

データ圧縮機能を持つタイムクリティカル通信プロトコルの提案と評価

井手口 哲夫[†] 野口 正一^{††} 厚井 裕司^{†††}
永島 規充^{†††} 渡邊 晃^{†††} 妹尾 尚一郎^{†††}

プラント制御やFAといった制御通信分野においては高速性だけでなく指定された時間(タイムウィンドウ)内にデータを転送すること(タイムクリティカル性)が要求される。従来FDDIなどで用いられているTimed Token Protocolでは、入力トラヒックが過剰に増大した場合などにはタイムクリティカル性を保証できなかった。この問題を解決するため筆者らは以前、このTimed Token Protocolを改良したタイムクリティカル通信プロトコルを提案した。今回、タイムクリティカル通信の性能を向上させるため、タイムクリティカル通信プロトコルを改良した、データ圧縮によりネットワークのトラヒック量を抑制するようプロトコルを提案する。本論文では、提案プロトコルの記述を与えるとともに、性能特性を明らかにするため各種条件でシミュレーションを実施し、その有効性を確認する。

Proposal and Evaluation of Time Critical Communication Protocol with Data Compression

TETSUO IDEGUCHI,[†] SHOICHI NOGUCHI,^{††} YUUJI KOUJI,^{†††}
NORIMITSU NAGASHIMA,^{†††} AKIRA WATANABE^{†††}
and SHOICHIRO SENO^{†††}

In control communications such as industrial plant control and FA (factory automation), it is required not only high speed communication but also completion of data transmission within a specified time (time criticality). Timed Token Protocol which is used by FDDI (Fiber Distributed Data Interface), can not guarantee time criticality when a network is overloaded. To solve it, we proposed Time Critical Communication Protocol. In this paper, we introduce a modification to its protocol which uses data compression to restrict data traffic. This paper describes Time Critical Communication Protocol with data compression, and evaluates it by simulations under various conditions.

1. ま え が き

高度情報化社会の成長にともない分散システムの構築が進むなか、情報通信ネットワークの重要性はますます高まっている。特に、ローカルエリアネットワーク(LAN)においては伝送技術の進展にともなって高速化が進み、画像データベースを扱ったものから大容量ファイルアクセス、さらにはマルチメディア情報まで多種多様な応用システムの構築が行われ、情報通信

ネットワークに対して高速性と低遅延性が要求されている。

一方、プラント制御やファクトリオートメーション(FA)などの制御用通信の分野においては、データを高速に転送する実時間性能に対する要求だけでなく、制御機器に対して指定した時間内に通信を完了し、制御動作の実行を保証する機能の要求が顕著となっている。この「指定した時間内に通信またはトランザクションを完了する」特性は、タイムクリティカル性と呼ばれ、その機能を提供する通信をタイムクリティカル通信(Time Critical Communication)¹⁾と呼ぶ。さらに、このタイムクリティカル通信においてアプリケーションから指定される時間をタイムウィンドウと呼び、これによって定量的にタイムクリティカル性を表現するものである。

[†] 三菱電機情報ネットワーク株式会社
Mitsubishi Electric Information Network Corp.

^{††} 日本大学工学部情報工学科
Faculty of Engineering, Nihon University

^{†††} 三菱電機株式会社情報技術総合研究所
Information Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corp.

従来、制御用通信に用いられている FDDI²⁾や IEEE802.4 トークンバス³⁾の MAC (Media Access Control) 層プロトコルである Timed Token Protocol (以降 TTP) では、時間的制限があるアプリケーションに対応するため、同期と非同期という2種類のデータを扱い、優先度の高いものを同期データとして転送する。このプロトコルでは複数のタイムクリティカルアプリケーションをサポートする場合など同期データごとに異なるタイムウィンドウ値を保証する機能がないため、アプリケーションが想定している時間の上限を超えた同期データの送信が発生し、タイムクリティカル性の保証はできなかった^{4)~10)}。

したがって、従来の制御用通信ではタイムクリティカル性を保証するのではなく、あらかじめ設計段階においてアプリケーションを含むネットワークのトラヒックなどの条件を明確にし、時間的な要件についてシステムごとに対応する必要があったため、システムの柔軟性や拡張性に問題があった。

このような課題の解決に向けて ISO TC184 (産業オートメーション:システムインテグレーション) /SC5 (アーキテクチャと通信) /WG2 (通信と相互接続) の TCCA (Time Critical Communication Architecture) ラポートグループではタイムクリティカル通信アーキテクチャとそのシステム要件を明らかにしている¹⁾。

このようなタイムクリティカル通信に対する課題を解決するために、筆者らは高負荷時の性能低下を防ぎ、かつタイムクリティカル通信に適したプロトコルとして、指定されたタイムウィンドウを超えるデータの送信を抑制するメカニズムを IEEE802.4 トークンバスや FDDI に使用されている TTP に導入することにより、タイムクリティカル通信性能を向上できるプロトコルを提案し、その有効性を示した¹¹⁾。

本論文では、筆者らがすでに提案したタイムクリティカル通信プロトコルの技術的課題であるタイムクリティカル通信性能の向上、すなわちタイムクリティカル通信を要求するデータの転送率を高めるために、ネットワークのトラヒック量を抑制する方式としてデータ圧縮機能を持つタイムクリティカル通信プロトコルを提案し、その性能を評価する。

以下2章でタイムクリティカル通信の基本的な考え方と従来プロトコルにおける課題について述べ、3章ではこれらの課題を解決するためのタイムクリティカル通信プロトコルを提案する。さらに4章では提案したプロトコルの基本特性を示す近似式の導出とシミュレーションによる評価を行い、その解析結果を論じる。

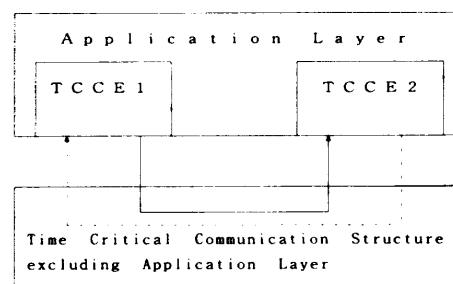


図1 TCCA アプリケーションモデル

Fig.1 TCCA application model.

