

標準イーサネットを介した 高速ビジュアルフィードバックシステム

A high-speed visual feedback system using the standard Ethernet

若生大輔, 鏡慎吾, 橋本浩一

Daisuke Wako, Shingo Kagami, Koichi Hashimoto

東北大学大学院情報科学研究科システム情報科学専攻

Intelligent Control Systems Laboratory, Department of System Information Sciences,
Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

キーワード： センサネットワーク (sensor network), ネットワーク制御 (network control), リアルタイムネットワーク (real-time network), 高速ビジョン (high-speed vision), リアルタイム処理 (real-time processing)

連絡先： 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01 東北大学 工学部 機械系2号館橋本・鏡研究室
若生大輔, TEL 022-795-7021, FAX 022-795-7019, E-mail: wako@ic.is.tohoku.ac.jp

1. 緒言

複数のセンサをネットワークを介して接続し利用するセンサネットワークにおいては, センサ数の増加により集中処理が困難となるため, 各センサに処理機能を持たせたうえでの分散化が重要となる. その際, 特にロボット制御などへの応用を考えた場合, センサ間およびセンサからロボットへの通信には実時間性が必要とされる.

複数のセンサを利用する場合, それらの接続のために新たにインフラを整備することは, コストや労力の点から好ましくない. 既存のインフラを利用できた方が効率的である. 本研究では, 家庭やオフィス, 研究室などにおけるLAN 技術として広く普及しているイーサネット, TCP/IP を利用し, 動的なロボット

制御に必要とされるミリ秒オーダーの実時間通信を実現することを目標とする. 室内程度の範囲において高速センサフィードバックによる制御を行うことを想定している.

しかしイーサネット, TCP/IP によるネットワークは本来は実時間通信を想定せずに設計されたものであり, 実時間性の保証は困難とされている. これは, 通信遅延の予測が困難であることに起因する. 帯域や遅延に関する資源予約の機構, RTP 等のトランスポートプロトコルの研究などが行われてはいるが, これらでは主に映像・音声等のマルチメディアアプリケーションを想定したものであり, ロボットのセンサフィードバック制御などへの適用可能性の評価はあまり行われていない.

本研究が目指す環境を Fig. 1 に示す. LAN

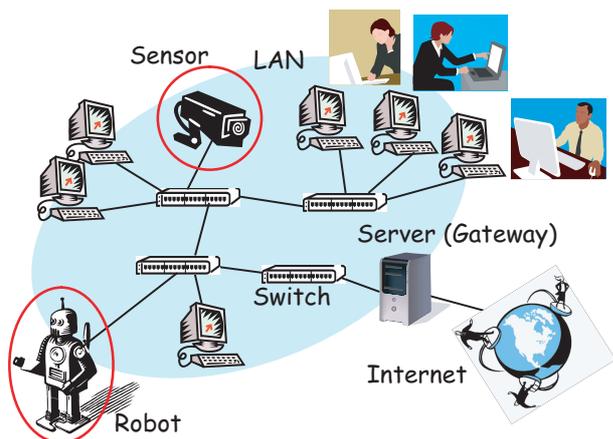


Fig. 1 本研究が想定する環境

内に複数のコンピュータ接続され、さまざまなトラフィックが存在している状況で、その同じネットワークにセンサやロボットを接続し、その相互間で1ミリ秒周期の実時間通信を実現したい。その際、センサやロボット等の端末ノードで動作させるOSの種類に可能な限り依存しない構成とすることを目標とする。

以下ではまず、イーサネット、TCP/IPで実時間通信に関する先行研究を紹介したうえで、実時間通信を困難としている点を整理し、それらに対する本研究でのアプローチについて述べる。その後、提案するリアルタイムネットワークシステムの実装について述べ、それを用いた実験による評価結果を報告する。

