

イーサネット LAN における TCCS アーキテクチャの実現*

安藤 勉[†] 中野宣政[‡] 水野忠則[§]
 静岡大学 三菱電機 静岡大学

要約

イーサネット上での実時間通信の問題が議論されるときに、常に問題となるのが、イーサネットで採用されている MAC(Medium Access Control) プロトコルである CSMA/CD のもつ通信遅延の非保証性である。本研究では、イーサネットの相互接続性や低価格性といった利点に着目し、FA において要求される時間制約付きの通信(タイムクリティカル通信)をイーサネット LAN 環境で実現する方法を提案する。具体的には、ダイナミックに変化するネットワークの特性を詳細に把握し、各種状況下での衝突による再送時間を考慮した通信遅延を予測する。そして、これに基づく通信帯域の管理を行うことにより、アプリケーションプログラムによるタイムクリティカル通信実現のための TCCS(Time Critical Communication Software) アーキテクチャの構築方法について検討している。

1 はじめに

情報通信技術の進歩にともなって、大量のデータの高速な通信が可能となってきている。特にローカルエリアネットワーク(LAN)において、その発達は顕著であり、伝送速度 100Mbps の LAN も普及してきている。

一方で、プラント制御や FA(ファクトリオートメーション)においては通信の高速化・大容量化だけでなくとどまらず、安全性や信頼性の観点から「要求された時間内での通信サービスの保証」を行うタイムクリティカル通信(Time Critical Communication)の必要性が議論されている¹⁾。

そのため、通信時間の保証を必要とする用途においては、その MAC プロトコルとして IEEE802.4 トークンパッシングバスプロトコルや IEEE802.5 トークンパッシングリングプロトコルが利用されている。またこれに関連して、IEEE802.4 トークンバスや FDDI に使用されて

いる Timed Token Protocol を拡張したタイムクリティカル通信プロトコルなども提案されている²⁾。

また、FA の現場では従来のイーサネット³⁾を利用した LAN も少なくなく、イーサネット及び TCP/IP の相互接続性、低価格性といった利点から、これを積極的に利用していくことで、コストを低く抑えたいという要求も多い。

そこで本研究では、安価で広く普及しているイーサネットを利用し、FA において要求される時間制約付きの通信(タイムクリティカル通信)を LAN 環境で実現することを目的とする。

そのための問題点とそれに対する方法について、以下で考察する。

2 イーサネット利用上の問題点と対策

イーサネット上での実時間通信の問題が議論されるときに、常に問題となるのが、イーサネット採用されている MAC(Medium Access Control) プロトコルである CSMA/CD のもつ通信遅延の非保証性である。

CSMA/CD プロトコルでは、送信タイミングのスケジューリングは行わず、送信して失敗したら時間をおいて再送信を行うといった比較

* Realization of the TCCS Architecture on Ethernet LAN

[†]Tsutomu ANDO, Shizuoka University

[‡]Nobumasa NAKANO, Mitsubishi Electric Co., Ltd

[§]Tadanori MIZUNO, Shizuoka University

的単純な方式を採用している。そのため、ネットワークトラフィックが少なく、送信データの衝突が比較的起こりにくい状況ではスムーズに送信が行われるものの、トラフィック量の増加とともにデータの衝突が急激に増加し、スループットの低下が見られるといった特徴をもっている。このようなデータの衝突が多発する状況では、送信が成功するまでに繰り返し何回もの送信が行われることになる。

従って、イーサネットのような通信にかかる最大時間が保証されていない通信サービス上で実時間通信を行うためには、ネットワークを利用するユーザ数とそのフレーム発生率、平均データ長等によってダイナミックに変化するネットワークの特性を把握し、各状況下での通信にかかる時間(通信遅延)を、衝突による再送時間も含めて予測する必要がある。

しかしながら、その特性において、過度のネットワーク負荷は衝突の増加を引き起こし、有効データ以外のデータによって通信帯域が無駄に消費される状況を作り出す。この状況は、トラフィックの増加がスループットの増加ではなく減少を引き起こしている状況であり、ネットワークが不安定な状態にあることを示している。このような状況での通信遅延の予測は困難であり、仮に正確に遅延を予測できたとしても、有効にネットワークを利用できてはいない。

この結果、このような過負荷な状況を作り出さないよう、ネットワークに流れるデータの総量を制限し、安定したスループットが得られる状況で通信遅延を予測することが求められる。

