

広域 IP ネットワーク上での高信頼通信手法の検討

中西 茂利, 山口 義一, 落合 真一
三菱電機(株) 情報技術総合研究所

プラント制御などの産業システム分野では、広域 IP ネットワークを用いた、低コストな遠隔監視制御システム構築の要求がある。しかし、広域 IP ネットワーク上では、その性質上、宛先ホストへのデータ到達保証はなく、経路途中でのデータ消失や転送遅延が頻繁に発生し、一定時間内に確実にデータが到達する必要がある産業システムへの適用は困難である。本研究では、広域 IP ネットワーク上で制御用通信を実現するために、送信データを複製し、個々のデータを異なる転送経路を明示的に指定したパケットで配送することで、複数経路使用による冗長化実現手法を検討した。

Study of the Highly Reliable Communication Technique over Wide Area IP Network

Shigetoshi Nakanishi, Yoshikazu Yamaguchi, Shinichi Ochiai
Mitsubishi Electric Co., Information Technology R & D Center

In a field of industrial system, such as plant control, there is demand of wanting to make a remote-control system at a low cost, using wide area IP network. But, over wide area IP network, there is no guarantee to send on a data to the receiving host because data loss and forwarding delay happen frequently. Therefore, such a network cannot be applied to industrial network system because it requires highly reliable communication. In this paper we will describe our experiment technique of network for control to make highly reliable communication over wide area IP network. This technique makes duplication of transmission data and sends to target host using different route.

1. はじめに

プラント制御などの産業システム分野では、産業用計算機やコントローラを、高速/大容量かつ安価な汎用品を用いて構成されるネットワークに接続し、高信頼性が必要な制御用通信と、マルチメディア/一般情報処理用通信を同一伝送路上で実現したいという要求がある[1]。さらに、これらの制御用ネットワークを、イントラネット/インターネットのような広域 IP ネットワークへ接続し、遠隔地からの監視制御を実現したいという要求も存在する。

しかし、広域 IP ネットワーク上では、その性質上、宛先ホストへのデータ到達保証はなく、接続機器障害や経路変更によるデータ消失、および、同時に行われている通信間での干渉による転送遅延などが頻繁に発生するため、信頼性が低下し、そのままでは産業システムへの適用は難しい。

本研究では、制御用通信を広域 IP ネットワーク上で行うために必要な、高信頼化手段の実現に向け、「データ多重化通信手法」を検討している。本手法は、ホストからの送信データを

複製し、個々のデータを、異なる経路を明示的に指定したパケットを用いて、宛先ホストへ転送する。これにより、広域 IP ネットワーク上のデータ転送経路冗長化が可能となる。

本論文では、データ多重化通信手法を用いたネットワークモデル、および、実現方法を示し、実現方法を検討する。

2. 産業システムへの IP ネットワーク導入における目的と課題

2.1. 目的

近年、産業用制御計算機は、従来からの高リアルタイム性、高信頼性を維持した上で、更に、オープン化、低価格化が要求されている。

制御用ネットワークでも同様である。汎用通信技術の急速な発展により、接続機器の高速/大容量/低価格化が進んできた。これらの技術を制御用ネットワークへ導入し、広域 IP ネットワーク上に接続された複数計算機を 1 つのシステムとして考えた、分散型リアルタイムシステムの実現が求められている。

マルチメディア/一般情報処理用通信では、近年、End-to-End でのデータ転送に、次のような高信頼性が要求されてきている。

- データ到達保証：転送されるデータ系列に、欠落が発生しないことを保証する。これにより、トランスポート層やアプリケーション(AP)で行われる、再送処理を防ぐことが可能となる。
- 転送遅延保証：宛先ホストへ、データ系列が一定レートで到達することを保証する。これにより、特に、音声や動画配信などの、ストリーミング技術を有効活用可能となる。

これらの項目を保証することで、広域 IP ネットワーク上での、高信頼なデータ通信を実現することが出来るが、特に、制御用通信の場合は、その保証レベルが厳しく、ある一定時間(数百ミリ秒～数秒程度)内に、確実にデータが到達することが重要である。