2. 先行研究

イーサネット、TCP/IPネットワークにおける通信時の遅延は、端末内での処理による遅延と、ネットワークスイッチ内で発生する遅延とに大きく分類できる。

端末内での遅延の生じ方は、端末で使用しているOSによって大きく異なる。例えばロボット制御にはLinuxベースの各種リアルタイムOSが広く利用されているが、RTLinux/Pro

のように実時間タスクから直接ネットワークパケットの送受信ができるように設計されたものもあれば、RTLinux/Freeのように、いったん非実時間タスクを経由しなくてはならないものも存在する。

端末内で発生する遅延の変動を抑えるためのソフトウェア技術は多く開発されているが、例えばRTLinux/Free用⁶⁾、ART-Linux用²⁾といったように、特定のOSに依存したものとして提供されるのが通常である。これは、ネットワークパケット等の処理はOSのカーネル内部で実現されるのが通例であり、そこを改変しなければならないという事情からの自然な帰結でもある。

ネットワークスイッチにおいて発生する遅延は、他のトラフィックのパケットに待たされることにより、不確定に変動する。工場等でフィールドバスの置き換えとして導入されつつある各種の産業用イーサネット³⁾では、これに対する対策を行っているものが多い。特に、スイッチを含む通信経路上で予期せぬ遅延が発生しないよう端末同士を精密に時間同期して、パケットの送信順序を確定的にスケジューリングする方式などが主流となっている。しかし産業用イーサネットを導入するには、通常はシステム全体を対応機器に更新する必要があり、また多くの場合端末のOSも限定される。

3. 提案するシステムの設計方針

Fig. 1に示す環境で通信遅延の変動を抑えるためには、既に述べた通り、端末内での遅延とスイッチ内での遅延の双方にアプローチする必要がある。以下でそれぞれの方針について述べる。

3.1 ネットワーク処理の PC からの分離

通常、端末におけるネットワークパケットの処理は OS のカーネル内部で行われるため、そこで生じる遅延の変動を抑えるためには、OS レベルの改変を行うことを避けることができない。

特定の OS に依存することを避けるため、本研究では、イーサネット、TCP/IP のネットワーク処理を PC からハードウェア的に分離し、外部に用意する専用のネットワーク処理ボードで行う。専用ネットワーク処理ボードはそれ自身がプロセッサとイーサネットインタフェースを持ち、PC からは独立して周期的にパケットを送信できるように構成する。専用ネットワーク処理ボードと PC の間は共有メモリを介して接続し、PC からは共有メモリへの書き込み、共有メモリからの読み出しという単純な操作でパケットの受け渡しを行う。ネットワーク処理や割り込みといった OS に強く依存する機構を回避することで、特定の OS への依存性を小さくすることができる。

3.2 優先度付きギガビットイーサネットスイッチの導入

通信経路上での遅延の変動を抑えるためには、実時間通信のパケットが他のトラフィックのパケットに待たされる時間をできるだけ小さくすることが重要である。この目的のため、本研究では特に新規な技術は導入せず、IEEE 802.1Q/p に基づく優先度制御機能を持つ市販のギガビットイーサネットスイッチ(以下、優先度付き GbE スイッチ)を利用する。

最高優先度のパケットは常に優先して送信されるため、他のトラフィックに待たされる最悪時間は、Fig. 2 に示すように最大長のパケット1 個の送信にかかる時間として見積もるこ

