

産業用分散制御システムにおける通信路方式の選定†

浜 田 亘 曼†† 増 田 郁 朗†† 杉 本 則 彦††

近年、マイクロ・プロセッサでネットワークを形成した分散制御システムの開発が活発に行われている。これらのシステムのねらいは、マイクロ・プロセッサ、LSI に代表される小型・安価という特質と、システム構成技術の効果的な組合せにより、システム全体の信頼性と拡張性を向上させることにあるが、このためには、マイクロ・プロセッサの負荷の増加や周辺回路の増加が少なく、しかも応答性が良く、信頼性の高い通信方式を実現することが不可欠である。

本論文では、LSI 化技術との適合性を考慮して、各通信方式を選択する具体的な評価を、樹状、環状、格子状の3方式に関する試作データを参考に行っている。特に、ハードウェアとソフトウェアとを一体化させ、1タスクの機能にまで分散を徹底させた機能モジュール間を結ぶための、通信方式を選択する要因を分析し、各方式を選択すべき条件について具体的な検討を加えている。

性能評価結果、および LSI 化への適合性を考慮すると、HDLC 手順を用いた対等形2重系環状通信方式が、拡張性を必要とする分散制御系に適している。また、クロス・ポイント・スイッチを用いた格子状通信方式は、マルチ CRT・オペレータ・コンソールのように、同時に大量のデータを機能モジュール間で交換する必要があるシステムに有効である、と述べている。

1. 緒 言

近年、マイクロ・プロセッサ（以下 μP と略記する。）の制御システムへの応用、特に、複数の μP でネットワークを形成した分散制御システムの開発が活発に行われている。これらのシステムのねらいは、 μP の持つ小型、安価という特質を活用して、制御系の処理を分散させ、システム全体としての信頼性と拡張性を向上させることにあるが、このためには、 μP の負荷の増加や周辺回路の増加が少なく、しかも応答性が良く、信頼性の高い通信方式を実現することが要求される。

マイクロ・プロセッサ・ネットワークに関する研究としては、Russo¹⁾ が LSI 化メモリの活用には、共通メモリをコンテンションでアクセスする方式より、弱く結合された個別にメモリを有する μP 群が有利であるとし、特に、マスタ・スレーブ方式の有効性について述べている。Spetz²⁾ は初期の LSI 技術下での各種通信方式の比較を行い管理用共通ハードの有用性を述べている。Weissberger³⁾ は、複合マイクロ・プロセッサの結合方法として、非対象な結合すなわち主従形の結合に近い将来の有力な方法であると述べている。

Liu⁴⁾ は2重系環状通信路を用いた耐障害性システムの設計上の基本課題を論じている。Powell⁵⁾ は航空分野での、耐障害性の高い通信方式について論じている。これらはいずれも通信方式の選択に関する統一的な手順については述べておらず、特に工業分野で、LSI 化技術との適合性を考慮して、各通信方式を選択する具体的な根拠が不十分であった。とりわけ、ハードウェアとソフトウェアとを一体化させ、1タスクの機能にまで分散を徹底させた機能モジュール間を結ぶ通信方式の選択については論じられていなかった。

本論文は工業分野で適用される可能性のある、1タスクの極限まで機能を分散⁶⁾ させたマイクロ・プロセッサ・ネットワーク用通信方式を選択する要因を分析し、特に、環状、樹状、格子状の3つの接続方式に対する性能およびコスト要素を比較し、各方式を選択すべき条件について、具体的な検討を行う。

2. 通信方式の評価基準と選択子

本章では、分散制御システムから期待される要求仕様と選択にあたって重視した要因について述べ、これらに従った通信方式の選択を図1の基本的な選択子を用いて行う。

2.1 要求仕様

機能分散・危険分散を徹底させた産業用マイクロ・プロセッサ・ネットワークにおいて期待される要求仕様は、

† A Selection of Communication Links for Distributed Control Systems in the Industrial Applications by NOBUHIRO HAMADA, IKUROU MASUDA and NORIHIKO SUGIMOTO (Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd.).

†† 日立製作所日立研究所

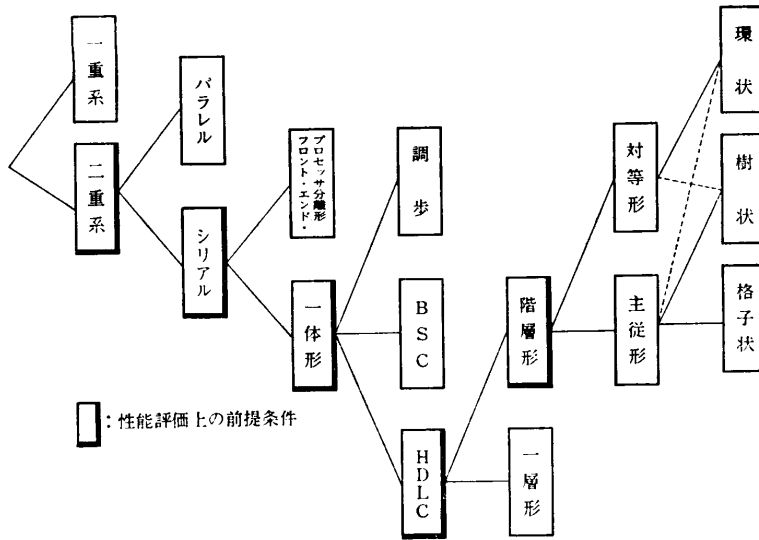


図 1 通信方式の選択子

Fig. 1 Decision tree of communication link among distributed controller.

(1) μP の負荷の増加が少ないこと：通信処理に必要な μP 負荷が 20~30% 以下であること。

(2) 周辺回路の増加が少ないこと：1 ボードに集約される機能モジュール上の通信処理のための回路が、ボード上の 20~30% 以下であること。

(3) 応答性が良いこと：応答性については、2つのグレードが考えられる。PID コントローラ⁷⁾を中心とするシステムでは、PID 調節系のサンプリング周期より小さいこと。すなわち 200 ms 周期で交信できること。また汎用の産業システムについては、ミニコンの OS の応答時間やリレーの切替動作時間より短いこと。すなわち 10 ms 周期で交信できること。

(4) 伝送容量が大きいこと：伝送容量についても、適用対象によって分類される。化学分野の PID コントローラを中心とするシステムでは、30 k bps 程度、CRT を複数個用いるシステムでは 200 k bps、電動機制御を含む鉄鋼分野のシステムでは、数 Mbps が要求される。