2.2. 制御用ネットワークでの技術動向

前節で述べた目的を達成するために、これまで検討されてきた、高信頼化通信技術について、ネットワークの各部位に着目して述べる。

(1) 局所的ネットワーク(LAN)技術

LAN 上の高信頼化技術として、物理伝送路の多重化による冗長構成手法が実現されている。

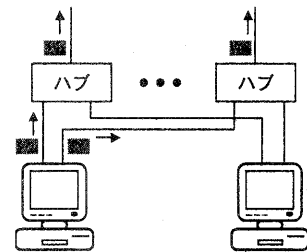


図 1 LAN 上での多重化

本技術は、ネットワークインタフェースカード(NIC)を複数枚実装したホストと、複数のハブを用いて、図 1 で示すような接続方法による、独立した LAN を構築するものである。その上で、ホスト上で動作する通信 AP は、同一データを各 NIC より送信する。これにより、ホスト-ハブ間の冗長性を増すことが出来、NIC、ハブ、および、それらを接続する物理伝送路の障害により、1 つの LAN が使用不可能な場合でも、他の LAN を用いて送信されたデータは、宛先ホストに到着可能となる。

なお、最近では、ハブや NIC 自体に、このような冗長接続機能を持つ汎用品も出始めている。

(2) ルータ技術

LAN 間を接続するための、ルータに対する高信頼化技術として、VRRP [2]/HSRP [3]を用いた冗長構成手法が提案/実装されている(図 2)。

本技術は、ネットワーク上の同一セグメントにルータを複数配置し、あるルータが故障した際、他のルータがデータ転送処理を継続することにより、通信断を防止するものである。接続されている各ホストは、ネットワークに論理的に配置された、仮想ルータに対して、転送すべ

きデータを送信する。仮想ルータ宛に送信されたデータは、アクティブルータが実際の転送処理を行う。待機ルータは、アクティブルータの挙動を監視し、故障と判断した場合に、それまでアクティブルータが行ってきた、仮想ルータ宛データの転送処理を代替し、ネットワーク上の各ホストの通信を中断させないよう動作する。

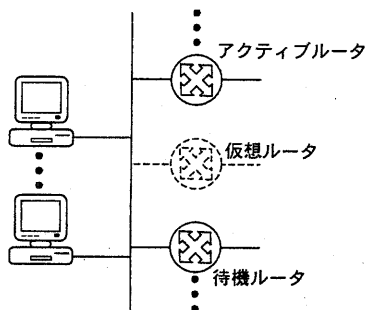


図 2 ルータの冗長化 (VRRP/HSRP)

2.3. 課題

前節(1)、および、(2)に示したように、LANや、その間を接続するルータに対する、高信頼化技術は、これまで様々な検討/実装が行われてきた。しかし、広域 IP ネットワークに対する高信頼化技術は、従来からの、ルーティングプロトコルを用いた経路再構成手法が用いられているだけであり、多重化による冗長構成手法は実施されていない(図 3)。

しかし、ルーティングプロトコルを用いた転送経路断検出、および、経路再構成には、その仕様から、数十秒～十数分の処理時間が必要となり、それまで End-to-End 間で行われていた、データ送受信は中断され、データ消失や転送遅延に繋がる。

前述したように、制御用通信を実施する場合、データ系列の到達保証、および、転送遅延保証が非常に重要であり、マルチメディア/一般情報処理用通信よりも、厳しい制限が課せられる。従って、広域 IP ネットワーク上で制御用通信を実現するためには、何らかの高信頼化手法を

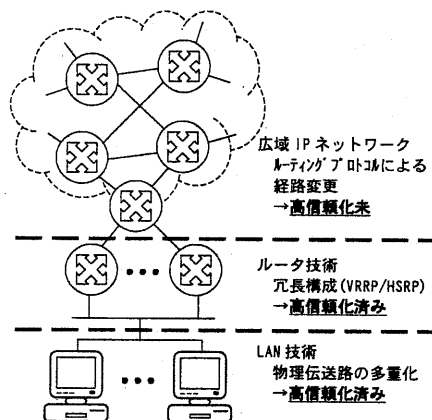


図 3 技術適用箇所

施す必要がある。本研究では、この課題に着目し、データ多重化通信手法を検討/提案している。

3. データ多重化通信モデル

本研究では、前章で述べた課題を解決し、広域 IP ネットワーク上で、データ到達保証、および、転送遅延保証による、高信頼通信の実現を目的とした、データ多重化通信手法を検討している。本手法の概要を以下に示す。