2. タイムクリティカル通信

2.1 タイムクリティカル通信モデル

ISO/TC184/SC5/WG2/TCCA ラポートグループが定義したタイムクリティカル通信アーキテクチャのアプリケーションモデルを図1に示す。本アーキテクチャは、計測制御やFA分野のアプリケーションに対してデータ転送時間を保証した通信サービスを提供することを目的としている。図1において、タイムクリティカル通信エンティティ (Time Critical Communication Entity: TCCE) は、OSI 基本参照モデルのアプリケーション層に位置するエンティティで、下位層のサービスを用いてタイムクリティカル通信機能を提供する。

タイムクリティカル通信機能の基本は、アプリケーションから受け取ったデータを指定された時間内に転送するというタイムクリティカル性であり、TCCAではこのタイムクリティカル性を定量的に表現するためにタイムウィンドウという概念を定義している。タイムウィンドウは、「アプリケーションに依存し、開始時刻と要求時間、または開始時刻と終了時刻によって定まる時間間隔。時間の精度はインプリメントに依存する。」として定義され、次の3種類がある (図2参照)。

- ① TW_W : データ転送を要求した TCCE からそのデータを受信する TCCE までのデータ転送に要する時間への制約を表すタイムウィンドウ。
- ② TW_R : データ転送を要求した TCCE がそのデータを受信した TCCE より応答を受けるまでに要する時間への制約を表すタイムウィンドウ。
- ③ TW_T : 一連のデータ転送から成るタイムクリティカル通信トランザクションに要する時間への制約を表すタイムウィンドウ。

なお、タイムクリティカル通信を利用するアプリケーションはデータがタイムウィンドウを満たすこと

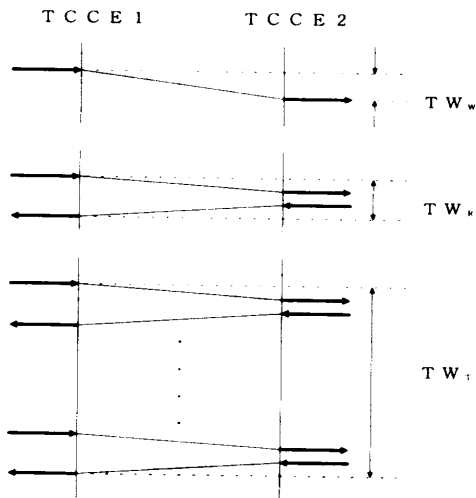


図2 タイムウィンドウの種類
Fig. 2 3 Types of time windows.

を前提に動作しており、タイムウィンドウの超過は誤動作を引き起こす危険がある。そこで超過時の対策処理（トラヒック入量の抑制、優先度変更など）を可能とするために、タイムウィンドウの超過を可能な限り事前に検出してアプリケーションへ通知できることがタイムクリティカル通信アーキテクチャとしてのシステム要件となっている。

本論文では、タイムクリティカル通信の要求が強い LAN において、最も基本的な TW_w がシステムにおいて一義的に決定される場合、これを保証するタイムクリティカル通信プロトコルを実現するため、データ圧縮による効果がネットワークのトラヒック量に対してどのように関係し、効果があるかを示すものである。

2.2 タイムクリティカル通信プロトコルの課題

まず、制御用通信に用いられている Timed Token Protocol (TTP) について考える。

この TTP は、MAC 層でのデータ転送を一定時間内に抑えることが可能なプロトコルとして、ISO の LAN 標準に採用され、IEEE802.4 トークンバス³⁾ といった LAN などで用いられているトークンパッシング方式の MAC プロトコルである。このプロトコルは、トークンをノード間で巡回させて、トークンを持っているノードのみをデータ送信可能とするものである。TTP では時間的制約の強いデータである同期データと、それ以外の非同期データという 2 種類のデータを扱うことができ、トークンが一周する間に同期データの転送に必要な時間をあらかじめ各 LAN ノードに目標トークン保持時間 (Target Token Holding Time: TTHT) として割り当て、この TTHT と LAN ノード数から求まる目標トークン巡回時間 (Target Token

Rotation Time: TTRT) より非同期データの転送量を定められる範囲内に抑えることで、トークン巡回の定時性を保証している。

TTP は、トークン巡回間隔（すなわち同期データが LAN 媒体へ転送可能となる契機）を保証できるので、タイムクリティカル性を要するデータ（タイムクリティカルデータ、TC データ）を TTP の同期データとして転送することが考えられる。しかしながら、タイムクリティカル通信のシステム要件を考慮すると、TTP には次のような問題点がある。

- TTHT や TTRT は LAN 初期化時にパラメータ値が固定的に定まるため、TC データごとに MAC 副層以下のデータ転送遅延を予測かつ制御できない。すなわち、TC データのトラヒックが動的に変動したりトラヒックパターンがあらかじめ予測できない場合には、適用不能となる。
- TC データがタイムウィンドウを超過して送信されてもアプリケーションで認識できない。
- LAN 媒体への転送待ち中にタイムウィンドウを超過した TC データも転送されてしまうため、LAN の有効帯域利用率の低下を招く。

上記の TTP の問題点を解決するために、筆者らは高負荷時の性能低下を防ぎ、かつタイムクリティカル通信に対応するためのプロトコルとして、TTP に次の通信メカニズムを導入した¹¹⁾。

①各ノードに送信要求待ちとして発生している TC データの数をブロードキャスト機能により相互に通知する。

②各ノードの TC データの送信要求数から指定されたタイムウィンドウ内に転送できるかを決定し、タイムウィンドウを超える TC データの送信要求を廃棄し、アプリケーションにその旨を通知する。

以上のようにタイムウィンドウを超える TC データの送信抑制メカニズムの導入によりタイムクリティカル通信アーキテクチャのシステム要件を基本的に満たすものであるが、ネットワークへの入力トラヒック量が一時的に伝送帯域（たとえばトークンバスでは 10 Mbps）を超えて発生する場合に指定されたタイムウィンドウ内に TC データの転送が成功したことを示す有効データ率が 70% 以下となることがあり、ダイナミックなトラヒック負荷に対して TC データの転送に対する有効データ率を高めるための通信メカニズムの改良が要求されている。

表1 タイムクリティカル通信対応 MAC サービスプリミティブ
Table 1 MAC service primitives of time critical communication.