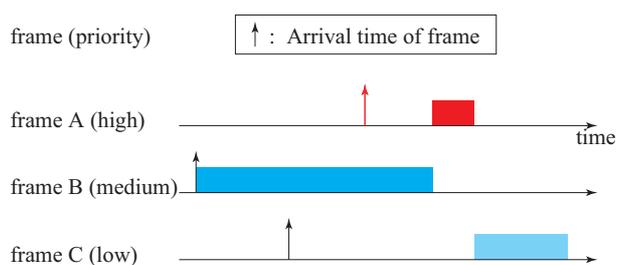


Fig. 2 優先度付き GbE スイッチ内での遅延

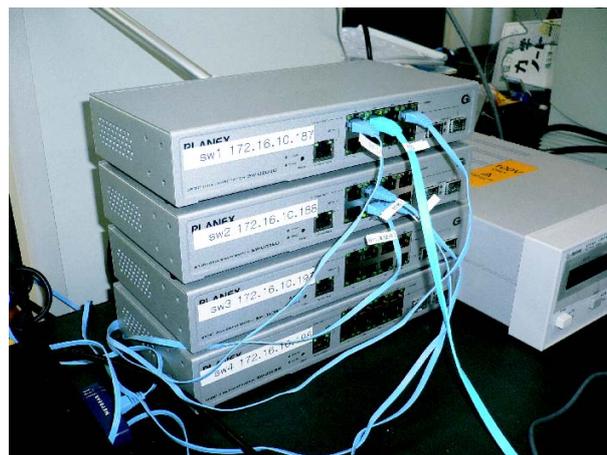


Fig. 3 使用した GbE スイッチ

とができる。1 Gbps の送信速度では、スイッチ 1 段で発生する最悪遅延 T は

$$T = \frac{\text{最大パケット長} [\text{bit}]}{\text{帯域} [\text{bps}]} \quad (1)$$

$$= \frac{1500 \times 8 [\text{bit}]}{10^9 [\text{bps}]} \quad (2)$$

$$\approx 12.2 [\mu\text{s}] \quad (3)$$

となる。これにより、現実的なホップ数のネットワークで 1 ms 以内の遅延が実現できると期待できる。なお、イーサネットの最大パケット長を拡張したジャンボフレームがネットワーク内を流れている場合は以上の見積もりは成り立たないが、ここでは考慮しない。

4. 提案するシステムの実装

前節で提案したシステム構成の実装について述べる。



Fig. 4 専用ネットワーク処理ボード

まず、端末側のネットワーク処理を行う専用ネットワーク処理ボードとして、Fig. 4 に示すアルファプロジェクト製 MS104-SH4 を採用した。ルネサステクノロジ製 SuperH SH7750R (SH-4) を搭載したプロセッサボードである。μITRON 4.0 準拠のリアルタイム OS であるミスポ製 NORTi4 が動作しており、タスクの周期実行、優先度に基づくタスクの切り替えが可能である。同ボードにはイーサネットコントローラが実装されており、NORTi4 上の TCP/IP スタックにより TCP および UDP の通信を行うことができる。

共有メモリにはインタフェース製のメモリンク (PCI-4913, MAT-4914) を使用した。メモリンクと PC 間は PCI バス、メモリンクと MS104-SH4 ボード間は PC/104 バスで接続されている。

周期的なデータ送信を行う場合、タイマ割込みによって一定時間ごとに起動されたタスクが、共有メモリの定められた位置からデータを取り出し、UDP パケットとして送信する。一方受信については、UDP パケットがイーサネットポートに到着するたびに割込みによりタスクが起動し、受信したデータを共有メモリに書き込む。PC は共有メモリを一定周期

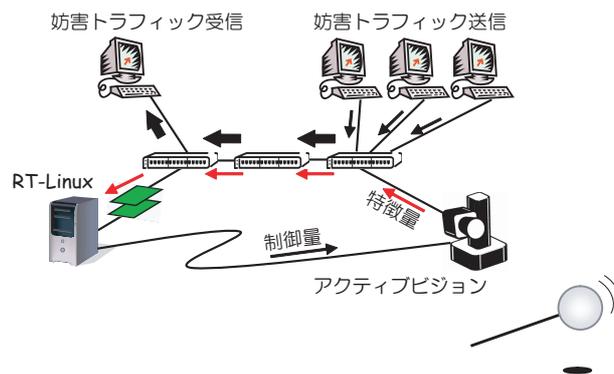


Fig. 5 実験環境の構成

でポーリングすることでデータを取得する。

優先度付き GbE スイッチには、Fig. 3 に示すプラネックスコミュニケーションズ製 SW-0208G を用いた。SW-0208G は、ギガビットイーサネットポートを 8 つ装備し、IEEE802.1Q VLAN, IEEE802.1p 優先度制御に対応している。IEEE802.1Q VLAN 機能によりパケットに VLAN タグを付加し、IEEE802.1p 優先度制御によりそのタグ毎に優先度を付加することで、パケットを優先度制御できる。