また、ネットワークの特性(利用者数、最大転送単位)とそこでの各ユーザの特性(メッセージ発生率、平均メッセージ長)によって、ネットワークの最大有効利用帯域(これは10Mbpsの帯域のうち利用可能な帯域)も変化するので、ネットワークのデータ量を制御するためには、ある利用状況における最大有効利用帯域を知っておかなければならない。これについては、各種条件を想定し、数値的解析手法とシミュレーションの両面から測定を行っている^[4]。

3 帯域管理

3.1 概要

先に、イーサネットLAN上でタイムクリティカル通信を行う上での問題点について議論したが、それを踏まえたうえでタイムクリティカル通信実現のために、図3.2のような帯域管理システムを提案する^[4]。

このシステムではLAN上にある通信アプリケーションに対し、通信を開始する前に通信の内容、すなわちQoSがどのようなものであるかを報告させ、必要となる帯域の申請を行わせる。つまり、LANを経由する通信に関してはその内容をすべて把握し、過度のトラフィックを防止するために通信量を最大有効帯域以下に抑えつつ、帯域の割り当て・回収を行う。

この帯域管理システムは大きく以下の三つの部分に分かれている。

- 資源配分管理部
- サービス応答管理部
- 実績モニタ / 性能測定部

以下で、各部の詳細について説明する。

3.1.1 資源配分管理部

資源配分管理部では、アプリケーションからの要求に対し、通信の許諾制御を行う。ネットワークの利用を制御・管理し、これをもとに通信帯域が許す限り、通信要求があればその要求内容に応じた通信の許可を行う。

資源配分管理部はネットワークの各ノードに配置され、そのうちの 하나가資源配分管理サーバとしてネットワークの利用状況の管理を集中的に行い、サーバを含むすべての資源配分管理部は、サーバに対して許諾制御の判断基準となるネットワークの利用状況を問い合わせるという形態をとる。

以下、資源配分管理クライアントと資源配分管理サーバの役割について順に説明する。資源配分管理クライアントはアプリケーションと資源配分管理サーバの間に位置し、以下の処理を行う。

- 送信要求内容(後述)から必要な消費帯域幅を算出

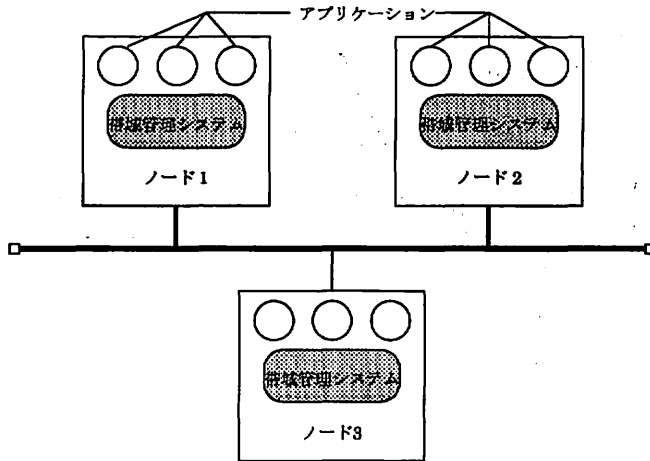


図 3.1: 帯域管理システムの配置図

- 資源配分管理サーバに対し、算出した消費帯域をもとに問い合わせを行う。問い合わせの内容として、利用可能な帯域の確認とそれに対して必要帯域の申請を行うか否か、加えて申請を行う場合に許可が下りないときどうするか等を与え、サーバからの返答を受け取る
- 必要に応じてサーバからの結果をアプリケーションに通知する
- 申請を行い、通信が許可された場合には、サービス応答管理部（後述）に連絡をとり、送信のモニタリングに必要な準備を施した後、実際に送信する
- また通信完了後には、不要になった帯域をアプリケーションから回収し、資源配分管理サーバに帯域開放の通知を行う
- 利用可能帯域の確認のみの場合には、現状から算出される利用帯域を返し、申請を含む問い合わせに対しては、以下に従う
- 消費されるネットワーク帯域が最大有効利用帯域を超えていないかを確認し、超えているようならば送信を控えるよう指示する
- 最大有効利用帯域を超えない場合に、通信がタイムクリティカルなものでなければ帯域を確保したのち送信を許可し、タイムクリティカルなものであれば、時間内での通信が可能なものだけ送信を許可し、許可できないものについては、問い合わせの際に併記されている処理に従い、それが不可能な場合にはその旨を通知する。ここで、通信遅延の予測はサービス応答管理部（後述）によって行われる