2.2 選択要因

通信方式の選択にあたって重視した要因を次に述べる。

(1) LSI 化：まず、高集積化の結果、ハードウェアの占有体積すなわちコストはしばしば、ゲート数よりも、ピン数に依存していること、および、各時点の集積可能な水準に依存して、性能を横軸とした場合のコスト関数がステップ状に変化していることに留意す

ることである。第2に、LSI 化の効果を引き出すには、少品種大量の原則に従い、ハードウェアボードの種類を最少化することである。

(2) 高信頼度化：第1に、信頼性上のボトルネック部分を最小化すること、第2に、各サブシステム単独で縮退運転が可能となること、第3に、故障部分の切り離し、待機系との切り替えが容易なること、第4に、診断モジュール間の相互照合が容易なることである。LSI 化により、多数個用いることによる負担が少ないこと、診断論理等の多少のゲート数の増加は負担にならないことを利用して、経済的な高信頼化システムが実現できる。

(3) 拡張性：LSI を中心にシステムを構成する場合、LSI に内包し得る機能が制限されていること、および同一品種を多数用いるべきことにより、各コンポーネントが、少ないハード接点を通して、柔軟に接続され拡張できることが大切である。

2.3 通信方式の選択子

図1の選択樹木に従って、前節の基本要件を考慮しながら方式の選択を行った。その要約を表1に示す。これらの選択過程で検討を要する課題は、表1の右欄に示すように、性能評価、高信頼化方式、インタフェースの標準化等であるが、次章以下では、試作データを参考にした、性能評価比較を行う。

この性能評価において、表1の上部5項は前提条件となる。なお、6項と7項の実用上の組合せは表2となる。

3. 通信方式の代替案

本論文で評価の対象とした通信方式の構成、および伝送手順を表3に示す。各構成に対する具体的な制御手順は、前節の評価基準に従って、各構成の特徴を活かす方式を選択した。その際、特に次の2点を優先的に考慮した。

(1) 混雑時に性能を高く出せるかどうか。

(2) ハードウェアが LSI 化に適し、かつ簡潔になるかどうか。

環状方式では、各局間のハードウェア構造を同一と

表 1 通信方式性能評価時の前提条件

Table 1 Precondition for performance evaluation of communication links.

() は評価結果

選択子 (アンダーライン: 選択)	理 由	課 題
1) 1重系/2重系 2) パラレル/シリアル	①高信頼化 ②LSI の大量使用 ①LSI 価格のピン数依存性 ②接続の柔軟性 ③故障時切替えの容易性	故障系摘出, 切り離し LSI 微細化等による高速化
3) 通信用フロント・エンド・プロセッサと基本プロセッサの分離形/一体形	①プロセッサの分担すべき仕事に限定されるため OS が簡素 ②分散化により各局への通信量が少 ③通信用 LSI の集積度大によりプロセッサの負荷軽減 ④ハードウェア構造の簡単化	徹底した機能分割の最適化
4) 調歩式/BSC/HDLC 手順 5) 階層形/一層形	①任意のコードを送信可 ②大量データ転送の効率大 ①大規模システムへの拡張性 ②故障時縮退運用可	フレーム構造の標準化 インタリンク局による性能上のボトル・ネックの解消
6) (対等形/主従形) 7) (環状/樹状/格子状)	①ハード構造の均一化 ②小規模での拡張性 ③故障時縮退運用可 ①各時点の性能と価格のステップ状の関係 ②同一 LSI を用いた時の応答性	方式間の応答性および伝送容量の比較

表 2 接続方式と制御方式の対応

Table 2 Combination between geometrical configuration and functional relation of communication.

接 続 方 式	制 御 方 式	
	1 : N	N : N
環 状 (ループ)	高速ポーリング (ビット遅れを利用)	同 左
樹 状 (マルチドロップ)	ポ ー リ ン グ	コンテンション
格 子 状 (マトリックス スイッチ)	コンテンション (要求発生時に処理)	不 可

する対等形の条件を用いることとする。この場合、通信路の占有権は、SDLC 方式⁷⁾と類似な、高速ポーリング方式を用いる。すなわち通信路の使用権を保持していた局が通信を終了すると、GA (Go Ahead) パターンを通信路に送出し、これが局ごとに、NRZ 1 (non return zero 1) の場合、2 ビットの遅れで通信路を巡回する。この状態は通信路が空いていることを示しており、送信要求局は GA を確認した後、これを同期フラグに変えて送信を開始することができる。送信データのフォーマットは表中の図に示すとおりで、アドレス部分で相手局を指定する。この受信局は受信完了後、返送を行う。以上の手続きが完了すると、上述の送信局が GA を送出し、通信路が空きの状態に戻る。この方式の特徴は、通信路の占有権の確立に至る手続きが簡単でオーバーヘッドが少ないことである。なお、形体が環状で、基本的には環状以外の任意な迂回路をも取り得る伝送手順も考えられる。しかし、この場合には、各通信路より非同期でメッセージが到着するため、通信速度に制約を受け不利となるので、本論文で

