

Switched Ethernet における分散実時間制御のための QoS

兵頭 和樹[†] 田胡 和哉[†]
小森 翔太[†] 松下 温[†]

近年、ロボットや自動車などの分野で制御技術の発展が著しい。これらの機械系は、多数のアクチュエータやセンサを、個々に実時間制御する必要があり、複数のプロセッサで実現される。また、配線等の理由で分散構成をとることが望ましい。一方、全体姿勢の制御や学習による最適化処理など、多数のモジュールの状況を総合して判断を下す必要がある。したがって、制御系全体では、きわめて複雑な実時間分散処理系が構成される。本稿では、ネットワークを介して接続された多数のモジュールが連携して全体制御を行う分散実時間制御システムを対象に、モジュール間で行われる通信の要求事項を考察した。また、それらを満たす通信サービスを提供する、分散実時間制御のための QoS を Switched Ethernet 上で実現する方式を検討した。

QoS for Distributed Real-time Control on Switched-Ethernet

KAZUKI HYODOU,[†] KAZUYA TAGO,[†] SHOTA KOMORI[†]
and YUTAKA MATSUSHITA[†]

A new approach guarantee the Quality of Service communication for distributed real-time control systems on switched-ethernet network is proposed in this paper. Controlling complicated mechanical systems such as humanoid robots, for instance, are equipped with number of actuators and sensors, and these components are connected to local processors to attain better response and simpler physical structure. On the other hand, controlling these mechanical systems requires globally integrated operation over all actuators, and this leads to need of new basis for building the distributed control system and its communication mechanism. We design a new communication layer to guarantee the Quality of Service for distributed real-time control systems.

1. はじめに

近年、ロボット、自動車、工作用機械等の分野において制御技術の発展が著しい。たとえば、2足歩行ロボットも多数製作され、歩行制御に関する見も蓄積されつつある。これらの機械系は、多数のアクチュエータやセンサを持つこと、それら個々の制御に実時間性が要求されることなどにより複数のプロセッサで実現される必要がある。また、配線などの物理的制約から、少数の制御装置による集中的な制御方法ではなく、制御装置とセンサやアクチュエータを1つのモジュールとし、それら個々のモジュールがネットワークによって結合された分散構成をとることが望ましい。これにより、各モジュール間は一般

的なネットワークケーブルのみで接続でき、配線の簡略化およびインタフェースの統一などが可能となる。一方において、ロボットの全体姿勢の制御や、学習による最適化処理では、多数のアクチュエータの状況やセンサの入力を総合して判断を下す必要がある。したがって、制御系全体では、きわめて複雑な実時間分散処理系が構成されることになる。

本稿では、アクチュエータ、センサおよび制御装置とネットワークインタフェースで構成されるモジュールを想定し、ネットワークによって接続されたそれら多数のモジュールが連携して全体制御を行う分散実時間制御システムを対象に、モジュール間で行われる通信の要求事項を考察する。また、それらを満たす通信サービスを提供する、分散実時間制御のための QoS について検討する。

[†] 東京工科大学コンピュータサイエンス学部
Department of Computer Science, Tokyo University of
Technology

制御システムや工業機械用のネットワークとして専用の規格が用いられる一方で、近年の Ethernet 機器の普及を背景に、Ethernet を、従来、専用ネットワークが利用されていた分野へも適用したいという要求が高まっている。機器の価格や入手性、豊富なソフトウェア資源が利用可能など、Ethernet を利用することはコスト等の観点から非常に利点大きい。また、現在一般的となっている利用形態から、スイッチ機器の利用を前提とする。

本稿では、Switched Ethernet 上での分散実時間制御のための QoS を実現するための方式について検討する。

2. 対象となる制御システム

本章では、本研究で対象とするシステムのハードウェア上の条件について述べる。

対象となるシステムでは、アクチュエータの各々に個別に制御装置を付加し、これを統一的方法でネットワークに接続できるようにすることを考える。ロボットを例に説明すると、通常、モータがアクチュエータとなる。個々のモータにセンサ、制御装置、ネットワークインタフェース (NI) を付加し、ネットワークに直接接続可能なモジュールを構成する。このような制御機構を持ったアクチュエータをネットワークトアクチュエータ (Networked Actuator - NA) とよぶことにする。