アクチュエータを制御する端末 PC の OS には Vine Linux 3.2 (kernel 2.4.33) に RTLinux-3.2-rc1 を適用したものをを用いた。

5. 実験

上述したリアルタイムネットワークシステムを用いて、ビジュアルフィードバックによる高速対象追跡システムを構築し、通信性能を評価することでシステムの有効性を検証した。

5.1 実験環境

Fig. 5 に示す構成で実験を行った。センサとして、ネットワーク対応高速ビジョンチップシステム⁵⁾を使用した。このシステムは、画像の獲得と画像処理を 1000 frames/s で実行し、

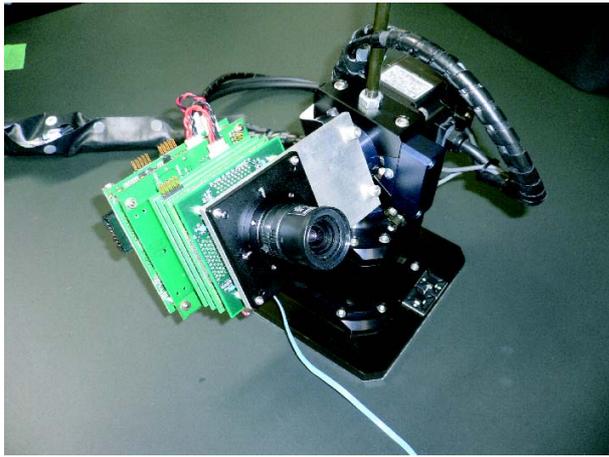


Fig. 6 ネットワーク対応高速アクティブビジョン

例えば対象抽出・重心計算のプログラムを実行させることで、対象の画像上での重心位置を 1 ms ごとに得ることができる。

制御用 PC と同様に、同システムにも 4. で述べた MS104-SH4 ボードが接続されており、画像処理結果である対象の重心位置を 1 ms ごとに UDP を用いてネットワークへ送信することができる。このシステムを、Fig. 6 のように 2 軸の AC サーボモータによるダイレクトドライブ型アクチュエータ AVS-II⁷⁾ に搭載し、パン・チルトの制御が可能なアクティブビジョンを構成した。

AVS-II を制御する PC は、受信した追跡対象の重心位置を共有メモリから 1 ms 周期で得て、対象の重心が画像中心に一致するように PD 制御によりモータを制御する。この際、MS104-SH4 ボードでのパケット受信間隔と PC が共有メモリをポーリングする間隔とが正確に一致していないことによりデータの読み飛ばしや重複が発生するが、ここでは単に、読み飛ばしたデータは破棄し、重複したデータは繰り返し使うこととした。