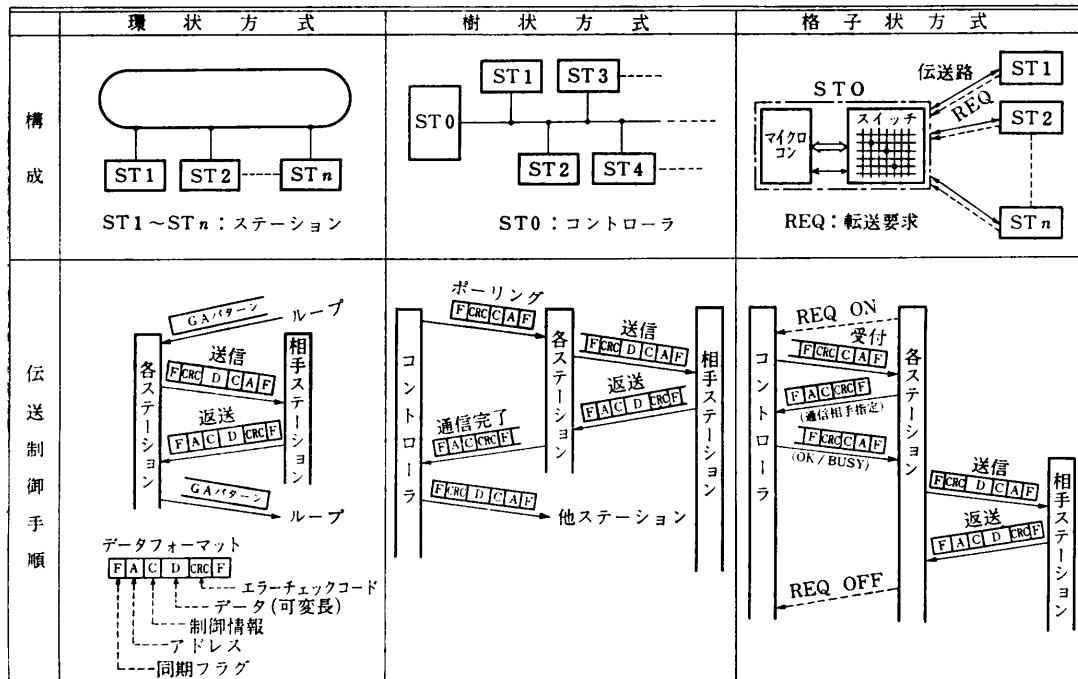
は、上述の高速ポーリング方式を採用している。

樹状方式、すなわちマルチドロップ方式では、通信路に対する占有権獲得上の競合を抑制するため管理局を設ける主従形を用いることにする。樹状方式でコンテンションによる対等形の例として Ethernet⁸⁾ が報告されているが、工業分野では、(1)通信路使用率の平均値が比較的高く設定される、(2)高頻度、短フレーム長の周期的メッセージが含まれる等の条件下で、通信路混雑時の応答性を高める必要を考慮して、ここではポーリングによる主従形を用いている。この場合、各局は管理局を中心にバス状に接続されており、通信路占有権は管理局からのポーリングで与えられる。すなわち、管理局は各局に対し、順次、ポーリング信号を送出し、これに対して、該当局が送信要求を有する場合には、直ちに送信を開始する。ここで指定された相手局は受信完了後、自動的に通信路の使用権を得て返送を行う。返送を受信し終ると、上記該当局が管理局に対して通信完了を連絡し、管理局が次のポーリング信号を送出する。上述の説明では管理局が固定されているが、管理局を随時巡回させる方式としても、ほぼ同様である。

格子状方式、すなわちマトリックス・スイッチ方式は各局をマトリックス状に構成されたスイッチで接続する。マトリックス・スイッチとしては、CMOS のクロスポイントスイッチが利用できるが、これを μP で制御して管理局とするため、構造状主従形となる。この方式では、スイッチの構造を活かして、同時に複数の通信路を形成することができる。ただし、このためには、通信要求は通信路とは別の信号で、直接管理局に加える方式を用いている。管理局は通信要求を受け付けると、要求を発した局に対して受付信号を送出

表 3 各伝送方式の構成および手順

Table 3 Structures and communication control procedures for three communication links.



し、相手局を問い合わせる。その後、管理局は指定された相手局が接続可能な状態にあるか否かを判定し、この結果を返送する。接続可能な場合には、スイッチを動作させて通信路を確立し、局同士が管理局を介さずに通信することが可能になる。一連の通信が完了すると、通信要求信号を発信していた局は、これをオフする。管理局は、これを受けて通信路を解除する。

4. 通信方式の評価

4.1 性能評価モデル

上述の3つの通信方式に対する好適な応用分野を明らかにするために、試作・実験で得られた基礎パラメータの値と、本節で述べる各方式別のマクロな性能評価モデルを用いて、定量的に比較する。ここで用いたハードウェアは M 6800 系の 8 ビット μP (クロック 2 MHz) および、アドレス・チェックをソフトウェアで行わせる通信用 LSI である。

本節では伝送能力を中心に評価を進めるが、この理由は下記の通りである。

(1) 伝送能力に余裕があれば、システムの規模的、および機能的拡張に対応することができる。機能的拡張の例としては、音声出力警報モジュール等の新規機能との接続等が考えられる。

(2) 通信速度を高速化することにより、少なくと

もエンド・ユーザにとって、通信路の遅れを意識しないですむシステム構成が実現でき、機能モジュールごとに独立の設計が可能となる。これは分散形アーキテクチャによって、情報処理分野で問題視されている、ソフトウェア危機を打破する上で有効な要件である。

図 2 は環状および樹状方式に対する評価モデルで、ユーザ要求を代表する運用ベクトル ($N_s, F_e, F_c, L_e, L_c, M_e, M_c$) に対して、性能評価ベクトル (I_m, W) を算出し、他の方式と比較する。

ここにおいて、

N_s : マイクロ・コンピュータ局の台数

F_e, F_c : 送信要求発生頻度 (1/s)

L_e, L_c : 単位メッセージのフレーム長 (byte)

M_e, M_c : 連続的に送信されるメッセージ・フレーム数

I_m : 単位時間内総有効転送量 (byte/s)