一方で、資源配分管理サーバはネットワークの利用状況の管理と把握を行い、資源配分管理クライアントからの問い合わせに対応する。その処理内容は以下の通りである。

- 各ノードに配置されている資源配分管理クライアントからの問い合わせに応答し、帯域申請を許可あるいは帯域開放を受理するたびに、ネットワークの利用状況の更新を行う

また、資源配分管理サーバがネットワークの利用状況として管理する内容は、

- ネットワーク利用者数
- 各利用者の最大伝文発生率とその最大データ長

である。この情報は必要に応じてネットワーク全体で閲覧され、通信許可がおきるたびに、サーバによってその内容の更新が行われるのは先の述べた通りである。

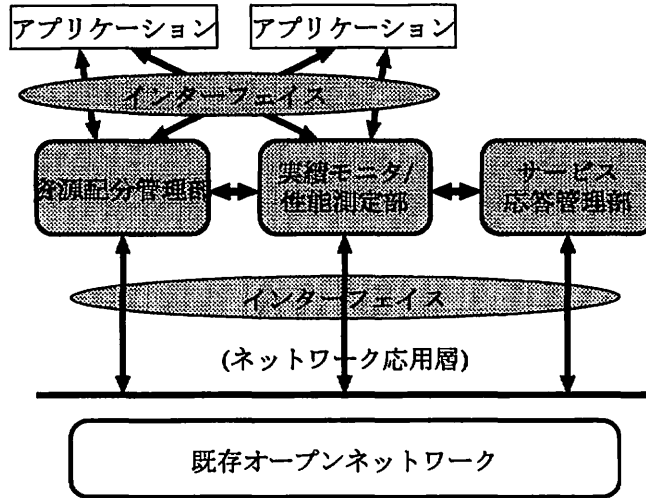


図 3.2: 帯域管理システム

3.1.2 サービス応答管理部

サービス応答管理部では、ネットワーク利用状況をもとに、通信にかかる時間(通信遅延)を見積もる役割を行う。

イーサネットの物理的な伝送速度を10Mbps、ネットワークスループットを S とすると、その値は

$$\text{通信遅延[slot]} = \frac{NH}{S\gamma} - \frac{1}{\sigma} + 1$$

として計算される。タイムクリティカルな通信であれば、通信遅延と要求時間 TW を比較することにより通信が可能かどうか判断される。

また、スループット S については、以下のパラメータをもとに算出する：

- ネットワーク利用者数: N
- 最大転送単位 (MTU): H
- 各利用者の最大伝文発生率: σ_i
- 各利用者の発する伝文の最大長: $1/\gamma_i$

その算出方法については、論文⁽⁴⁾において、各利用者の (σ_i, γ_i) が異なる場合を考慮した議論がなされており、スループット S の計算はこれを用いて行うものとする。この方法は、ネットワークモデルを作成し、解析的な手法を用いて

ネットワークスループットを定式的に求めている。これについてはシミュレーションによる確認を行っている。

上記のようにして求めたスループットをもとに実際の通信遅延を測定し、その平均値と標準偏差をもとに、信頼度を設定して通信遅延の最悪値を見積もることを考える。

母平均 m 、母分散 σ^2 をもつ母集団から大きさ n の標本を抽出したとき、 n が大きいとき標本平均 \bar{X} は、正規分布 $N\left(m, \frac{\sigma^2}{n}\right)$ に近い分布をもち、 \bar{X} を標準化した確率変数

$$\frac{\bar{X} - m}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}$$

は標準正規分布 $N(0,1)$ をもつことが知られている。従って、信頼度と信頼区間の考え方をを用いることにより、ある信頼度のもとでの通信遅延の最悪値を見積もることができると考えている。

3.1.3 実績モニタ / 性能測定部

実績モニタ / 性能測定部では、通信のモニタリングを行い、申請した以上の帯域を消費していないかどうかを監視するとともに、通信遅延を測定し、予測した通信遅延との差から予測した値の補正を行えるようこれをデータベース化

して保存する。これによるネットワークの性能評価を行い、結果は今後の通信遅延の予測へとフィードバックされる。

まず、申請帯域を守って送信を行っているかを監視するために、送信要求内容をもとに十分な送信バッファを用意し、最短通信要求発生間隔以内にバッファが満たされることがあれば、アプリケーションへ通知するようにする。また、そのような場合でもネットワークへの影響がでないように、バッファは最短通信要求発生間隔のみフラッシュされる。