- (1) 送信データの複製：ホスト上で、送信対象のデータを、予め規定されている多重度分複製し、同一内容のデータ系列を複数作成する。
- (2) 転送経路の多重化：上記(1)で作成したデータ系列に対して、異なる経路を明示的に指定したパケットを用い、宛先ホストへ送信する。これにより、広域 IP ネットワーク上の転送経路を多重化し、冗長構成を実現する。

3.1. 前提条件

本研究では、データ多重化通信手法を検討するにあたり、次の前提条件を設定している。これらの条件を課すことで、従来のネットワーク接続機器と産業用計算機/コントローラを、同一の IP ネットワーク上に混在させ、相互通信

が可能となることを保証している。

- ルータなどのネットワーク構築用機器は、すべて汎用品を用い、改良は一切行わない。
- ネットワーク構築用機器内部、通信プロトコル処理部は、規格に沿ったものを用い、拡張仕様などは一切含まない。
- 接続される汎用端末の通信プロトコル処理部は、規格に沿ったものを使用する。
- 接続される産業用計算機/コントローラでは、特別な I/O 機器の使用や、通信プロトコル処理部に改良を施しても良い。ただし、TCP/UDP 層や IP 層処理部を改良する場合は、個々の規格を逸脱してはならない。
- 産業用計算機/コントローラ上で動作する AP は、特殊な手法を用いて構築してよい。

3.2. ソースルーティングオプション

データ多重化通信手法を実現するために、基本となる既存技術である、IP 層の規格で定義済みの、ソースルートオプションを用いる[4]。

ソースルートオプションは、IP パケットのオプション部分に、パケットが通過すべき経路を、送信ホスト側で明示的に指定するための機能である。本オプションを用いることで、広域 IP ネットワーク上の複数のルータにより、ルーティングプロトコルを用いて予め決定されている転送経路ではなく、送信する IP パケット内部のオプション部に指定された経路を通過することが可能となる。

3.3. モデル上での転送処理概要

図 4に、データ多重化通信手法を施した、ネットワークモデルを示す。図 4では、複数のルータにより構成されている広域 IP ネットワークを介し、ホスト A とホスト B が通信している概要を、転送経路に着目し示している。図中の破線で記されている部分は、ルータ間でルーティングプロトコルにより決定される経路を表している。

本例では、広域 IP ネットワーク上の多重度

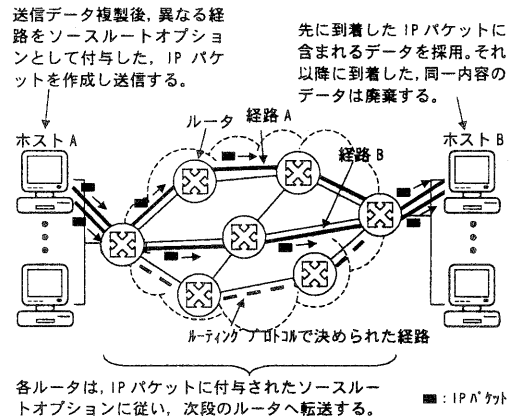


図 4 データ多重化通信ネットワークモデル

を 2 とし、異なる 2 種の経路(図中の経路 A および経路 B)を用いてデータを転送する場合の、通信処理概要を示す。

- ① ホスト内部の送信処理：ホスト A 上で、送信対象データを 2 経路分複製する。その後、それぞれのデータを有する IP パケットを作成し、ソースルートオプションとして、経路 A、および、経路 B の経路指定情報を付与した後、送信する。
- ② 経路途中のルータの振る舞い：経路途中にあるルータは、ホスト A より送信された IP パケットを、ソースルートオプションの経路指定に基づき、経路 A、および、経路 B を用いて、宛先ホストである、ホスト B へ転送する。
- ③ ホスト内部の受信処理：ホスト B では、先に到着したホスト A からの IP パケットに含まれるデータを採用し、それ以降に到着した、同一内容のデータは廃棄する。