W : 待ち時間の指標

である。ここで用いた添え字 e と c は下記の意味を示す。

添え字 e : ランダムに発生する送信要求

c : 周期的に発生する送信要求

性能評価項目 I_m と W の定義は次式である。ここで T_{WT} は特に、ランダムに発生する緊急メッセージの待ち時間に注目している。

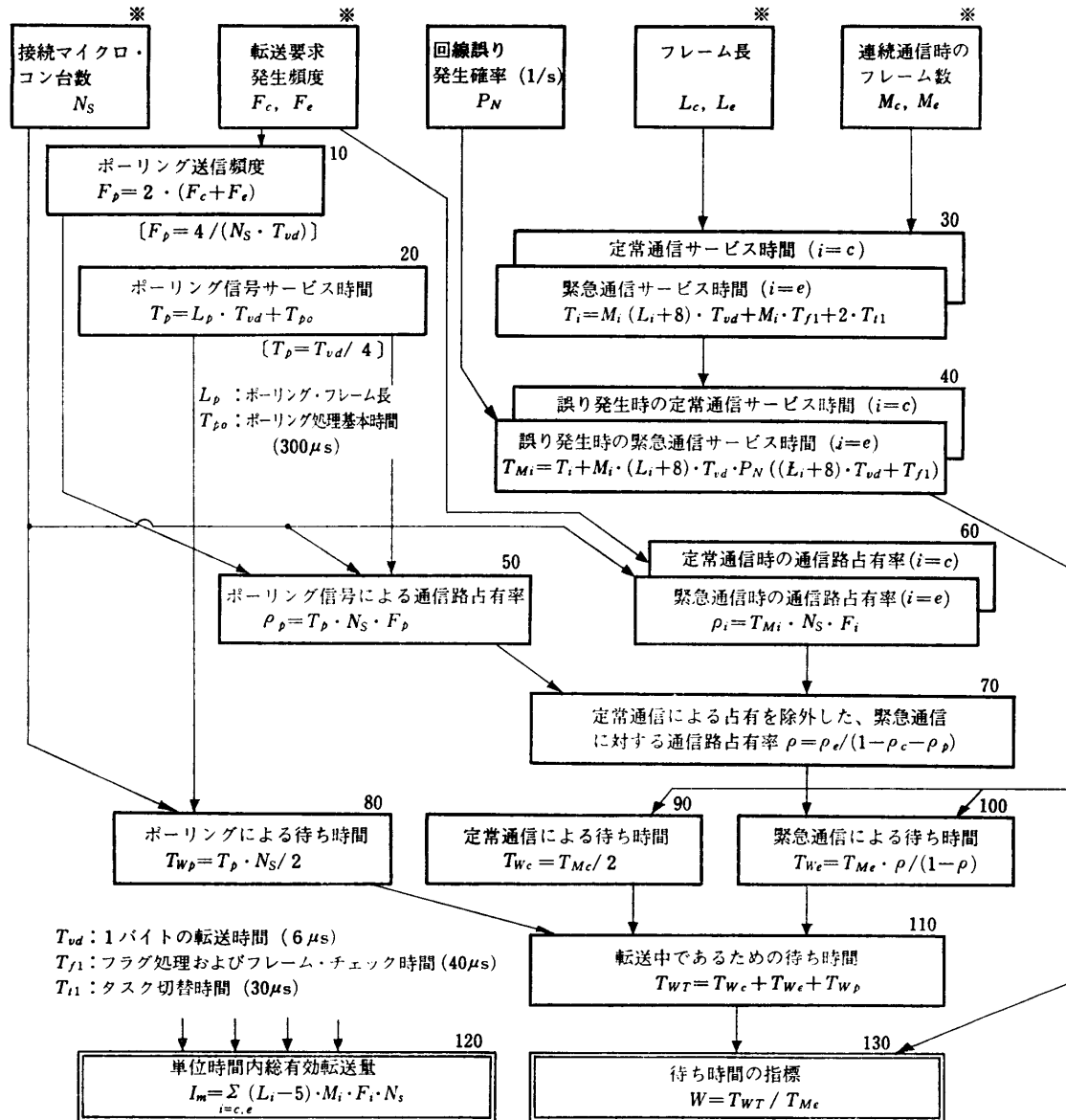


図 2 通信系の性能評価モデル (環状および樹状方式)

[] 環状の場合 (表 3 参照)

Fig. 2 Performance evaluation model for ring or tree communication links.

* 運用パラメータ

$$I_m = \sum_{i=c,e} (L_i - 5) \cdot M_i \cdot N_s \cdot F_i \quad (1)$$

$$W = T_{wT} / T_{Mc} \quad (2)$$

= (待ち時間) / (フレーム送信時間)

評価は近似モデルによっているが、この近似が成立するための条件および、その意味を説明する。

(1) ポーリング信号処理と定常通信が通信路にとって基礎負荷となっており、その間に緊急通信が発生し処理される。したがって、緊急通信の発生は定常通信中、ポーリング信号処理中、緊急通信中のいずれ

かになる。定常通信中の場合、全局に対するサービスを一巡するまで待つ必要がある。緊急通信の発生局と、発生時点の定常通信局との位置関係によって待ち時間が支配されるので、平均を考えて 1/2 なる係数がかかっている。ポーリング信号処理に対する待ち時間も同様である。次に緊急通信中の緊急通信要求について考えると、通信路占有は定常通信によりすでにベースが小さくなっているため、待ち行列を支配する実効的な占有率は、 $1/(1 - \rho_c - \rho_p)$ 倍に高められる。これは、緊急通信として仮想的に割り当てられているタイ

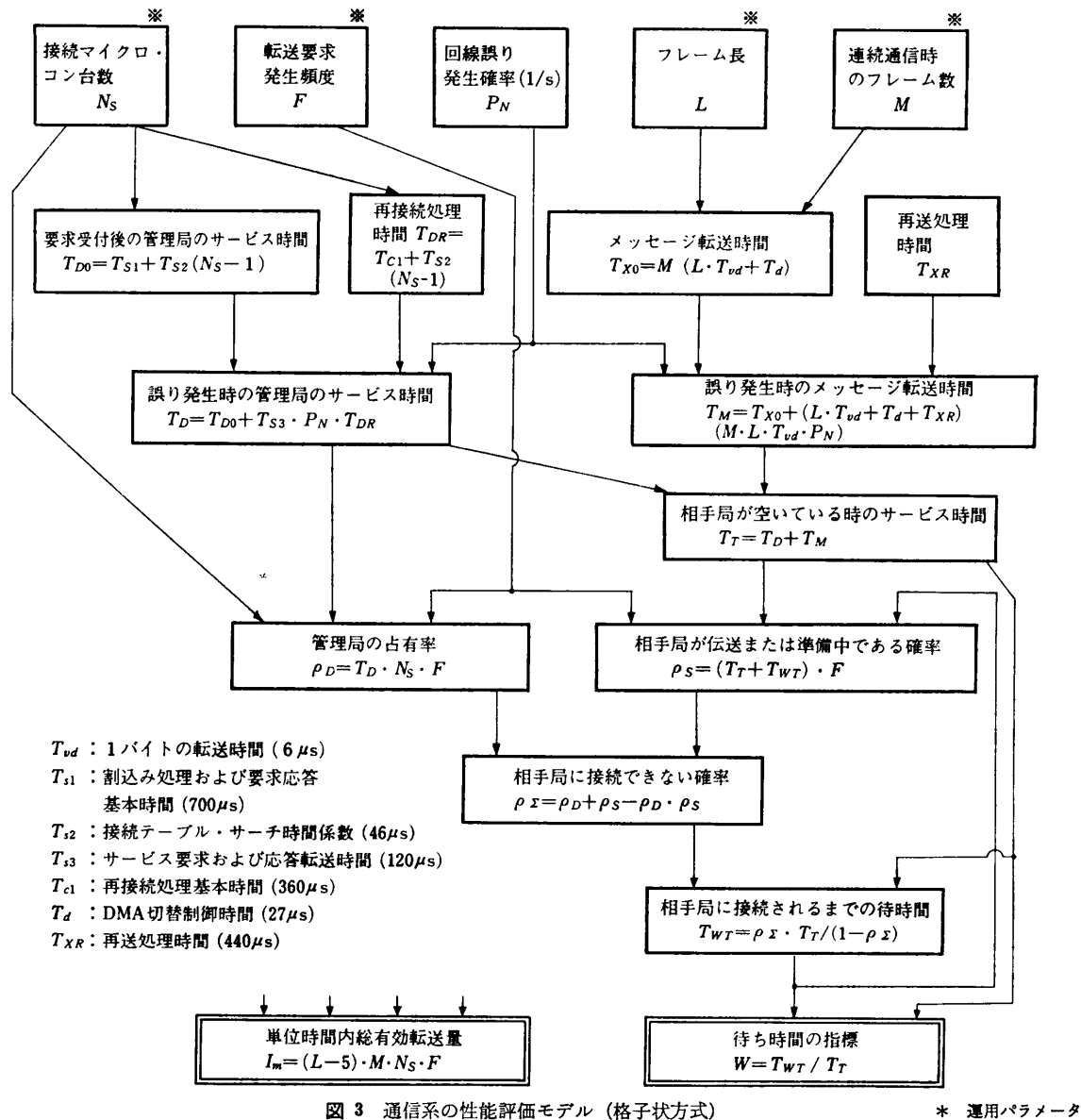


図 3 通信系の性能評価モデル (格子状方式)

Fig. 3 Performance evaluation model for a latticed communication link.