次に測定に関してであるが、ここでは通信により得られる以下の値を測定する。

- 実際のスループット
- 実際の通信遅延

これらの実測値は、以降の許諾制御 (消費帯域幅算出、通信遅延予測) に利用できるようデータベースへと蓄えられる。

3.2 帯域申請

次に、帯域管理システムを利用した実際のデータ送信手順について述べる。

まず、送信者は送信を行う前に、送信内容をもとに帯域管理システムに帯域の申請を行う。各ユーザが申請するデータ送信要求属性としてあたえられるのは以下の内容である。

- 最大転送データ量 D_{max}
- 所要ウィンドウ幅 TW
- 最短通信要求発生間隔 I_{min}
- 平均通信要求発生間隔 I_{mean}

ここで、最大転送データ量とは送信要求毎のデータの最大量である。また所要ウィンドウ幅は送信完了までの時間を表す属性である。これはタイムクリティカルな通信かどうかを判断する際にも利用される。

これらの要求内容を提示してユーザは帯域申請を行う。送信が許可された場合には送信を開始し、許可されなかった場合にはあらためて申請を行う必要がある。

次に、送信要求を受け取った場合の帯域管理システムの動作について説明する。

まず最初に資源配分管理部では通信が可能かどうかの許諾制御が行われる。資源配分管理部は、許諾制御の際にサービス応答管理部に対して、通信遅延と消費される帯域幅の問い合わせを行う。消費される帯域幅の累積が最大有効利用帯域を超えるものであれば、過度のトラフィックを抑制するため送信は行われぬ。さらに、時間内での送信が不可能と見込まれるタイムクリティカル通信についても同様である。それ以外の通信については送信の許可が下される。

そして送信が可能な場合には、送信の開始から終了まで実績モニタ / 性能評価部でのモニタリングが行われる。ここでモニタリングされた実測値は、以降の許諾制御 (消費帯域幅算出、通信遅延予測) へとフィードバックされる。これらの処理はユーザレベルからは意識されないものである。

3.3 システム構築上の問題点

さて、通信で消費される帯域の見積りによるタイムクリティカル通信の可能性について述べてきたが、これを構築するうえで問題点がいくつかでてくる。

まず、ネットワーク帯域利用状況の共有について考えなくてはならない。帯域はネットワーク全体で共有するものであるが、その利用の際の判断基準となる帯域の利用状況は、各ノードによる利用状況のアトミックな更新を保証し、かつその変化をネットワーク全体で同時に共有できるものでなければならない。しかもこの処理によるタイムクリティカル性への影響を極力抑えるためには、高速な書き込み、読み出しが可能でなくてはならない。これには、ネットワーク全体での共有メモリのようなものを考える必要がある。あるいは、帯域獲得の際にどれだけの帯域を予約するかをブロードキャストしなくてはならない。

また、通信を行うすべてのアプリケーションについて、その消費帯域を正確に把握しておかなければならない点も問題である。ここでいう通信とは、ネットワークを利用する時間制約をもたない通信を含めてすべてである。これは、タイムクリティカルであろうがなかろうが通信によりネットワーク帯域を消費するという点において同様であり、これを正確に把握しておか

なければタイムクリティカルな通信を行う際に有効帯域の計算が正しく行えないからである。

この正確な把握には、予測を含め、性能のモニタリングによる補強が不可欠である。

加えて、送信要求内容に示される内容自体についても吟味する必要がある。申請する帯域が適切なものでなければ、許諾制御による帯域管理自体が意味をなさなくなってしまうからである。

これらの問題点については、今後さらに検討していく必要がある。

4 100Mbps LAN へのソフト TCCS 実装についての考察

現状において、10Mbps バス型イーサネットは、工場内 / 企業内ネットワークとして普及し、ふんだんに使われているが、パソコンなどの接続ノードそのものの処理能力の飛躍的な向上があり、Ethernet を現行の 10Mbps から、一挙に 100Mbps へと高速化した Fast Ethernet やデマンドプライオリティ MAC プロトコルなどが IEEE802.3 および同 802.12 標準化委員会にて審議され、早くも商品として出回っており、また 25Mbps から各種スピードの ATM の普及のきざしを見せている^[6]。我々の進めるソフト TCCS アーキテクチャに関し、このように各種現在入手可能な高速 LAN 上への実装に関し、以下その有効性を考察してみる。