従来、アクチュエータやセンサの接続方式は個々まちまちで、統一的方法でシステムを構成することが困難であった。ネットワークトアクチュエータ構造を用いることにより、どのようなアクチュエータやセンサであっても、統一的方法でシステムに組み込むことが可能となる。これは、汎用 PC の周辺機器の接続を USB で統一化することによって飛躍的に接続が容易になったことと類似である。ネットワークトアクチュエータ構成を実現するための技術課題として、単一のプロセッサで複数のアクチュエータを制御する集中的なハードウェア構成のシステムと比較して、高度な分散実時間制御機構が必要となることが挙げられる。

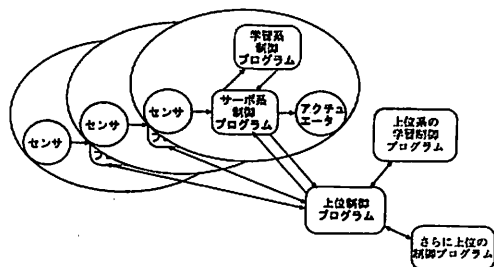


図 1 対象となる制御系の例
Fig. 1 Example of a target control system.

2.1 分散実時間制御システム

本研究で対象とするシステムは、ネットワークによって接続された多数のモジュールが連携して全体制御を行う分散実時間制御システムである。分散実時間制御システムの例を図 1 に示す。

アクチュエータを直接制御する下位の制御系であるサーボ系は、センサからの入力をもとに定期的に制御アルゴリズムを実行し、アクチュエータに操作量を出力する構造を持つ。機械系の制御の場合、1 ミリ秒以下の周期で計算を行う必要は少ない。一方、瞬間的な過電流の印加や、電力回生等の目的でアクチュエータの駆動電流を直接制御したい場合には、 10μ 秒以下の計算周期が必要になる場合がある。

サーボ系の構成方式として、フィードバック制御の他に、学習制御が行われる場合がある。目標値と実際の制御量の差分である誤差の傾向を記録し、より精度の高い制御を行うものである。このような系をサーボ系の一部として同一計算機上で実現することは可能であるが、サーボ系の計算と学習のための計算ではその性質が大きく異なるので、両者をそれぞれの性質に合った計算機上で実現した方が全体の実現効率が改善される。

ロボットなどの複雑な機械系を制御する場合には、このような、単位となる制御系を複数組み合わせる有機的に連携させる必要がある。たとえば 2 足歩行ロボットでは、20 個以上のモータが利用されている。その制御には、個々のサーボ系の他に、全体の状況を把握して行動計画を立案したり、状況にあわせて行動計画を補正する機構が必要になる。

以下では、サーボ系を実現するプログラム、学習制御を行うプログラムおよび上位の制御系を構成するプログラムを総称して制御プログラムとよぶ。また多数の制御プログラムで構成されるシステム全体を制御システムとよぶ。

サーボ系を例にとり制御プログラム間で実行される通信の形態を見てみると、実時間性に関する要請の高い順に、

- (1) 例外事象発生時の伝達
- (2) 上位系への状況伝達
- (3) サーボ系への目標値入力
- (4) サーボ系の動作ログ出力
- (5) サーボ系への学習結果出力

が挙げられる。学習結果やログは、通常、表の形式で表現され、その情報量は比較的多い。これとは異なり、転倒等の例外事象は、迅速に伝達される必要がある一方、その情報量は多くない。

上位の制御系では、他の制御プログラムから情報が伝達される。そのため、入力および出力数がサーボ系より多くなること、厳密な階層構造ではなく、種々の制御系からの入力が必要とすることなどの特徴がある。システム全体としては、プログラム間通信の種類が多いことおよび階層構造をとるとは限らないことにおいて、複雑の通信の実行を必要としている。

2.2 分散実時間制御のための QoS

前節で述べたように、本研究で対象とする分散実時間制御システムにおいては、制御プログラム間で要求事項の異なる複数カテゴリの通信が行われる。ここでいう分散実時間制御のための QoS とは、これらカテゴリの要求事項をそれぞれに満たす通信サービスのことである。

たとえば、例外事象発生を伝達するための通信は緊急性が非常に高く、即時に送信されるとともに低遅延で確実に相手に届けられる必要がある。一方、学習制御のため動作ログや学習結果を反映したアルゴリズムの転送は、緊急性そのものは低い、比較的データ量が大きく、要求されるスループットも高い。また、制御効率改善の観点から、緊急性の高い通信を妨げない範囲で、可能な限り早くデータが届けられることが要求される。