ミングに要求を発生させないと、定常通信に通信路を占有され、待ち状態に入ってしまうためである。これら3つの待ち時間の総和が、緊急通信に対する待ちになるが、これは、送信権がポーリングにより巡回し、途中で位置する局群のサービスを終了した後、該当の緊急通信が可能となるためである。

(2) 回線誤りの影響は、実用上小さいので、要求発生頻度の増加、またはサービス時間の増加のいずれとも見なし得るが、ここでは後者のモデルを用いた。すなわち $T_{Mi} = T_i + (1 \text{ メッセージ群の回線誤り確率 } P_N) \cdot (1 \text{ フレームの再送処理時間})$ $i=c \text{ or } e$ である。

なお、数値としては $P_N=0$ とした。

表4は環状と樹状を比較したものであるが、両者の差異は、ポーリング処理に関する部分のみである。すなわち、樹状方式ではポーリング処理時間 T_P がポーリング・メッセージによるため、次式の値を取り、通信路の占有および待ち時間の両者に影響する。

$$T_P = L_P \cdot T_{vd} + T_{P0} \quad (s)$$

$$T_{vd} : 1 \text{ バイトの送信時間} \quad (s)$$

$$L_P : \text{ポーリング・フレーム長} \quad (\text{byte})$$

$$T_{P0} : \text{ポーリング処理基本時間} \quad (s)$$

図3は格子状方式に対する評価モデルである。ここ

表 4 環状方式と樹状方式の性能評価モデルの差
Table 4 Difference between ring and tree communication links' performance models.

	環 状	樹 状
ポーリング送信 頻度	(通過頻度) $4/(N_s \cdot T_{sd})$	$F_P = 2 \cdot (F_c + F_e)$
ポーリング信号 サービス時間	(ポーリング信号通過時間) $T_P = T_{sd}/4$	$T_P = 14 \cdot T_{sd} + 300 \times 10^{-6}$
ポーリング信号 による通信路占 有率	$\rho_P \approx 0$	$\rho_P = T_P \cdot N_s \cdot F_P$
ポーリングによ る待ち時間	$T_{WP} = T_P \cdot N_s / 2$	

で前提としている点および近似モデルの意味を次に述べる。

(1) 待ち時間が発生する確率 ρ_s は、次の独立事象

- 1) 管理局が動作中である確率 ρ_D および
- 2) 相手局が別の局と通信または準備中である確率 ρ_s に依存する。すなわち、

$$\rho_s = \rho_D + \rho_s - \rho_D \cdot \rho_s \text{ である。}$$

(2) 格子状方式の特徴は、管理局による接続のためのサービス時間 T_{Do} が、テーブル・サーチを伴うために次式のように台数 N_s に依存する点である。

$$T_{Do} = T_{s1} + T_{s2} \cdot (N_s - 1)$$

T_{s1} : 割込み処理および要求応答基本時間 (s)

T_{s2} : 接続テーブル・サーチ時間係数 (s)

(3) 管理局による接続処理は、相手局がサービス待ち時には、先着順処理とするため、その局に対する他のサービスを行わない。したがって、各局のサービス待ちの可能性が、他局の待ちにより相乗的に大きくなる。

(4) 図3のモデルでは、定常通信がなく、すべて緊急通信で、ランダムに要求が発生するとしたモデルになっている。この理由は、上述の接続サービス時間 T_{Do} が大きすぎて、高頻度、短フレーム長の周期的メッセージを扱うには、この方式では不適と考えたからである。

(5) 回線誤りの影響は、環状方式と同様の扱いとした。

以上のモデルでは、 μP の基準クロックと通信路上の通信速度との関係が、直接的に表現されていない。両者間の関係は、 μP の負荷率やクリティカルな通信制御処理時間を考慮して求められる。たとえば、通信プロセッサと基本プロセッサが一体形で、DMA制御を用い、アドレス・チェックをソフトウェアで行う場合には、下記の2条件を満足する必要がある。す

なわち、通信制御のための μP 負荷率が一定値以下であること、および通信制御上のクリティカルな処理が、通信路上に一定 byte 長の部分が通過する間に処理できることである。

$$r \cdot (T_{PO} + L \cdot T_{PL}) + (T_I + T_{RS}) \leq \frac{L \cdot 8}{R} \cdot \rho$$

$$K \cdot T_c \leq \frac{8}{R} \cdot B_c$$

ここにおいて、

r : 全伝送フレーム中の自局関連フレームの比率

ρ : μP の許容負荷率

T_{PO} : 転送先頭アドレスの算出およびレジスタへの設定時間 (方式に依存)

T_{PL} : データの転送時間

R : 通信路伝送速度

L : フレーム長

T_I : 割込処理時間

T_{RS} : CRC エラー、アドレス・チェック、HDLC, DMAC 用各 LSI へのレジスタセット時間

K : 通信処理多重度 (インタリンク局では2となる)

T_c : クリティカルな処理時間

B_c : クリティカルな処理を完了すべき許容 byte 数
上記中、 $T_{PO}, T_{PL}, T_I, T_{RS}, T_c$ は μP の基準クロック周波数 $f_{\mu P}$ に反比例する。

4.2 性能評価結果

前節のモデルを用いて、各方式の性能を比較するために、次のような手順で評価する。

(1) 環状および樹状方式における定常通信と緊急通信を同一フレーム長、フレーム数、および頻度とする。

(2) この場合、第(1)、(2)式の評価パラメータ I_m, W は、図2の関係より、次式で表現できる。

$$I_m = I_m(N_s, F, L, M) \quad (3)$$

ここにおいて、 $F = F_c = F_e$, $L = L_c = L_e$,

$$M = M_c = M_e \text{ である。}$$

$$W = W(N_s, F, L, M) \quad (4)$$

(3) N_s, L, M を与え、 W を指定値に抑えるような、 F を第(4)式より求め、その時 I_m のを各方式の評価値とする。

$L=250$, $M=1$ の場合の DMA 制御における評価結果を図4(a)~(c)に示す。この図では $N_s=2, 8, 15, 30$ 台、 $W=0.43, 0.66, 1.0, 1.5$ の各点に対して、各方式別に I_m を求めている。これらより次の事がいえる。