サービス	プリミティブ	パラメータ
データ転送	MA-UNITDATA. request MA-UNITDATA. indication	宛先アドレス, 発信元アドレス, TC 指定, タイムウィンドウ, 利用者データ, 他
タイムクリティカルデータ送信確認	MA-TC-UNITDATA. indication	TC 送信結果

(注) TCCP/DCにおいて追加したプリミティブ/パラメータには下線を付した。

3. タイムクリティカル通信プロトコルへのデータ圧縮の導入

3.1 基本設計方針

2章で述べた問題点を解決するため、次のような基本設計方針を設定する。

(1) 既提案のタイムクリティカル通信プロトコルの拡張による LAN 帯域消費の抑制

筆者らが提案したタイムクリティカル通信プロトコルの通信メカニズムに加えて、TC データの圧縮機能を導入し、LAN へのトラフィック入量を抑制する。

なお、非タイムクリティカルデータについてはファイル情報なども含まれデータ圧縮時間が大きくなるためこのプロトコルで実施する圧縮の対象としない。

(2) タイムウィンドウ超過データの検出

TC データの送信待ち時間を有効に活用してデータ圧縮を実施し、かつ TC データ圧縮による伝送時間の短縮を考慮したタイムウィンドウ超過の検出を行い、TC データの有効データ率を高める。

3.2 通信モデルとプロトコル基本動作定義

3.2.1 通信モデル

本論文で提案するプロトコルをデータ圧縮付タイムクリティカル通信プロトコル (Time Critical Communication protocol with Data Compression: TCCP/DC) と呼ぶ。

この TCCP/DC は、LAN の MAC 副層において MAC エンティティによって実行され、この MAC エンティティと高位に位置する TCCE の間で、タイムウィンドウなどタイムクリティカル通信特有のパラメータを受け渡す必要がある。これらのパラメータを含むように ISO の MAC 副層サービスを拡張したプリミティブ/パラメータ例を表 1 に示す。また、表 1 の MAC サービスプリミティブに対応したプリミティブシーケンス例を図 3 に示す。

TCCP/DC を実行する各ノードは、トークンパッシング伝送方式に基づく LAN に接続され、TCCE と MAC エンティティ間に次のキューを持ち、その通信モデルを図 4 に示す。

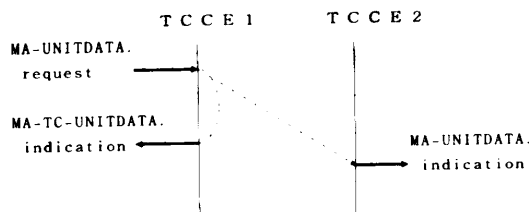


図3 タイムクリティカル通信対応 MAC サービスプリミティブシーケンス

Fig. 3 MAC service primitive sequence on time critical communication.

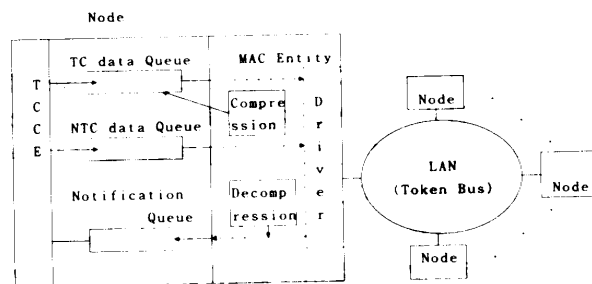


図4 通信モデル

Fig. 4 The Time Critical Communication model with data compression.

(1) 送信キュー

- タイムクリティカル送信キュー (TC 送信キュー): タイムウィンドウを指定された TC データの送信用キュー
- 非タイムクリティカル送信キュー (NTC 送信キュー): 非タイムクリティカルデータ (NTC データ) の送信用キュー

(2) 通知キュー

受信した TC データと NTC データ、および送信できなかった TC データの TCCE への通知用キュー

3.2.2 プロトコル基本動作定義

ここでは、本論文で提案する TCCP/DC のプロトコルの基本動作を定義する。

(1) TC 送信キュー状況の通知

各ノードは TC または NTC データを送信後、ブロードキャストにて他のノードに TC 送信キューにあ

る TC データ数と各 TC データ長とデータ圧縮/非圧縮を伝える。

(2) 他ノードのトークン保持時間と自ノードへのトークン到着待ち時間の推定

① 他ノードからブロードキャストにより通知を受けた TC 送信キュー状況から、そのノードのトークン保持時間 (TS) を算出する。

- 各 TC データの伝送時間 (Tx) を算出し、その合計値 (ΣTx) が、TTHT 未満であればその合計値を、TTHT 以上であれば TTHT をそのノードの TS とする。

$$TS = \Sigma Tx : \Sigma Tx < TTHT \text{ の場合}$$

$$TTHT : \Sigma Tx \geq TTHT \text{ の場合}$$

なお、 $Tx = TCDL \cdot R/S$

TCDL : TC データ長 (bit),

R : データ圧縮率,

S : LAN の伝送速度 (bit/sec)

② 他ノードからのブロードキャスト通知により自ノードにトークンが到着するまでの時間 (Ttw) を算出する。

- ブロードキャストを送信したノード (Nc) から自ノード (Na) の間にあるノードのトークン保有時間 (上記①の算出結果に基づく) の和を算出する。

$$Ttw = \Sigma Tsi \quad (i = c + 1 \sim a - 1)$$

(3) TC データ送信要求の受理による TC データの送信可能の判定

① 受理した TC データの自ノードの TC 送信キュー上での待ち時間 (Tqw) の算出する。

- 自ノードの TC 送信キュー上にある TC データ ($1 \sim n$) からトークンが到着後この TC データ送信要求が送信できるまでの時間を Tqw とする。

$$Tqw = \Sigma Txi \quad (i = 1 \sim n)$$

② データ圧縮の可否の判定

- 圧縮処理時間 (Tc) が送信待ち時間 ($Tq = Ttw + Tqw$) 以内で、かつ指定されたタイムウィンドウ (TW) 以内に TC データ送信が終了する場合 ($TW \geq Tq + Tx + Td$) に、この TC データを圧縮する。