基本的には、帯域管理など QoS サポート機能のない Fast Ethernet、デマンドプライオリティ MAC プロトコルは、TCCS 機能の実現のためにはソフト TCCS としての仮想的なコネクション管理、帯域管理が必要とされる。

4.1 Fast Ethernet(リピータ・ハブ)へのソフト TCCS の適用について

ここで対象とする高速 LAN としては、現行 IEEE802.3 と同一方式の 802.3u Fast Ethernet を検討の対象とする。IEEE802.12 デマンドプライオリティ MAC プロトコル LAN は、同じ 100Mbps の性能とはいっても、ハードウェア、ソフトウェアとも大幅に現行 Ethernet と方式が異なり、以降に困難が予想されるので検討から除外した。Fast Ethernet のシステム構

仕様 / 方式名	10Base-T	100Base-T
伝送速度	10Mbps	100Mbps
アクセス制御	CSMA/CD	CSMA/CD
フレーム形式	Ethernet	Ethernet
トポロジー	バス / スター	スター
ケーブル仕様	Coax UTP-3, fiber	UTP-3,5, fiber
ハブ・ノード間 最大距離	100m	100m
コード化	マンチェスタ	NRZI, MLT-3

表 4.1: 10/100Base-T 仕様

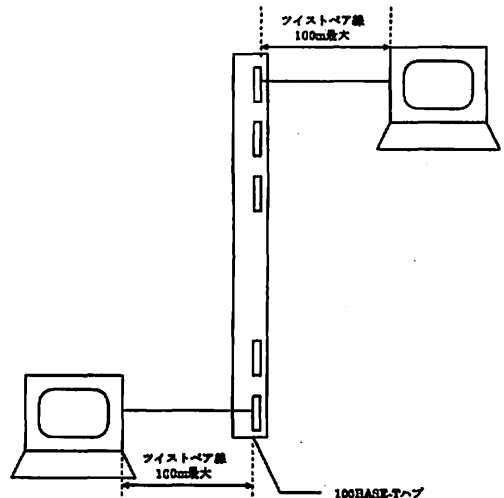


図 4.1: Fast Ethernet(100Base-T) 構成図

成とその仕様を表 4.1 および、図 4.1 に示す。図 4.1 に示すハブは、2 台以上のノードの接続されるリピータであり、論理的に、このハブを介して接続されるノードは、LAN としてすべて一本の媒体セグメントを共有する従来のバス型と変わりはない。

また媒体のアクセス制御は表 4.1 に示すように、CSMA/CD が使用され、またそのスロットタイムは、「規定されたトポロジーの最大距離に対する物理チャンネルの遅延時間の最大値 + ジャム信号の最大時間」として規定されるから、この値はビットレートが 10Mbps より 100Mbps に変わろうと不変である。我々の提唱する Ethernet に関する帯域見積り論^[6]

はスロットタイムを離散時間単位として成り立っている。従って、ソフト TCCS における Ethernet 対応の帯域見積もり理論はそのまま Fast Ethernet の帯域見積もり方式に適用できる。また、その結果としてのスループット、ディレイは以下の通りと予測される。

- Ethernet チャンネルのスループット S はチャンネルがパケットを転送しているスロットタイムの全体時間に占める比率として $S(H, \frac{\sigma}{\gamma}, N)$ と表される^[4]。ここで、 H はスロット時間を単位として表されたパケット長、 σ はスロット時間あたりの伝文発生を示すポアソン分布の平均値、 γ はパケットを単位として表した伝文長の幾何分布の平均値の逆数、 N はカスタマー数である。

Fast Ethernet は Ethernet に比べスロット当たりのデータ量が 10 倍となるから、同一のデータ量対応の伝文長 (H/γ で表される) は Ethernet のそれに比べ約 1/10 となる。という事は、 σ, N は不変とすると、解析結果を当てはめると結果としてスロットタイム当たりのスループットは低下する。(例えば、 $N = 10, \gamma = 1, \sigma = 0.008, H = 10$ のとき $S = 0.64$ であり、同一 N, γ, σ および $H = 2$ のとき $S = 0.135$ となる)