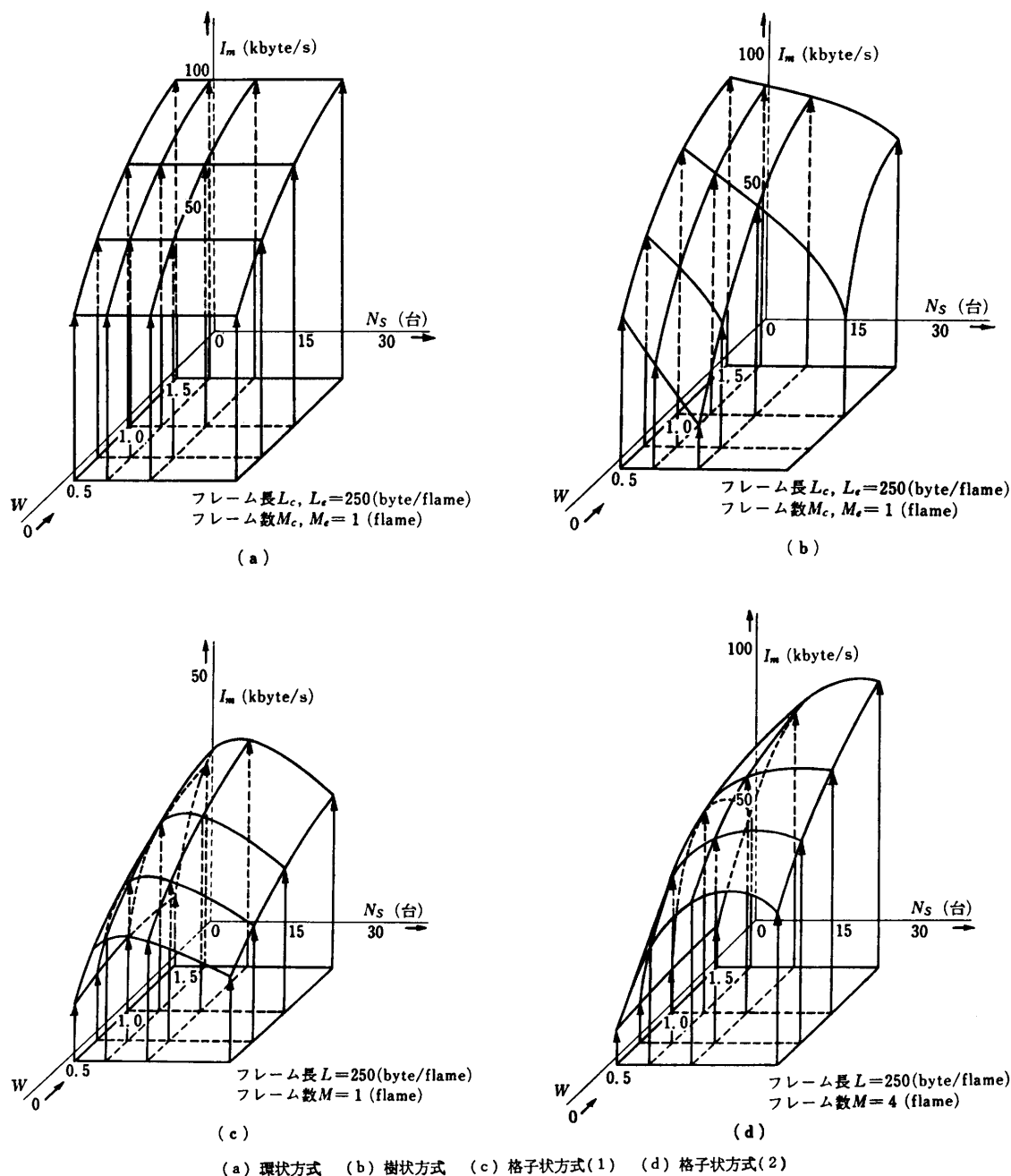


図 4 接続方式別性能評価 (DMA 方式)

Fig. 4 Performance characteristics of a ring, tree, and latticed communication links (DMA).

(1) 環状方式は、他の 2 方式に比して、 $N_s=2\sim 30$, $W\leq 1.5$ の全域で優れている。

(2) 待ち時間が問題とならず、台数が比較的小さい場合には、樹状方式の性能減少が樹状方式に比して 10~20% 程度に抑え得る領域がある。この場合、樹状方式の制御構造上の簡素さが活かされる。

(3) 格子状方式は、管理局による切り替えのオー

バヘッドが大きいため、250 byte を 1 フレームごとに送出する場合、実用的な意味から、定常通信と緊急通信を重ねた時の評価結果は省略するが、他の方式に比して性能上、大幅に不利であり、ハードウェア的にも余分な管理局を必要とする。

(4) 格子状方式では、同一待ち時間の制約を置くと、接続台数に対して評価値が最大になる点がある。

$L=250$, $M=4$ の場合, 格子状方式の評価結果を図 4 (d) に示す. この結果より

(5) 数フレーム以上にまとめて伝送する場合, 格子状通信方式は他の方式に比して有効であることがわかる.

格子状方式の総通信容量は大局的には μP 台数に比例して大きくなるのに対し, 環状では, μP 台数とは無関係に決まり, 逆に樹状の場合, μP 台数に比例してポーリングのオーバーヘッドが増加するため, 小さくなる.

図 4 (b) に見るように, 台数が大きくなり, 待ちを許さない条件では, 環状方式では通信可能な条件でも, 樹状方式では, 通信ができなくなる場合がある. この状況はフレーム長が短くなると一層, 表面化する.

$L=20$, $M=1$ の場合, 送信要求頻度すなわち有効通信量を変えた場合に, 待ち時間がどのようになるかを評価した結果を図 5 に示す. これより次の事がいえる.

(1) 環状方式では, 樹状方式に比して待ち時間を大幅に小さくできる.

(2) 最大の有効通信量は μP の負荷率により制限されるが, 環状方式が樹状方式に比して 3 倍近く転送できる.