圧縮処理時間 (Tc) および伸長処理時間 (Td) は TC データ長およびデータ圧縮率により決定されるが、ここでは下記に示す市販の LSI の処理能力¹³⁾を前提とする。

(a) 1/2 圧縮:

データ圧縮処理能力=2.5 Mbyte/sec

データ伸長処理能力=6.0 Mbyte/sec

(b) 1/n 圧縮:

1/2 圧縮処理能力の 1/n となる。

③ タイムウィンドウを超えた TC データの廃棄

- 上記②で圧縮しない場合について、指定されたタイムウィンドウ (TW) 以内に TC データの送信が終了するかを調べ、超えた場合 ($TW < Tq + Tx$) は廃棄し、その結果を要求元に通知する。
- 上記②, ③以外の場合 ($Tq + Tx \leq TW < Tq + Tx + Td$) は、TC データを圧縮せず送信する。

(4) トークン受理によるデータ送信処理

① TC 送信キューの TC データを前回トークンを次に渡した時間から TTRT 経過以内またはなくなるまで送信する。

② TTRT 経過以内に TC 送信キューがなくなれば、NTC 送信キューの NTC データを TTRT 経過以内まで送信する。

③ 上記送信が終了した場合に、ブロードキャストにて TC 送信キューの状況を通知する ((1) を参照)。

(5) データ受信処理

データを受信し、その中で TC データが圧縮されている場合には伸長処理を行い、データ受信通知を行う。

4. 近似式とシミュレーション評価

前章で述べたデータ圧縮付タイムクリティカル通信プロトコル (TCCP/DC) の大まかな振舞いを明らかにするために、指定されたタイムウィンドウ内に転送できる割合を表す有効データ率を算出するための近似式を導出し、またその近似式の有効性およびネットワークトラフィックに対するデータ圧縮がどのように効果があるかをシミュレーションにより評価し、その結果を述べる。

ここでの近似式およびシミュレーションでは、データ圧縮を行わない場合を含め、データ圧縮率とタイムクリティカル特性との関係について IEEE802.4 トークンバスに適用し、解析する。

4.1 近似式の導出

4.1.1 前提条件

ここで求める有効データ率の近似式は、次の前提に基づいている。

- 提案するプロトコルの振舞いを明らかにするために、ノードの特性に注目する。
- 発生する TC データ送信要求は、ノードに対して一定間隔で到着とする。

- ③ トークンバス接続されるすべてのノードの特性は均一である。
- ④ トークン伝送時間およびノード内での処理時間は無視する。
- ⑤ データ圧縮処理は送信待ち時間内のできるものとする。
- ⑥ 送信キュー長は無限とする。

4.1.2 導 出

ここで導出する近似式は、データ圧縮率とタイムクリティカル特性との関係を明らかにするために、到着した指定されたタイムウィンドウ値 (TW) 内に TC データが転送できる割合を表す有効データ率 (E) を示すものである。

ここでは、タイムウィンドウ値内に転送できる最大 TC データ数 (λ_{max}) と平均到着 TC データ送信要求数 (λ) から、E は次のように与えられる。

- (i) $\lambda \leq \lambda_{max}$ のとき、 $E = \lambda/\lambda_{max} = 1$ (到着 TC データはすべて転送できるため)
- (ii) $\lambda > \lambda_{max}$ のとき、 $E = \lambda_{max}/\lambda$ (λ_{max} を超える TC データは廃棄されるため)

上記 E を求めるために、平均到着 TC データ送信要求数 (λ) とタイムウィンドウ値内に転送できる最大 TC データ数 (λ_{max}) を考える。

(1) 平均到着 TC データ送信要求数 (λ)

ここで到着する TC データ長を TCDL (bit) とし、 λ はパラメータとして与えられる。

(2) タイムウィンドウ値内に転送できる最大 TC データ数 (λ_{max})

ノードの伝送能力を考える場合、指定されたタイムウィンドウ値と TTRT 時間の比較で場合分けする。

① $TW \geq TTRT$ の場合

この場合、トークンはかならず TW 内に到着するため、TTRT 時間内にそのノードに到着した TC データとブロードキャストを TTHT 時間内に伝送できるならば到着した TC データの廃棄は発生しない (図 5 参照)。LAN の伝送速度 (S: bit/s)、データ圧縮率 (R)、ノード数 (N)、ブロードキャストデータ長 (BCDL: bit) から、次のようになる。

$$TTRT \cdot \lambda \cdot TCDL \cdot R/S + BCDL/S \leq TTHT$$

$$TTRT = N \cdot TTHT$$

ここで上記の式を満たす λ の最大値は最大 TC データ数 (λ_{max}) となり、 λ_{max} は次の式で与えられる。

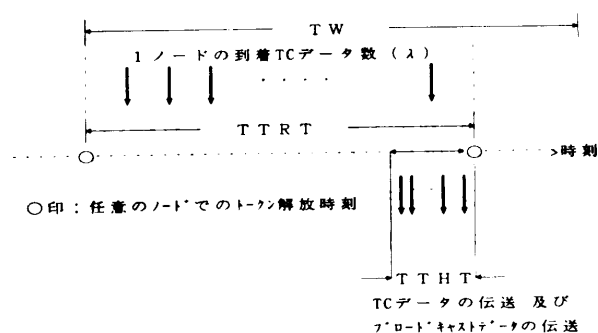


図 5 $TW \geq TTRT$ のときの到着 TC データと伝送
Fig. 5 Arrival TC data and its transmission when $TW \geq TTRT$.

$$\lambda_{max} = \frac{S(TTHT - BCDL/S)}{(N \cdot TTHT \cdot TCDL \cdot R)} \quad (1)$$