分散実時間制御システムにおいては、これらが

個別に達成されるのではなく、複数のカテゴリの通信を統括的に管理し、全体として可能な限り要求事項が満たされるようにすることが重要である。

2.3 Switched Ethernet と実時間通信

制御システムや工業機械用のネットワークとして専用の規格が用いられる一方で、近年のインターネット利用者の拡大による Ethernet 機器の普及を背景に、Ethernet を、従来、専用ネットワークが利用されていた分野へも適用したいという要求が高まっている。機器の価格や入手性、豊富なソフトウェア資源が利用可能など、Ethernet を利用することはコスト等の観点から非常に利点が多い。

実時間処理系に Ethernet を利用することが困難であった理由の一つは、その通信制御に CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) 方式を採用していることにある。この方式では伝送経路内でコリジョンが発生したさいには、乱数から算出する一定時間を待機してから再送処理を行う。このため通信の遅延時間を保証することができなかった。これに対して、伝送経路内においてコリジョンが発生しないように通信をスケジュールする方式が提案されている。

一方、Ethernet で LAN を構築するさいにスイッチングハブを利用することが一般的になっている。スイッチングハブを利用することでコリジョンは発生しなくなるが、スイッチ内のバッファオーバーフロー等によるパケット消失が発生しうる。パケットを消失したさいの再送信やスイッチ負荷による遅延の変化が大きく、そのままでは実時間性を保証することが困難である。

3. 通信方式の検討

本章では、本研究で対象とする分散実時間制御システムにおいてどのような通信が要求されるかを考察し、分散実時間制御のための QoS を実現する通信フレームワークについて検討する。

3.1 要求される通信機能

本研究で対象とするシステムは、センサやアクチュエータの個々に制御装置を付加したネットワークアクチュエータ (NA) によって構成さ

れる分散実時間制御システムを想定している。システム全体が協調して動作し複雑な運動を実現するためには、ネットワークを介して各 NA の状態や各種センサ情報を共有する必要がある。具体的には、フィードバック制御に必要な情報をネットワークを介して各 NA に伝達することを考えている。実際に、制御理論の分野においては、フィードバック制御内にネットワークを含むさいの制御の安定性に関する研究が行われている⁴⁾。

これまでに述べた本研究で対象とする制御システムに要求される通信として、

- (1) フィードバック制御に要求される通信
- (2) 例外事象発生のお知らせに要求される通信
- (3) 学習系の実現に要求される通信

が挙げられる。

サーボ系の制御では、周期的に制御プログラムを実行し、センサ等から得られる実際の制御量をもとに微調整を行うフィードバック制御が行われる。(1)は、このフィードバック制御に必要なデータを、他の NA やセンサから周期的に得るための通信である。これらのデータは、緊急度は高くなくデータサイズも小さいが、制御周期を守って通信が行われる必要がある。また、これらのデータは周期的に与えられ更新され続けるので、フィードバック制御に致命的な問題を生じない限りはある一定の割合でデータが消失しても良いと考えられる。文献⁵⁾においてメッセージ消失の発生するネットワークを含むフィードバック制御系での制御の安定性に関する研究が行われている。

一方、接触、転倒や妨害の発生などの突発的事象や機械の故障等を知らせる例外事象通知の緊急度はかなり高い。これらのメッセージは、サイズは小さいが、可能な限り迅速かつ確実に届けられる必要がある。この通信は厳密にはハードリアルタイム性を保証するサービスとして提供されるべきものであるが、パケット消失を完全には排除しえない Switched Ethernet での実現は困難である。本研究では、フィードバック制御とあわせて“実時間要請の高い通信”とし、例外事象発生のお知らせはその特殊な通信として扱う。

また、制御効率改善の観点から学習制御、予測

制御が重要である。NA においても学習に必要な制御ログの転送や、学習結果により改善された制御アルゴリズムの動的ロードなどを想定している。これらのデータは、サイズは比較的大きいが緊急度は低い。このような通信を実時間要請の高い通信と対比して“実時間要請の低い通信”とする。ただし、学習結果反映までの時間を短縮し、制御効率の改善速度を上げるためには、これらのデータも実時間要請の高い通信を阻害しない範囲で可能な限り早く伝達されることが好ましい。また、より高度な予測制御や学習制御を行うさいには、機械装置の外部に設けた高速な計算機に演算を依頼することも考えられる。このためには実時間制御系の外部とシームレスに通信を行うための機構が必要である。