なお、実験環境中には妨害トラフィックを送出する PC を 3 台設置し、合計約 1 Gbps の

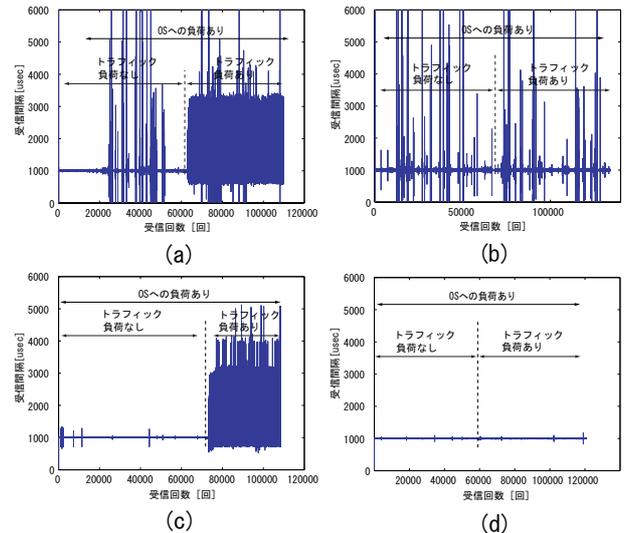


Fig. 7 パケットの受信間隔

Table 1 Fig. 7 の関係

		スイッチの優先度制御	
		なし	あり
パケットの受信処理	通常処理	(a)	(b)
	提案手法	(c)	(d)

負荷をネットワークに与えた。

5.2 実験結果

1 ms 周期で高速ビジョンシステムから送信されたパケットを PC が受信した時刻の間隔の推移を Fig. 7 に示す。仮に遅延の変動が全くなかった場合、受信間隔は 1000 μ s で一定となる。1000 μ s からのずれが遅延の変動の大きさを示す。

評価のため、ネットワーク処理を PC から分離した場合としなかった場合、さらに GbE スイッチにおいて優先度制御を行った場合と行わなかった場合の組み合わせで合計 4 通りの条件で通信実験を行った。いずれの実験でも、前半はネットワーク内に妨害トラフィックはなく、後半は約 1 Gbps の負荷をかけてい

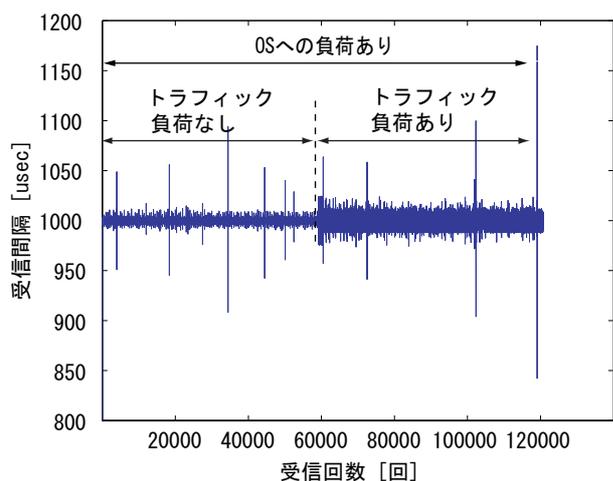


Fig. 8 Fig. 7 (d) の拡大

る。またほぼ実験全体を通じて、制御用 PC においては無関係なバックグラウンドプロセスが動作し、負荷をかけている。

Fig. 7 (a), (b) は、ネットワーク処理を PC から分離しなかった場合であり、PC 内蔵のイーサネットポートでパケットを受信し、RTLinux の非実時間タスクを経由してパケットを受信している。そのうち (a) は GbE スイッチの優先度制御を無効として、(b) は有効としている。受信時刻の計測は、非実時間タスクがパケット受け取った時点で行った。

Fig. 7 (a) の前半部分、つまりネットワークが無負荷状態でのフレームの受信間隔については、 $1000 \mu\text{s}$ を大幅に超えるパケットがいくつか見られる。RTLinux の非実時間タスクを経由してパケットを受信しているため、OS 内で稼働している様々なバックグラウンドプロセスの影響を受け、その処理時間が予測できない。

大きなピークはプロットのスケールから外れているが、ピークの最大値は約 280 ms であった。Fig. 7 (a) 後半のネットワーク高負荷状態においては、同様の大きなピークが見られるほかに、受信間隔が $3000 \mu\text{s}$ 付近のパケット

が多く見られるようになった。送信時にパケットに付加しているシーケンス番号を参照した結果、高負荷状態ではパケットを連続で 3~5 個ドロップしていることがわかった。パケットが受信ポートまで到達しなかったため、受信間隔が広がったと考えられる。GbE スイッチの優先度制御を有効にした Fig. 7 (b) においては、後半のネットワーク高負荷状態時でもパケットをドロップすることはなかった。