② $TW < TTRT$ の場合

この場合、TW 時間内に全ノードに到着する TC データと全ノード分のブロードキャストを伝送する時間とデータ圧縮を行った場合に必要となるデータ伸長処理時間 (Td : sec) の和が TW 以内であれば、到着する TC データの廃棄は発生しないことになり、次の式で表される。

$$\frac{N(TW \cdot \lambda \cdot TCDL \cdot R + BCDL)}{S} + Td \leq TW$$

ただし、 $R = 1$ のとき $Td = 0$

ここで上記の式を満たす λ の最大値は最大 TC データ数 (λ_{max}) となり、 λ_{max} は次の式で与えられる。

$$\lambda_{max} = \frac{(S(TW - Td)/N - BCDL)}{(TW \cdot TCDL \cdot R)} \quad (2)$$

(3) TC 送信キュー長の平均値 (Lq)

上記 (1)(2) からトークンがノードに到着し、伝送できる TC データ数となるため、トークンが LAN を一周する時間に到着する数として次のように求められる。

① $TW \geq TTRT$ の場合

$$Lq = N \cdot TTHT \cdot \lambda \quad (3)$$

② $TW < TTRT$ の場合

$$Lq = TW \cdot \lambda \quad (4)$$

4.2 シミュレーションモデル

LAN を介して複数のノードが、それぞれのノード内で発生したデータを転送しあう TCCP/DC の機構を模擬するもので、ノード間の伝送遅延は同一としている。

入力トラヒックは各ノード均一にポアソン到着する

ものとしている。各ノードは発生したデータを100個まで蓄積できる2つの送信キュー、すなわちTC送信キューとNTC送信キューを備える。

TCCP/DCのシミュレーションにおいて、キュー長の最大値を超えたTCデータ/NTCデータおよびタイムウィンドウを超えたTCデータは送信キューから取り除かれ廃棄されるが、それに要する時間は無視する。

シミュレーションプログラムはC言語により記述し、simpack¹²⁾というシミュレーションツールを用いる。シミュレーションの実行にはSun OS 4.1.2を搭載したSun SPARCstation IPCを使用した。

4.3 評価特性とシミュレーションパラメータ

本シミュレーションではTCCP/DCによるタイムクリティカル通信の以下に示す通信特性について議論する。

- (1) 過大なTCデータ到着のタイムクリティカル性への影響
- (2) ノード数のタイムクリティカル性への影響
- (3) タイムウィンドウ幅のタイムクリティカル性への影響
- (4) 非タイムクリティカルデータの混在がタイムクリティカル性に及ぼす影響

表2に上記の特性(a)~(d)それぞれを評価するためのシミュレーションパラメータを示す。

データ圧縮率として、0.3, 0.5, 1.0について行い、データ圧縮率1.0は非圧縮を意味する。データ圧縮処理と伸長処理の時間は現在入手可能なLSI¹³⁾の性能に基づき表2(d)とする。

(1)の評価においてのみ、輻輳を発生させるため、図6に示すように全40秒間のシミュレーション中5~10秒と20~25秒の計10秒間の平均到着TCデータ数を伝送速度(10 Mbps)の2倍に相当するトラフィック量をノード数(16)で分配したものとし、それ以外の区間では平均到着TCデータ数は可変パラメータとする到着パターンを用いてシミュレーションを実施する。

なお、その他の評価における平均到着データ数は可変パラメータとして全区間同じものを用いる。

また、(1)の評価においては到着したTCデータを送信待ち時間に関係なくすべて圧縮する場合(3.2.2項の(3)②)のデータ圧縮の可否の判定を行わないで、すべてデータ圧縮を行い、③のタイムウィンドウを超えたTCデータの廃棄では圧縮処理時間、伸長処理時間、送信待ち時間および伝送時間の総和が指定されたタイムウィンドウを超えたものを廃棄する)につい

表2 シミュレーションパラメータ
Table 2 Simulation parameters.

(a) デフォルト値

LANの伝送速度	10 Mbps
ノード数	16
TCデータ発生率	1
タイムウィンドウ	10 ms
TTHT	2.5 ms
データ長	1000 bytes
ブロードキャスト長	100 bytes

(b) 評価特性ごとの値

特性	シミュレーション条件
(a) 過大なTCデータ入量のタイムクリティカル性への影響	LANの伝送速度:10 Mbps 入力トラフィック量の変動パターンによる輻輳の発生
(b) 輻輳後におけるTC送信キュー長の変化	(a)と同様
(c) ノード数のタイムクリティカル性への影響	ノード数:16, 32
(d) タイムウィンドウ幅のタイムクリティカル性への影響	タイムウィンドウ:10, 80, 160 ms
(e) 非タイムクリティカルデータの混在がタイムクリティカル性に及ぼす影響	入力トラフィック内にTCデータが占める割合:0.5, 0.75, 1.0

(c) ノード数とTTRTの関係

ノード数	TTRT
16	40 ms
32	80 ms

(d) データ圧縮率と1000バイトの処理時間

データ圧縮率	圧縮処理時間	伸長処理時間
0.3	1.33 ms	0.56 ms
0.5	0.40 ms	0.17 ms
1.0	0	0

てもシミュレーションを実施する。

(2)においてはTTHTを一定に保つため、表2(c)のようにノード数に対応してTTRTの値を変化させる。

4.4 シミュレーション結果と評価

4.4.1 シミュレーション結果

(1) 過大なTCデータ到着のタイムクリティカル性への影響

図7(a)は、輻輳の起きる条件下で、平均到着TCデータ数(輻輳期間中の平均到着TCデータ数は固定)に対しタイムウィンドウ(10 ms)内に転送されたTCデータの割合(有効データ率)を表している。

圧縮率0.3では、平均到着TCデータ数にかかわらず有効データ率が100%となり、圧縮率0.5では全般的に90%以上を保っている。一方、すべてのTCデータを圧縮した場合(最後にallと表示)、圧縮率0.3では全般的に有効データ率が92%となり、圧縮率0.5では約80%強である。

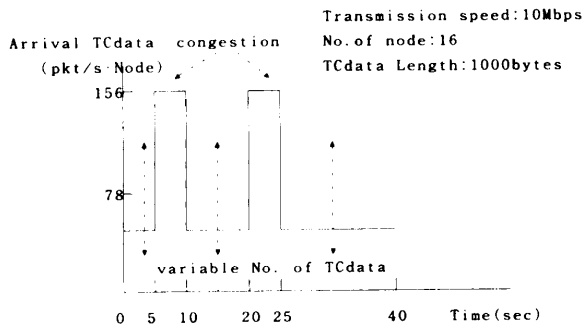


図6 ノードの到着TCデータ数の変動パターン
Fig. 6 Pattern of arrival TC data at node.