3.2 実現方針

ここでいう分散実時間制御のための QoS とは、前節で述べた複数カテゴリの通信機能の要求事項が満たされる通信サービスを提供することである。このことは、指定された時刻を守る通信サービスの提供を意味するものではない。たとえば、十分に低遅延の通信が安定して提供されているならば、前節で述べたフィードバック制御のための通信は、周期的な実時間タスクの送信命令が即時に実行されれば達成可能である。利用者は提供される通信遅延の情報をもとに、構築したいシステムのフィードバック周期を守れるかどうか判断すれば良い。

2.3 で述べたように、Ethernet スイッチではバッファオーバーフロー等によるパケット消失が起こりうる。また、スイッチ内のキューの状態により通信遅延にばらつきがでる。このため、そのままでは Switched-Ethernet において安定した低遅延通信を提供することは困難である。

しかしながら、スイッチでのパケット消失に関しては、ネットワーク内の流量を管理し、スイッチのバッファオーバーフローを起こさないようにすることである程度防ぐことが可能である。本研究ではネットワークの状態を管理しパケット消失を起こさないようにすることで実時間処理に要求される通信機能を実現することを考える。

3.1 で述べたように、本研究で考える分散実時間制御のための QoS では、学習制御に要求され

る通信に関する要求事項も満たされる通信サービスが提供されなければならない。学習制御に要求される通信では、動作ログの転送や制御プログラムのロード等のために、定期的もしくは不定期に比較的大きなデータが転送される。この通信が重複し、一時的にネットワーク負荷が限界を越えたさいに、実時間要請の高い通信を阻害する原因となる。これを防ぐためには、ネットワークの負荷状態を観測し、バッファオーバーフローの可能性のあるさいには実時間要請の低い通信を止める機構が必要である。また、実時間要請の高いパケットにおいて安定した遅延の通信を提供するためには、実時間要請の低いパケットを追い越して処理する機構が必要となる。

上記のサービスを提供するためにネットワークに要求される機能をまとめると、

- (1) ネットワーク (スイッチ) の余力の把握
- (2) 把握した余力にもとづく流量制御
- (3) 実時間要請の高いパケットの追い越しのようになる。

(1), (2) に関しては、IEEE 802.3 でオプションとして定義されているポーズフレームを利用することも考えられる。しかしながら、ポーズフレームを受け取ったノードの送信処理は完全に止まってしまうため、実時間要請の高い通信も止められてしまう。スイッチでのバッファオーバーフローを防ぎつつ、実時間要請の高い通信を阻害しないためには、ネットワーク負荷が危険水準に達した時に実時間要請の低い通信のみ停止する機構が必要である。

(3) に関しては IEEE 802.1p で定義されて優先度付フレームで対応できると考えられる。

3.3 管理されたネットワーク

前節で述べた、分散実時間制御のための QoS を実現するために要求される機能 (特に (1) と (2)) を満たすネットワークを、管理されたネットワーク (Managed Network) とよぶ。Switched Ethernet において管理されたネットワークを実現するためにハードウェアに機能を付加することも考えられるが、ここではソフトウェアにおいて実現する方式を検討する。

3.1 で述べたように、高度な予測制御や学習制御を行うために、実時間制御系の外部に存在する

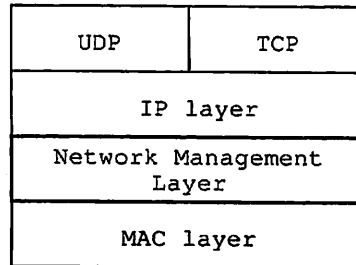


図 2 プロトコルスタック
Fig.2 Protocol stack.

計算機ともシームレスに通信を行う機構が必要である。このため、本研究ではアプリケーションが利用するプロトコルは UDP/IP, TCP/IP 等の従来のプロトコルを想定している。本研究では、管理されたネットワークの機能を、データリンク層 (MAC 層) とネットワーク層 (IP 層) の間の層として新たに実現する (図 2)。この層をネットワーク管理層 (Network Management Layer) とよぶ。

ネットワーク管理層に必要な機能として以下のものが挙げられる。

- (1) ネットワーク構成の把握
- (2) 現在のネットワーク負荷状況の把握
- (3) ネットワーク流量の余力の把握
- (4) 余力にもとづく流量の割当て
- (5) 割当てにもとづく流量制御
- (6) 優先度付パケット処理