- ディレイ W_s はスループットの関数として

$$W_s = \frac{NH}{S\gamma} - \frac{1}{\sigma} + 1$$

と表される^[4]。 σ が変わらないものとするれば、上式で $1/S$ の増加と H/γ の低下はほぼ相殺して、結果として W_s の値はほぼ同一の値となる

4.2 Fast Ethernet(スイッチング・ハブ)へのソフト TCCS の適用について

リピータ・ハブはシステム全体で一本の媒体を全ノードで共用するが、スイッチング・ハブは、各ノードそれぞれの媒体が独立しており、各ノード間をクロスバスイッチのイメージで相互接続する。従来の LAN 相互接続においては、この種の接続形態はブリッジまたはルータによ

りストア&フォワード動作で実現した。これに対し、スイッチング・ハブにおいてはパケットの先頭の向け先アドレスを解説するのみでスイッチ動作が行われ、目的のノード間をディレイなしで接続する。従って、同一向け先が同時に生じない限りにおいて衝突は発生せず、パケットの同時転送が可能である。(但し本方式においても向け先対応での衝突が生じる場合を考えると、すでに向け先の先読みが行われているから、CSMA/CD による向け先チャンネルの争奪レゾリューションは機能しない。この場合ストア&フォワードを採用している製品が多い)

本スイッチング・ハブ方式には我々の帯域見積もり方式は適用できない。但し本方式においても各独立チャンネル対応の帯域管理機能は持たないから、TCCS 実現のためには本方式対応の帯域/ディレイ見積もり方式とアプリケーション間の仮想的なコネクション管理、帯域管理が必要とされる。問題は、そもそもスイッチングハブ・システムは、多クライアント・集中サーバ対応システム指向であり、サーバノード数が極端に多く、しかもそれが徹底して分散している FA システム対応には向いていないという事である。

4.3 ATM 対応ソフト TCCS の適用について

ATM の FA、特にプラント制御への適用、ロボットのテレオペレーションシステム^[4]等が検討され報告されている。いずれの場合もセンサー、アクチュエータデータを CBR データとして AAL-1 にマッピングし、ビデオデータを VBR データとして AAL-5 にマッピングしている。

ATM はそれ自身でコネクション管理、帯域管理機能を持つから、ソフト TCCS による対応する管理は必要なくなるが、依然としてサーバ実行制御を含む行って来いのレイテンシー管理、およびその時間の見積もり機能はアプリケーション機能として必要とされる。

5 今後の課題

本稿では、タイムクリティカル通信をイーサネット上で行う際に問題点となる「通信時間の保証」について言及し、これを実現するための

帯域管理システムについて提案を行った。

今後の課題として、本方式による消費帯域の予約と開放のオーバーヘッドが、実際の通信にどの程度影響してくるのか、またこれにより可能になる実時間通信がどの程度実用に耐えるものかを実装により確認する。

また、現在の見積りでは

- ネットワーク利用ホスト数
- 最大転送単位 (Maximum Transfer Unit)
- 各ユーザのメッセージ発生率とその平均長

をもとに消費帯域を画一的に算出しているが、果たしてこの方法が適切であるかどうか、絶対的な基準として機能するのかについては、今後の実装において確認していく必要がある。

加えて、必要最小限の幅で帯域の見積りを行うのは極めて困難であり、現在の方法では、送信データの発生率とそのデータ量については最大値で見積っているが、通信量の変動が大きい場合には最大の通信量でその見積りを行う必要がある。周期性をもつものであれば、その状態により帯域の予約・開放をこまめに行うなどの工夫についても検討したい。

また、前節で考察したリピータ・ハブの Fast Ethernet への対応についても、対象として今後検討していきたい。

参考文献

- [1] ISO: User requirements for system supporting Time-critical communications, ISO DTR 12178 (1993)
- [2] 厚井, 妹尾, 高田, 井手口, 石坂: LAN におけるタイムクリティカル通信プロトコルの提案と評価, 信学論, Vol. J76-B-I, No.11, pp.882-891 (1993.11)
- [3] The Ethernet: A Local Area Network Data Link Layer and Physical Layer Specification, DEC & Intel & XEROX, Version 1.0, (1980.9)
- [4] N. Nakano, T. Ando, F. Sato, T. Mizuno: Studies for Realizing Soft TCCS residing on top of Ethernet LAN, Proceedings of the 1996 ICPADS, pp.141-148 (1996.6)
- [5] 中野, 太田, 渡辺, 水野: 分散 TCCS 実現のためのグループ管理機能, 情報処理学会論文誌, Vol.36, No.8, pp.2027-2036 (1995.8)
- [6] Klara Nahrstedt, Jonathan M. Smith: The QoS Broker, IEEE Multimedia, Vol.2, No.1, pp.53-67 (Spring 1995)