また、圧縮率 1.0 (非圧縮) では平均到着 TC データ数が 78 (ノード数 16, TC データ長 1000 バイトのときの伝送速度 10 Mbps のトラフィックに相当する) に近づくとも有効データ率が 70% 以下に低下する。このことから、全般的にも、また輻輳が激しくまた長期に及ぶほど、データ圧縮の効果が顕著に見られ、かつ、単純にすべてのデータを圧縮するのではなく、本提案の送信待ち時間を利用したデータ圧縮方式が効果的であることがいえる。

(2) ノード数のタイムクリティカル性への影響

図 7(b) は、ノード数を変化させたときの平均到着 TC データ数に対する有効データ率を表している。

圧縮率 0.3 および 0.5 ではノード数が 16, 32 において平均到着 TC データ数 (≤ 78) にかかわらず有効データ率が 100% である。

一方、圧縮率 1.0 (非圧縮) の場合は平均到着 TC データ数が 78 を超えると、有効データ率は 85% 以下に大きく低下する。

以上のことから LAN の伝送容量を超える平均到着 TC データ数においてデータ圧縮の有効性が示されており、特にタイムクリティカルシステムの標準的な上限として考えられているノード数 32 以内であれば有効データ率がほぼ 100% 保証され、実システムへの適用が期待できる。

(3) タイムウィンドウ幅のタイムクリティカル性への影響

図 7(c) は、タイムウィンドウ幅を変化させたときの平均到着 TC データ数に対する有効データ率を表している。

圧縮率 0.3 および 0.5 では、すべてのタイムウィンドウ値 (10~160 ms) において平均到着 TC データ数 (≤ 78) にかかわらず有効データ率 100% を示している。

一方、圧縮率 1.0 (非圧縮) の場合ではタイムウイ

ンドウ幅が小さくなるにともない、有効データ率は約 90% まで低下する。しかし、タイムウィンドウ幅が大きいところ (80 ms, 160 ms) では、有効データ率の変化は小さくなり、特に平均到着 TC データ数が約 60 以下ではほとんど差は認められない。

このことからデータ圧縮を行う場合には、輻輳を含めいろいろなタイムウィンドウ幅をサポートできると考えられる。

(4) 非タイムクリティカルデータの混在がタイムクリティカル性に及ぼす影響

図 7(d) は、平均到着データに NTC データが含まれるときの各 TC データ率 (TC データ数/(TC データ数 + NTC データ数)) における有効データ率を表している。

図 7(d) より、圧縮率 0.3 および 0.5 の場合、TC データの割合が 50% 以上であれば輻輳状態においても有効データ率は 95% 以上を示し、圧縮率 1.0 (非圧縮) の場合に比べて有効データ率は高く、この点についてもデータ圧縮の有意性が示される。一般に、平均到着データ数に占める TC データの割合が大きくなるほど、有効データ率が高くなるのが分かる。ただしこのシミュレーションでは、発生する総データ数を変化させずに TC データ数の発生率だけを変化させているため、TC データ数の発生率が大きくなるほど廃棄された TC データの絶対数は多くなっている。

4.4.2 シミュレーションパラメータの影響

(1) 輻輳のパターン

本シミュレーションでは輻輳時の性能を評価するために単純なパターン (図 6) を用いているが、以下で考察するようにより複雑なパターンを持つ輻輳についてもこの結果が当てはまる。

① すべてのノードが同時に輻輳するのではなく特定ノードのみ輻輳する場合がある。

この場合、輻輳ノードが LAN 帯域の大部分を使用するためトークン巡回時間は TTRT に近づき、かつ転送できなかったデータは TC 送信キューに保持されるので、おおよその傾向は本シミュレーション結果と同じになると考えられる。

② 輻輳の発生間隔や輻輳時の到着数はさまざまであり、特に上位プロトコルの再送により短い間隔において何度も輻輳が再発することも考えられる。TCCP/DC では、タイムウィンドウ超過データの廃棄が有効に作用して常に一定数の TC データが転送されるので、輻輳パターンが変化しても本シミュレーション結果がおおむね通用すると考えられる。

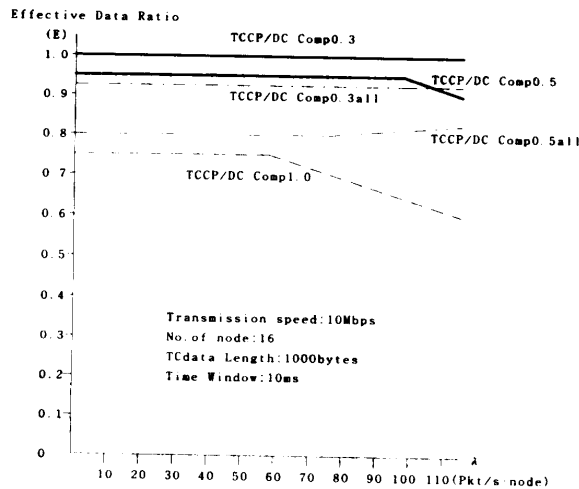


図 7 (a) 過大な TC データ到着の影響
Fig. 7 (a) Effect of excessive TC data arrival.

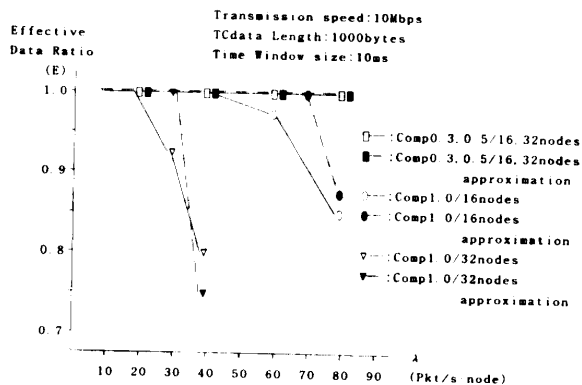


図 7 (b) ノード数の影響
Fig. 7 (b) Effect of number of nodes.