本例では、ホスト A-ホスト B 間の通信における、多重度を 2 として説明したが、多重度を n (n は正の整数)と定義することにより、転送経路数を増加させることが出来る。これにより、冗長性の増加による、データ到達率を向上可能である。また、ホスト B に先に到着した IP パケットに含まれるデータを採用し、それ以降に到着した、同一内容のデータを廃棄することで、

ホスト B が受信すべきデータの、転送遅延を抑えることが可能となる。更に、現在 IETF (The Internet Engineering Task Force) で議論されている、通信品質保証手法 [5] などを適用することで、制御用通信で求められる、転送遅延保証が実現可能となる。

なお、多重対象外の通信は、ルータ間でルーティングプロトコルにより、予め決定されている経路を用いて転送される。これにより、制御用などの重要度の高い通信にデータ多重化通信手法を用い、それ以外の、重要度の高い通信には、従来からの転送手法を用いるので、ネットワーク上の転送データ量を抑えつつ、データ到達率を向上することが可能となる。

3.4. ホスト内部処理

本手法による、ホスト内部の送受信処理を示す。本手法では、送信処理として、データ複製と転送経路指定、受信処理として、重複データ廃棄を行う必要がある。これらの処理の実現箇所としては、(1)AP 内部、(2)OS 内部の、2 種類が考えられる。

以降、これらの実現箇所について、その処理方法概要と得失を示す。

実現手法 1：送受信処理を AP 内部で実現

本手法は、送信時のデータ複製/転送経路指定処理、および、受信時の重複データ廃棄処理を、すべて通信 AP 内部で実施させるものである。本手法の処理概要を図 5 に示す。

本手法での処理概要は次のとおりである。

- ① 送信ホスト上の通信 AP は、予め IP 層に対して転送経路情報を指定する。
- ② 送信ホスト上の通信 AP で、データ送信処理が発生した際、送信対象データの複製を作成し、それぞれのデータに対して送信処理を実施する。
- ③ 送信ホスト上の IP 層では、通信 AP からの送信データを、予め指定されていた転送経路情報をソースルートオプションとして付与した IP パケットを作成し、送信する。

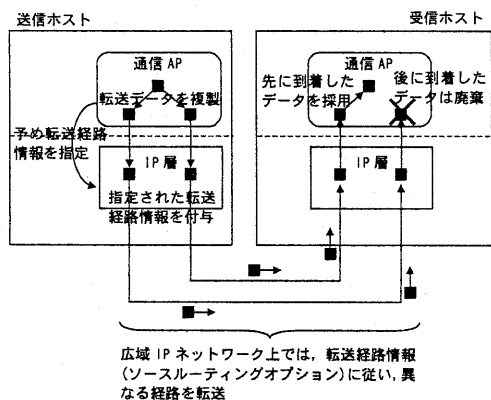


図 5 実現方法 1 での処理概要

- ④ 広域 IP ネットワーク上では、送信ホストからの IP パケットに指定された転送経路情報に従い、異なる経路でパケットを転送する。
- ⑤ 受信ホストでは、受信した IP パケットからデータを抽出し、通信 AP 内で、同一データの到着順を判断する。先に到着したデータを採用し、それ以降に到着したデータは廃棄する。

本手法では、使用プロトコル層には非依存に、通信 AP ごとのデータ多重化通信制御が可能である。通信 AP が制御用通信を実施している場合は、データ多重を行い、そうでない場合は従来からの転送手法を用いることが可能である。しかし、通信 AP ごとに、転送経路情報を持つ必要があり、また、送信データの複製処理、および、受信データの重複照査などを通信 AP 内で行わなければならないため、それらに多くの処理時間を費やすという問題点がある。