4.3 通信方式の総合比較

前節では, 3 つの代表的な通信方式について, 性能

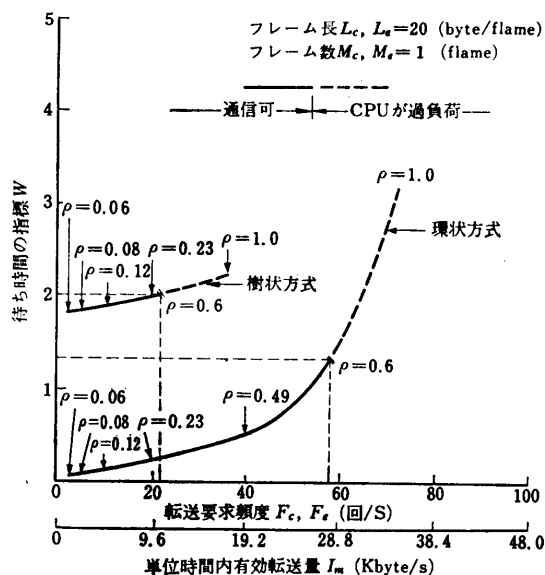


図 5 環状方式および樹状方式性能評価比較

Fig. 5 Performance comparison between a ring and tree communication links.

評価を中心に, 比較した. 本節には, この他, ハードウェア, ソフトウェアのコスト要素, 信頼性等の評価を加え, 表 5 に要約する. ハードウェア面では, 下記の点で差異が生じる.

(1) 接続点数: 格子状方式の場合, 応答性を高めるために, 制御線が各局より一本ずつ結ばれており, 他方式より多い.

(2) 配線長: 環状は樹状に比して, 直線上に局が並ぶと不利, 格子状は放射配線のため不利である.

(3) 絶縁: 環状は受信側のみで良い, 樹状はフォトカプラの場合には送・受両方で必要, 格子状はさらに制御線にも必要である.

(4) 局の切離し回路: 環状では, 局不在時にも通信路をバイパスするスイッチが必要で, このスイッチは ON 時インピーダンスが低いことが必要である. 各方式は, 自局故障時, 他局に対する割り込み要因となる異常な発振信号を抑制するために, 故障局が通信路よりフェイル・セーフで切り離されることが望ましい.

(5) 局の伝送駆動能力は, 筐体内の配線の場合, 差が現われる. 環状では隣局のみに伝送すれば良いが, 樹状では, 全局に伝送する必要がある. 格子状では方式に依存するが, 放送通信の必要な時には, 全局に伝送する必要が生じる.

(6) 実装: 16 ピン IC に換算した, 現時点で入手可能な IC を用いた場合の実装を比較すると, 樹状および格子状では 2 重系の管理局が余分に必要となる. 格子状ではクロスポイント・スイッチ制御回路があるため管理局はやや大きくなる.

(7) 光通信への適合性: 樹状の場合, 分岐が必要となり, 光通信には不利である.

ソフトウェアに関する比較はその方式に依存するが, 通信制御と自己診断の基本部分を比べると環状は制御上の内部ステータスが多いため, 他に比して多少大きくなっている.

(8) 信頼性: システムの信頼度は, 診断方式および診断のクリティカル・ポイントのフェイル・セーフ失敗確率等に依存し正確な評価は複雑となるが, ここでは, 簡単なモデルを用いて比較する. すなわち, いずれかの局で故障が発生すると, 故障が検出され, 一定時間で修復する. 2 つ以上の局がともに故障状態に入るとシステム・ダウンにいたる. このモデルでは, 表 5 の下部に示すように, 主従形, 対等形の差は少ない. なお, 故障の検出を見落す確率を考える

表 5 通信方式の総合評価

Tabel 5 Comparison of a ring, tree, and latticed communication links.

項 目					方 式	2重系環状	2重系樹状	2重系格子状
						対 等 形	主 従 形	
性 能	有 効 通 容 信 量	D M A	$N_S=15$	$M=4$	k byte/s	—	—	45/66/71
			$N_S=2$	$M=1$		注 1	35/61/67	—
			$N_S=15$			39/63/71	11/49/63	17/28/32
		PCMA		$N_S=2$		1.8/2.8/3.2	1.6/2.7/3.2 0/1.9/2.7	—
			$N_S=15$					
	応 答 性	DMA		ms	0.08/0.1	注 2	0.54/2.2	0.7/1.2
PCMA		1.0/1.7	14/56		—			
コ ス ト	ハードウエ ア	通 接続点数 信 配線長 路 絶縁 フォトカプラ 路 切離し (トランス) (親)局の伝送駆動能力 実装 (16 pin IC 換算) 光通信への適合性			点 — 個 個 — 個 —	4 $2l \sim 2\pi l$ 注 3 2 (2) バイパス・リレー 2 1 $58 \times N_S$ OK	4 $l \sim 2\pi l$ 弱 4 (2) 遮断要 FET スイッチ 4 N_S $58 \times (N_S+2)$ NG	6 $N_S \cdot l/2 \sim N_S \cdot l$ 6 (4) 遮断要 FET スイッチ 6 1 (N_S) 注 5 $72 \times 2 + 58 \times N_S$ OK
		ソフトウエ ア	プログラ ム	DMA	親 局	—	2.1	2.7
					子 局	2.8	2.1 (2.5)	2.1
				PCMA (子局)		3.2	2.5	—
				データ・エリア			0.8	0.8
	信 頼 性 $\left(\begin{array}{l} N_S=16 \text{ 台} \\ \text{MTTR}=24 \text{ h} \\ N: 1 \text{ back up} \end{array} \right)$					fit	340	363

注 1 待ち係数 $W=0.5/1.0/1.5$ に対応する注 3 l : 2つの端に位置する局の距離

注 5 放送フレームの場合

注 2 局数 $N_S=4/16$ 台に対応する

注 4 システム診断プログラムを含まない

と、対等形では、集中形に比して有利となり、この結果がシステム信頼度を改善する。

5. 各通信方式の適用分野

適用対象を記述するパラメータとしては、次の各項目がある。

- (1) 総通信データ量
- (2) 許容遅れ時間
- (3) 一時にまとめて送出すべきデータ量
- (4) 定常通信と緊急通信の通信量の比率
- (5) 情報交換の分布 (1: n または $n:n$)

前節の検討結果より、(1)～(4)については直接結論が得られる。一方、(5)については、次のように考えることにより対処できる。すなわち、

(a) 情報交換の集中による影響は、特定局に転送前後の処理が発生し、このために各局の MPU 負荷率が増加する事に現われる。この意味は図 6 の解析結果と関係し、 $\rho=0.6$ 以下の条件を、たとえば特定局の負荷が各局の平均値の 2 倍に集中している場合には、