(2) ノード数の影響

4.4.1 項の (2) で述べたようにデータ圧縮を行う場合ノード数が 32 以内において有効データ率はほぼ 100%である。この時のタイムウィンドウ値が 10 ms の最も厳しい条件であることから、(3)、(4) ではノード数が 16 の場合で代表させてタイムウィンドウ幅やタイムクリティカルデータの割合の影響を論じているが、ノード数 32 の場合においても同様な特性が期待できると考えられる。

(3) データ圧縮率

本シミュレーションでは、圧縮率を 0.3, 0.5 および 1.0 (非圧縮) について評価し、その結果すべての点で圧縮を行う場合の有効性が示された。また、すべての TC データを圧縮する場合に比べても本提案の送信待ち時間を有効に活用する方式が有効データ率で 8~15%良い結果が得られ、本提案の有効性が示された。

データ圧縮率は対象となるデータの属性に依存する

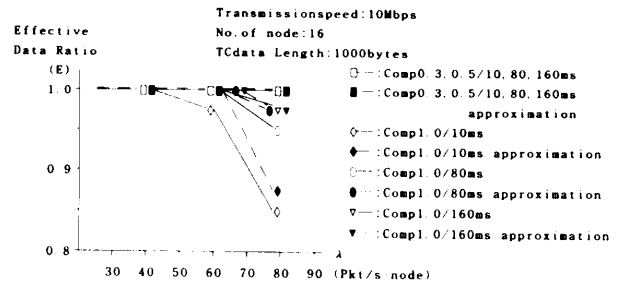


図 7 (c) タイムウィンドウ幅の影響
Fig. 7 (c) Effect of time window size.

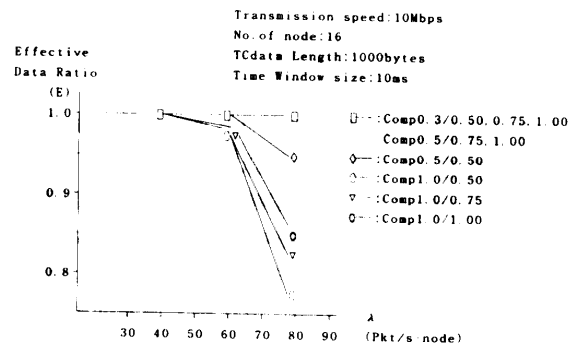


図 7 (d) タイムクリティカルデータ発生率の影響
Fig. 7 (d) Effect of time critical data ratio.

が、Lempel-Ziv 方式の LSI によりプログラムやテキストのデータを平均して 1/2~1/3 の圧縮が可能であり、実用システムへの適用が期待できる。

4.4.3 近似式とシミュレーション結果

ここでは、4.1 節で導出した近似式の妥当性をシミュレーション結果により確認する。なお、パラメータについてはシミュレーションと同じように表 2 の値を用いる。下記に述べるように導出した近似式はほぼシミュレーション結果と一致しており、大まかな性能特性を把握することができ、システムの構想設計などには利用できると考えられる。

(1) ノード数のタイムクリティカル性への影響

タイムウィンドウ値 10 ms であることから、 λ_{max} は近似式 (2) から求められ、 E と λ の関係を図 7 (b) に示す。

圧縮率 0.3 および 0.5 ではノード数にかかわらずシミュレーション結果と一致する。圧縮率 1.0 では近似式の値とシミュレーション結果とは一致していないがほぼその特性を示しているといえる。

(2) タイムウィンドウ幅のタイムクリティカル性への影響

ノード数 16 において、タイムウィンドウ値 10 ms の場合は近似式 (2) から、タイムウィンドウ値 80 ms

および 160 ms の場合は近似式 (1) から求められ、 E と λ の関係を図 7(c) に示す。

圧縮率 0.3 および 0.5 ではタイムウィンドウ値にかかわらずシミュレーション結果と一致する。圧縮率 1.0 では、タイムウィンドウ値 10 ms は上記 (1) と同様であり、タイムウィンドウ値 80 ms および 160 ms では近似式の値とシミュレーション結果とはほぼ一致している。

(3) TC 送信キュー長

近似式 (3), (4) から、LAN の伝送容量 10 Mbps に相当する平均到着 TC データ数で考えると、16 ノードのとき $\lambda = 78$ から $Lq = 50$, 32 ノードのとき $\lambda = 39$ から $Lq = 100$ となり、ここで実施したシミュレーションとしてキュー長 100 は妥当である。

4.4.4 総合評価

従来のタイムクリティカル通信プロトコルでは対処できなかった伝送帯域を越える輻輳時の動的トラヒック変動に対してデータ圧縮機能を導入した TCCP/DC の特性を明らかにするため、近似式の導出および一定の輻輳パターンを用いてシミュレーションを行った。

データを圧縮する場合、タイムウィンドウ内に正しく送信される TC データの割合は、データ圧縮しない場合に比べて大幅に増加し、輻輳時の性能は改善されている。また、有効データ率は到着数の変化に対して安定的に 100~90% を維持し、平均到着数が LAN の伝送容量に相当する値の近傍においても性能の悪化は見られない。

これらの評価をまとめると、データ圧縮を行うタイムクリティカル通信プロトコルの特長として次の点があげられる。

- 輻輳の有無にかかわらずにタイムクリティカルデータをタイムウィンドウを満足させつつ転送できる。
- 到着データ数が過大な場合でも、ノード数、タイムウィンドウ値、TC データの割合などにタイムクリティカル性が影響されることなく安定的に高有効データ率を維持できる。

5. む す び

本論文では、高負荷時の性能低下を防ぎ、かつタイムクリティカル通信に適したプロトコルとして、IEEE802.4 トークンバスに使用されている Timed Token Protocol を基本にしてデータ圧縮機能などの独自のアルゴリズムを追加したプロトコルを提案し、性能特性を近似式の導出に加えてシミュレーションによって解析し、その有効性を示した。