Fig. 7 (c), (d) は、ネットワーク処理を PC から分離した場合の結果である。そのうち (c) は GbE スイッチの優先度制御を無効として、(d) は有効としている。受信時刻の計測は、専用ネットワーク処理ボード上で動作している NORTi4 のタスクが、受信割り込みによって起床された時点で行った。

いずれも前半の無負荷状態においては、バックグラウンドプロセスの影響を受けずに正確な周期でパケットを受信できていることがわかる。後半のネットワーク高負荷状態時には、Fig. 7 (c) ではスイッチの優先度制御が無効であるためやはりパケットのドロップが発生している。一方 (d) ではほぼ等間隔でパケットを受信できている。

Fig. 7 (d) の縦軸を拡大したものを Fig. 8 に示す。ネットワーク負荷のかかった状態では、遅延の変動は、スイッチ 3 台分の最悪遅延の理論値である $36.6 \mu\text{s}$ 以内におおむね収まっていることが確認できる。しかし、頻度は少ないが最大およそ $150 \mu\text{s}$ の比較的大きな遅延も発生している。スイッチが市販品であることから内部で把握できない遅延が発生している可能性や、MS104-SH4 ボード上に実装した処理の遅れ等の可能性が考えられるが、原因の特定には至っていない。

このように原因の特定できていない突発的な遅延は発生しているものの、それらの遅延

も 1 ms よりは十分に小さいものである。実際にアクティブビジョンを動作させてランダムに動く対象を追跡させたところ，ネットワークを介さずに PC に直接接続した場合と比べて，見たところ遜色のない高速追跡が実現できた。追跡性能の定量評価は今後の課題である。

6. 結言

本稿では，標準的なイーサネット技術に基づくリアルタイムネットワークシステムを，端末の OS への依存度が少ない形で実現する方法を提案し，評価を行った。また，このシステムを用いて 1 ms 周期のビジュアルフィードバックによる対象追跡を実現した。

今後の課題として，本システムのより詳細な評価が挙げられる。本稿では受信間隔によって遅延の変動を評価したが，本来はセンサと PC の時刻を正確に同期⁸⁾させ，end-to-end の遅延を実際に評価することが必要である。また，対象追跡性能の定量的評価も今後の課題である。

参考文献

- 1) 山崎信行, 松井俊浩: 並列分散リアルタイム制御用レスポンスプロセッサ, 日本ロボット学会誌, 19-3, 352/361 (2001)
- 2) 石綿陽一, 金広文男, 比留川博久, 斎藤元: Ethernet を用いた実時間通信方式の開発, 第 22 回日本ロボット学会学術講演会, 1C25 (2004)
- 3) 高柳洋一: リアルタイム工業用イーサネットの現状と問題点, 第 5 回計測自動制御学会制御部門大会, 659/662 (2005)
- 4) 青木良輔, 鏡慎吾, 橋本浩一: 標準イーサネットと接続可能なリアルタイムネットワークの提案, ロボティクス・メカトロニクス講演会'06, 2P2-C16 (2006)
- 5) 齊藤翔一郎, 鏡慎吾, 小室孝, 石川正俊: ネットワーク接続機能を実装した高速ビジョンチップシステム, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '05, 2A1-N-096 (2005)
- 6) Y. Uchimura and T. Yakoh: Bilateral Robot System on the Real-Time Network Structure, IEEE Trans. Industrial Electronics, 51-5, 940/946 (2004)
- 7) Y. Nakabo and M. Ishikawa: 1ms Column Parallel Vision System and Its Application of High Speed Target Tracking, 2000 IEEE Intl. Conf. Robotics and Automation, 650/655 (2000)
- 8) F. Sivrikaya and B. Yener: Time Synchronization in Sensor Networks: A Survey, IEEE Network, 18-4, 45/50 (2004)