$\rho=0.3$ 以下に抑える必要のあることを示している。

(b) アドレス・チェックをハードウェアで行わない場合には、DMA 制御下の通信制御のための負荷は、環状、樹状方式のいずれでも、情報交換の分布の影響を受けないが、ハードウェアによるアドレス・チェックの場合には、該当しないアドレスの通信制御負荷が軽減する。

上記の検討結果ならびに、LSI の各時点での機能有限性、および通信路の共通バス効果を活した、将来への機能拡張性を考慮して、通信能力に余裕のある方式を選択することが重要である。以下に各通信方式別の適切な応用分野を要約して示す。

(1) 環状方式：通信路の利用効率が高く、緊急通信に対する通信路上の応答性が他の方式に比して格段に優れている。これらのメリットに対する負担は、

(a) 局故障および局不在時の通信路からのバイパス・リレーが必要となること。

(b) 通信路を定常状態に保つためには、方式にも依存するが、最低 4 台以上の局が通信路上に存在する

か、さもないければ、最低4ビットのシフト・レジスタを環状通信路上にシリアルに接続する必要があること。

(c) 通信制御のためのアルゴリズムが他の方式に比して複雑であること。(特に PCMA 方式では複雑である。)

これらの負担に耐えるためには、上述したように、システム設計時に、システムの機能的拡張を十分に配慮し、分散制御系の特徴を活す必要がある。具体的な応用例としては、シングル・ループ・コントローラ⁹⁾等のハードウェアとソフトウェアを一体とした機能モジュール群を結ぶ超分散システムが考えられる。

(2) 樹状方式: 環状方式に比較して、特性は低下するが、その差が顕著に表われるのは、

(a) 緊急通信の比率が高いとき

(b) 緊急通信に対する待ち時間の許容範囲が小さいとき

(c) 接続される局数が多いとき

である。これ以外の時には、制御方式が簡単で、線路側接続のハードウェアが簡略化されるので、機能的、規模的に将来拡張する必要がない場合、有利である。具体的な応用例としては、周期的なデータ・ギャザリングが中心で、台数が8台と比較的少ない、第1期の分散形プロセス入出力装置¹⁰⁾に適用されている。

(3) 格子状方式: 一時に転送するデータ量が数k byteとまとまっており、しかも局数が多く、通信量が多い場合、有利である。それ以外の適用対象については、格子状方式では、管理局がハード的に必要となり、しかも、短フレーム長のメッセージ転送に対しては、スイッチ切り替えのオーバーヘッドが無視できないため不適当である。応用例としては、マルチ CRT ディスプレイと、フロッピディスク装置等を結合した高級オペレータ・コンソール等に適している。

6. 結 言

分散制御システムの核となるマイクロ・プロセッサは、大量生産効果があるため性能/コスト比が良い反面、単体能力が小さく、通常、複数個組み合わせたネットワーク構成になる場合が多い。この系で必要となる通信費については、その時点で入手可能な通信用 LSI を用い得るか否かによって、通信量に対して、ステップ状の関係を示す。したがって、分散制御系の特徴である拡張性および信頼性を活すためには、与えられた素子性能の条件下で、通信効率ならびに緊急通信に対

する応答性の良い通信方式を選定し、その制御手順を確立する必要がある。さらに LSI 化を考慮した場合、各局の電気回路的構造が若干複雑になっても、同一構造になる事が望ましく、この意味で対等形通信方式が理想的である。

本論文では、これらの基本認識のもとに、分散制御系のマイクロ・プロセッサ通信方式として、環状、樹状、格子状の3方式を取り上げ、試作実験により得られた基礎パラメータを参考にして、各方式別の性能評価モデルを用いて、方式比較を行った。この結果、次の結論を得た。

(1) 環状方式は、ハードウェアにバイパス・リレーを必要とし、制御手順に 1.8k byte のプログラムを必要とする等不利な点があるが、数百 byte 以上の長フレームをバッチで大量に転送する場合を除くと、通信路における実効的な転送能力や緊急通信に対する応答時間等性能上他の2方式に比して格段に有利である。したがって、段階的に機能を拡張したい分散形計装制御システム等に適している。すなわち、環状方式では、その時点のマイクロ・プロセッサと LSI を用いて、通信路容量内では最高性能の通信系を実現することができる。

(2) 樹状方式は、コンテンション方式対等形では、通信路重負荷時、性能が格段に下る。一方、ポーリング方式にすると、通信手順が比較的簡単となるが、親局が必要となること、ポーリング処理のオーバーヘッドがあり、緊急通信に対する応答時間が大きくなる等で不利である。

(3) 格子状方式では、親局がかならず必要で、しかも切り替えのオーバーヘッドが大きいので、短フレームの通信に対しては不適である。しかし、1k byte 以上のデータを一時に、しかも大量に、転送する必要のあるシステムでは、他の方式に比して有利である。

以上、3方式の比較を行った。今後の課題として2重系、自己診断等を含めて、高信頼度化の観点での定量的評価モデルを確立することである。

終りに臨み、本研究の遂行にあたり、ご援助頂いた日立製作所大みか工場および那珂工場の関係各位ならびに本論文の内容について技術的討論を下された日立研究所谷中部長、川本博士に深謝致します。

参 考 文 献

- 1) Russo, P. M.: Interprocessor Communication for Multi-Microcomputer Systems, Computer, Vol. 10, No. 4 (1977).

- 2) Spetz, W.L.: Microprocessor Networks, Computer, Vol. 10, No. 7 (1977).
 - 3) Weissberger, A.J.: Analysis of Multiple-Microprocessor System Architectures, Computer Design (June 1977).
 - 4) Liu, M.T. et al.: System Design of the Distributed Double-loop Computer Network (DDL CN), Proc. of the 1st International Conference on Distributed Computing Systems (1979).
 - 5) Powell, D.R.: RHEA-a Damage and Fault Tolerant Digital Communication Support for Distributed Avionic Processing, *ibid.*
 - 6) 浜田: データ・ハイウェイ高度化による計装へのインパクト, 計装 24-3 (1981).
 - 7) 川端他: ハイレベル・データリンク制御手順とその標準化動向, 情報処理 19-5 (1978).
 - 8) Shoch, J.F. et al.: Measured Performance of an Ethernet Local Network, Comm. ACM 23-12 (1980).
 - 9) 末広, 浜田他: ワン・ループ・コントローラ, 日立評論 62-2 (1981).
 - 10) 浜田他: プロセス入出力装置への応用, 電気学会第3回電子回路シンポジウム (1979).
(昭和55年10月16日受付)
(昭和56年10月7日採録)
-