データ圧縮を行わない場合のタイムクリティカル通信プロトコルでは、高負荷時タイムウィンドウ以内に転送できる有効データ率の低下は避けられない。

一方、データ圧縮を行う場合ではネットワークに流入するトラヒック量を効果的に抑制することが可能となり、タイムクリティカルデータに対する有効な帯域を確保し続け、タイムクリティカル通信を継続できることが示された。すなわち、データ圧縮機能を備えたタイムクリティカルプロトコルは、トラヒックの急激な増大などの影響を直接的に受けないため、トラヒック変動に対する安定性がきわめて高いといえる。

以上の評価結果をふまえて、今後はタイムウィンドウ幅にデータ送受信とその応答まで含めたときのタイムクリティカル性を評価を行う予定である。さらに、本論文で提案したプロトコルはネットワークとしてトークンバスを前提としていたが、数 M ビット/秒以上の伝送速度を有する高速デジタル専用線やフレームリレーなどを利用した広域網、さらには LAN とこれらの広域網を相互接続したシステムにおいてもタイムクリティカル通信への適用を検討するつもりである。

参 考 文 献

- 1) ISO/TC184/SC5/WG2 N292: Draft Technical Report: Identifying User Requirements for Systems Supporting Time-critical Communication (1992).
- 2) ISO9314: Fiber Distributed Data Interface
- 3) IEEE802.4: Token Passing Bus
- 4) Johnson, M.J.: Proof that Timing Requirements of the FDDI Token Ring Protocol Are Satisfied, *IEEE Trans. Commun.*, Vol.COM-35, No.6, pp.620-625 (1987).
- 5) Sevcik, K.C. and Johnson, M.J.: Cycle Time Properties of the FDDI Token Ring Protocol, *IEEE Trans. Softw. Eng.*, Vol.SE-13, No.3, pp.376-385 (1987).
- 6) Agrawal, G., Chen, B., Zhao, W. and Dabari, S.: Guaranteeing Synchronous Message Deadlines with the Timed Token Protocol, *Proc. IEEE International Conference on Distributed Computing System*, pp.468-475 (Jun. 1992).
- 7) Valenzano, A., Montuschi, P. and Ciminiera, L.: Some Properties of Timed Token Medium Access Protocols, *IEEE Trans. Softw. Eng.*, Vol.SE-16, No.8, pp.858-869 (1990).
- 8) Pang, J.W.M. and Tobagi, F.A.: Throughput Analysis of a Timer Controlled Token Passing Protocol under Heavy Load, *IEEE Trans. Commun.*, Vol.COM-37, No.7, pp.694-702 (1989).
- 9) Agrawal, G., Chen, B. and Zho, W.: Lo-

cal Synchronous Capacity Allocation Schemes for Guaranteeing Message Deadlines with Timed Token Protocol, *Proc. IEEE Conference on Computer Communication, INFOCOM '93* (Mar. 1993).

- 10) Kamat, S., Malcolm, N. and Zho, W.: Performance Evaluation of Bandwidth Allocation Scheme for Guaranteeing Synchronous Messages with Arbitrary Deadlines in an FDDI Network, *Proc. Real-time Systems Symposium* (Dec. 1993)
- 11) 厚井裕司, 妹尾尚一郎, 高田佳典, 井手口哲夫, 石坂充弘: LANにおけるタイムクリティカル通信プロトコルの提案の評価, *信学論 (B-I), Vol.J76-BI, No.11, pp.882-891 (1993)*.
- 12) MacDougall, M.H.: *Simulating Computer Systems*, MIT Press, Cambridge (1987).
- 13) STAC社: Stac 9706 Data Compression Coprocessor, PRS-0025 Revision 1.1 (1993).
- 14) 井手口哲夫, 小高一紀, 厚井裕司: MAP 下位層通信ボードの試作とその性能評価, *電学論, Vol.112-C, No.3, pp.172-179 (1992)*.
- 15) 岡崎直宣, 舟辺千江子ほか: 広域網接続用データ圧縮装置の試作と評価, 第51回情報処理学会全国大会論文集, Vol.3F-10, pp.1-179 (1995).
- 16) 中野宣政, 太田賢, 渡辺尚, 水野忠則: 分散TCCA実現のためのグループ管理機能, *情報処理学会グループウェア研究会報告, 94-GW-7 (1994)*.

(平成8年4月1日受付)

(平成8年9月12日採録)



井手口哲夫 (正会員)

1972年電気通信大学電気通信学部通信工学科卒業, 同年三菱電機(株)入社。以来, ネットワークアーキテクチャ, LAN, ネットワーク管理方式, 通信プロトコル設計などの研究開発に従事。1992年三菱電機情報ネットワーク(株)にてLAN関連技術および事業化推進に従事。現在, 三菱電機(株)情報技術総合研究所勤務。工学博士。電子情報通信学会会員。



野口 正一 (正会員)

1954年東北大学工学部電気工学科卒業。1960年同大学大学院博士課程修了。工学博士。1971年同大学電気通信研究所教授。1990年応用情報学研究センター長。1993年日本大学工学部教授。主として情報システム構成論, 知識処理に関する研究に従事。著書「ネットワークの理論」(岩波), 「知識工学基礎論」(オーム社)など。電子情報通信学会名誉会員, 日本ソフトウェア科学会, 人工知能学会各会員。



厚井 裕司 (正会員)

1970年東京理科大学理学部応用物理学科卒業。同年三菱電機(株)入社。以来, ネットワークアーキテクチャ, LAN, ネットワークセキュリティなどの研究開発に従事。現在同社情報技術総合研究所に勤務。電子情報通信学会会員。



永島 規充

1991年明治大学工学部電気工学科卒業。同年三菱電機(株)入社。現在, 同社情報技術総合研究所にてLAN, ネットワークセキュリティなどの研究開発に従事。



渡邊 晃 (正会員)

1974年慶応大学電気工学科卒業。1976年同大学大学院修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。現在, 同社情報技術総合研究所にてLAN, ネットワークセキュリティなどの研究開発に従事。電子情報通信学会会員。



妹尾尚一郎 (正会員)

1981年東京工業大学理学部応用物理学科卒業。1983年同大学大学院修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。現在, 同社情報技術総合研究所にてLAN, 網間接続, 電子メールなどの研究開発に従事。