これらの機能うち、(2) の現在のネットワーク負荷状況の把握を精密に行うことは困難である。本研究では、ネットワーク管理層の通信はすべて仮想チャネルによるコネクション指向の通信として扱うことでこの問題に対応することを考える。UDP などの本来コネクションレスの通信も、ネットワーク管理層を介することでコネクション指向の通信として扱われる。作成されている仮想チャネルと割当てられる流量はセグメント内に 1 つだけ存在するアービタによって集中的に管理される。

アービタは、各ノードからの仮想チャネル作成要求により仮想チャネルを作成し流量を割り当てる。流量はスロット時間あたりに許される送信サイズで管理される。アービタとのやりとり

や実時間要請の高い通信のための仮想チャンネルは恒久的なものとしてシステム、もしくはタスク初期化時に作成される。これらはタスクが明示的に解放するまで破棄されることはない。それ以外は、実際の送信要求があつてから仮想チャンネルの作成要求が行われる。アービタは仮想チャンネル作成要求を受け取ると、現在在る各仮想チャンネルの使用実績から新しい割当て流量や、もしくは破棄する仮想チャンネルの決定を行う。

アービタおよび各ノードは、これまでに作成された仮想チャンネルの使用実績と、ある状態でのパケット消失の発生の有無等から、割当て可能な流量の学習を行う。以上により要求事項(1)から(5)を実現する。

(6)の優先度付パケット処理は、前節で述べた802.1pで定義されている機能を用いて実現できると考えられる。

4. 関連研究

実時間通信の実現に関する研究が数多く行われている。Tenet⁶⁾では、下位から上位までの全ての層が実時間性を保証するプロトコルで実現されている。Bello²⁾らは、Ethernet上での衝突緩和による実時間性の向上を達成しているが、これはバス共有型の接続を対象としている。Loeser⁷⁾らは、Switched Ethernet上で実時間通信を実現しているが、ネットワーク層において実時間通信プロトコルを使用している点が本研究とは異なる。

5. おわりに

本稿では、分散実時間制御のためのQoSについて考察し、Switched Ethernet上での実現法について検討した。Switched Ethernet上で分散実時間制御のQoSを実現するためには、ネットワークの余力を把握し、それにもとづく流量制御が必要であった。本研究では、この要求を満たすネットワークを“管理されたネットワーク”として定義し、管理されたネットワークをソフトウェア的に実現するためにネットワーク管理層を新たに設ける方式を提案した。

ネットワーク管理層では、実際の通信を行う前に仮想チャンネルを構成することで、ネットワーク

の使用状況の観測および流量割当てを行い、実際の使用実績をもとに割当て流量の変更や仮想チャンネルの破棄を行い、つねにネットワークが余力を持つように流量を管理することでパケットの消失を防ぐ。

現在、有効性を確認するためにRT-Linux上で提案した方式の実装を進めている。また、有効性を確認した後は、人型ロボットの制御系に適用し、実機による評価を行う予定である。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助若手研究(B)課題番号17700078の支援により行った。

参 考 文 献

- 1) Pedreiras, P., Leite, R. and Almeida, L.: Characterizing the Real-Time Behavior of Prioritized Switched-Ethernet, In 2nd International Workshop Real-Time LAN's in the Internet, Vienna, Austria (2003).
- 2) Bello, L. L., Kaczynski, G. A. and Mirabella, O.: Improving the Real-Time Behavior of Ethernet Network Using Traffic Smoothing, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 1, Issue 3, pp.151-161 (2005).
- 3) Albes, M., Tovar, E. and Vasques, F.: Ethernet Goes Real-time: a Survey on Research and Technological Developments, Technical Report on Polytechnic Institute of Porto School of Engineering, HURRAY-TR-2K01 (2000).
- 4) Seiler, P. and Sengupta, R.: An H_∞ Approach to Networked Control, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 50, No. 3, pp.356-364 (2005).
- 5) Ishii, H.: H_∞ control with limited communication and message losses, 第34回制御理論シンポジウム (2005).
- 6) Banerjee, A., Ferrari, D., Mah, B.A., Moran, M., Verma, D.C. and Zhang, H.: The Tenet Real-Time Protocol Suite: Design, Implementation and Experience, IEEE/ACM TON, Vol.4, No.1, pp.1-10 (1996).
- 7) Loeser, J. and Haertig, H.: Low-latency Hard Real-Time Communication over Switched Ethernet, Proc. 16th Euromicro Conference on Real-Time Systems (ECRTS 04) (2004).