実現手法 2：送受信処理を OS 内部で実現

本手法では、OS 内部にデータ複製部、および、重複データ廃棄部を実装するものである。データ送信時は、データ複製と転送経路指定データ複製部で、また、データ受信時は、重複データの廃棄を重複データ廃棄部で行う。本手法の処理概要を図 6 に示す。

本手法での処理概要は次の通りである。

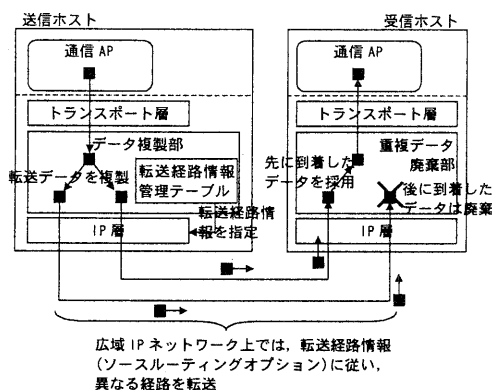


図 6 実現手法 2 の処理概要

- ① 送信ホスト内のデータ複製部は、予め外部からの転送経路情報を取得し、内部に転送経路情報管理テーブルを構築しておく。
- ② 送信ホスト上の通信 AP で、データ送信処理が発生した際、データ複製部では、トランスポート層からのデータパケットに対して、複製を作成し、そのパケットの宛先アドレスを基に、転送経路情報管理テーブル内から、転送経路情報を検索し、IP 層へ指定する。
- ③ 送信ホスト上の IP 層では、データ複製部から指定された転送経路情報を、IP パケットのソースルートオプションとして付与し、送信する。
- ④ 広域 IP ネットワーク上では、送信ホストからの IP パケットに指定された転送経路情報に従い、異なる経路でパケットを転送する。
- ⑤ 受信ホストでは、重複データ廃棄処理部により、IP 層からの受信した重複パケットの到着順を、使用しているトランスポート層の機能に合わせ、判断する。先に到着したデータを採用し、それ以降に到着したデータは廃棄する。

なお、上記⑤の重複データの廃棄処理は、使用しているトランスポート層に依存する。TCP に代表される、パケット順序管理にシーケンス番号を用いるプロトコルの場合は、既に受信済

みのパケットに付与されていたシーケンス番号と、同等または古いパケットを再受信した場合は廃棄する。これを利用することで、データ廃棄を、トランスポート層で行うことも可能である。また、UDP に代表される、パケットの順序管理を行わないプロトコルでは、重複データ廃棄部内で、何らかのデータ系列順序情報を用いて、重複データを廃棄する必要がある。

本手法では、通信 AP がデータ多重通信制御を行う必要はない。しかし、使用トランスポート層に依存して、重複データ廃棄処理を検討する必要がある。特に受信パケット順序管理を行わない場合は、重複データ廃棄処理部の実装方法が複雑になると考えられる。

4. おわりに

本論文では、広域 IP ネットワークを介して制御用通信を実施する際に必要となる、高信頼性を実現する手法として、途中経路を多重化し End-to-End でのパケット到達率の向上を図る、データ多重化通信手法を提案した。ネットワーク全体でのデータ転送概要の説明、および、ホスト内の送受信処理実装方法を示した。

今後は、シミュレーションによる、本手法の有効性を評価すると同時に、実装方法の詳細検討を実施していく予定である。

参考文献

- [1] 中西, 他 : 汎用 LAN による産業用制御ネットワークの設計, 情報研報 Vol199 No.18, pp19-24, 1999/2
- [2] S.Knight, et. al. : Virtual Router Redundancy Protocol, RFC2338, 1998/4.
- [3] T.Li, et. al. : Cisco Hot Standby Router Protocol (HSRP), RFC2281, 1998/3.
- [4] D.Comer 著, 村井, 他 訳 : 第 3 版 TCP/IP によるネットワーク構造 Vol.I-原理・プロトコル・アーキテクチャ, 共立出版 (株), 1997/8.
- [5] S.Blake, et. al. : An Architecture for Differentiated Services, RFC2475, 12/1998.