報を戻すことにより、再度、入力パケットを転送し、スループットを向上させることが出来る分散制御型負荷分散方式を提案する。図 11 に非同期網におけるノード構成を示す。

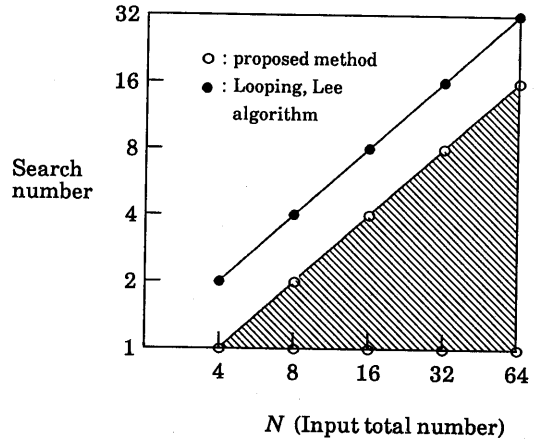


図 9 経路設定サーチ回数

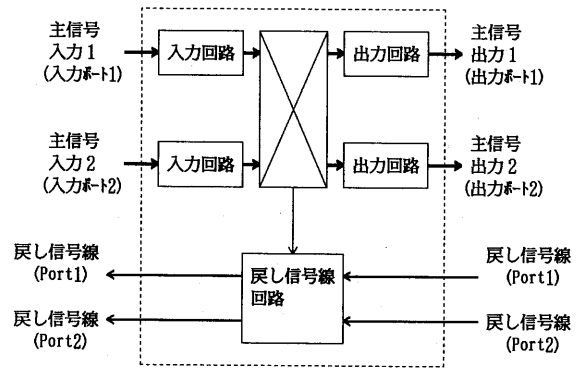


図 10 分散網における単位スイッチ回路

表 2 非同期自己ルーティング多段スイッチング回路

	スイッチ網		経路設定	バッファ形式	遅延時間	提案元 (年代)
	トポロジー	スイッチ規模	リアルタイムアルゴリズム			
非同期式閉塞網	Banyan 網	$n/2 \log_2 n$	固定ルーティング	—	大	ATT ベル研 J. Kulzer (1984)
	Benes 網	$n(\log_2 n - 1/2)$	ランダム分散アルゴリズム	多段スイッチ バッファ	中	ATT ベル研 J. S. Turner (1986)
			最小値負荷分散アルゴリズム	多段スイッチ バッファ	小	NTT 岸本 (1987)
			負荷分散アルゴリズム (本論文)	入力バッファ 中間バッファ	小	NTT 岸本, 奥村 (1988)

6. 同期網から非同期網への移行形態

同期網におけるノード構成と非同期網におけるノード構成は異なる。しかし、同期網から非同期網への移行に際して、ノード構成の大部分が使用出来るならば、移行は容易となる。ここでは、その形態について論ずる。今回、提案した同期網と非同期網のノード構成における違いは、非同期網のノード構成においては、

- ① 単位スイッチ回路内に戻し信号線回路などが含まれていること、
- ② 同じ出力端子に出力するパケットが存在するため、入力側のパケット・アセンブラ (PA) に複数のパケット・バッファを設ける必要があること、である。

そのため、同期網のノード構成においても、戻し信号線回路などを有する単位スイッチをベネズ網に使用し、移行する過程で、PAのみ変えれば、多段スイッチング回路としての自己ルーティング・ベネズ網をそのまま使用することが出来る。

7. まとめ

本論文では、高速大容量なノードが構成できるスイッチング回路網として、2つの自己ルーティング多段スイッチング回路網、すなわち、接続網アルゴリズムによる同期式ベネズ網および非同期式の分散制御型負荷分散ベネズ網を提案した。ベネズ網の新しい制御法としての接続網アルゴリズムの処理時間は、パラレルサーチ処理を導入すると、従来のものに比べて遅い場合で半分で、速い場合は、1回で済むことになることを明らかにした。

また、同期網から非同期網への移行形態についても論じた。今後は、装置の設計を通してより詳細に検討する。

謝辞

日頃、御指導頂くNTT伝送システム研究所 島田所長、小山部長および山口主幹員に深謝します。

参考文献

- (1) 岸本, 奥村 "HDTV伝送システムの構成に関する一検討", 信学技報CAS88-12 (1988.6)
- (2) D.C. Opferman and N.T. Tsao-Wu, "On a class of rearrangeable switching networks, Part I: Control Algorithm", B.S.T.J. Vol. 50, No. 5, pp1579~1600 (1971)
- (3) K.Y. Lee "A new Benes network control algorithm", Proc. Int. Conf. on Parallel Processing, pp. 51~58 (1984)
- (4) A. Huang and S. Knauer, "Starlite - A wideband digital switch", GLOBECOM'84

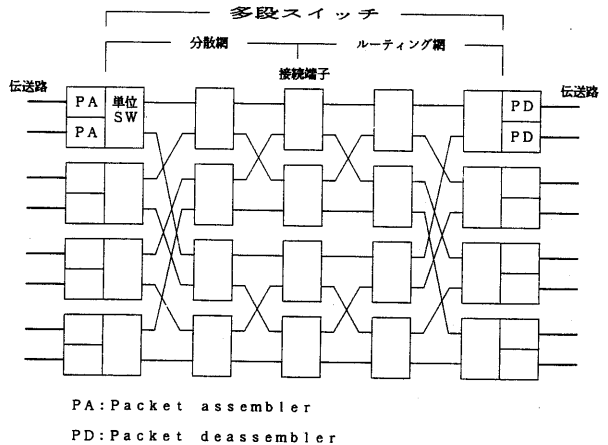


図1 1 非同期網における自己ルーティング多段スイッチ・ノード構成

- (5) 岸本 "セルフルーティング制御によるスイッチング回路網構成", 信学技報SE86-86 (1986.11)
- (6) 岸本 "接続網における自己ルーティング設定制御法", 信学技報CS87-30 (1987.6)
- (7) J. Kulzer et al, "Statistical Switching Architecture for Future Services", ISS'84.
- (8) J.S. Turner, "New directions in communications", Zurich Seminar, 1986
- (9) 岸本, 桜井 "動的負荷分散制御による多段スイッチング回路の構成", 信学技報SE87-61 (1987.7)