

IEEE802.3x 流量制御機能における ポーズ時間設定方式の一検討

早坂光雄 関山友輝 大島訓

(株) 日立製作所 システム開発研究所

トラフィックの一時的な過負荷状況によって発生するパケットロスを回避することは、ネットワークリソースの有効利用を図る上で重要である。また、制御パケットを用いた通信がインターネットのブロードバンド化により増加しているため、制御パケットのオーバーヘッドを抑制することは重要な課題である。IEEE 802.3x で規定されるポーズ機能は、ポーズ時間（送信停止時間）を指定した制御パケットを送信側に送出し、ポーズ時間の間だけ送信を停止させる。これにより一時的な過負荷によって発生するバッファオーバーフローを抑制しパケットロスを回避することが可能である。本稿では、ポーズ機能に着目し、ポーズ時間の設定をネットワークの状況に応じて変化させることにより、制御パケットを減少させ、パケットロスを回避する方式の検討を行い、特性評価によりその有効性を示す。

A Study on Dynamic Pause Time Control Scheme in IEEE 802.3x Flow Control

Mitsuo HAYASAKA Tomoki SEKIYAMA
Satoshi OSHIMA

Hitachi, Ltd., Systems Development Laboratory

To avoid packet losses due to temporary traffic congestion is effective for improving the utilization of network resource. Also, the network applications using the control packets increase with the development of the broadband Internet. Therefore, it is important to avoid the overheads due to the control packets. IEEE 802.3x flow control sends a control packet given a pause time to the sender end, and forces it to stop sending packets during the given pause time. Thus it can avoid packet losses caused by buffer overflows due to the temporary traffic congestion. This paper focuses on this flow control and proposes the dynamic pause time control scheme. The proposed scheme calculates and changes the pause time according to the network congestion. The simulation results show the proposed scheme avoids packet losses due to buffer overflows and dramatically reduces the number of the control packets.

1. はじめに

近年、インターネットを介したストリーミングメディア配信への要求が高く、活発に行われている。こうしたメディアはリアルタイム性が強く、多くのネットワークリソースを消費するアプリケーションである。データ通信に用いられている Transmission Control Protocol (TCP) は加算的増加乗算的減少 (AIMD: Additive-Increase Multiplicative-Decrease) アルゴリズム[1]に基づいた輻輳制御を行っており、同様の輻輳制御を User Datagram Protocol (UDP) で転送されるストリーミングメディアへ適用する方式が議論されている[2][3][4]。これらの方式では、受信側から送信側へ制御パケットを転送し輻輳状況を通知することで、輻輳検知の場合は転送レートを大きく減少させ輻輳を回避し、その後、徐々に転送レートを回復させる。転送レートの変化には制御パケットを常に転送する必要があるため、輻輳制御を伴ったアプリケーションが増加すると、制御パケットのオーバーヘッドによりかえって輻輳を増長させてしまう問題がある[5]。従って、制御パケットを減少させることは重要な課題の1つである。

こうした輻輳制御は End-to-End 間で行われるため、トラフィックの一時的な過負荷によりルータ/スイッチにおいて発生したバッファオーバーフローによるパケットロスでも

輻輳制御が働く。特に End-to-End 間の論理的距離が遠い場合には、輻輳検知による大きな転送レート減少の後、転送レート回復に時間がかかり元の転送レートに戻るのが遅れてしまう。

恒常的に輻輳が発生している状況であるならば、End-to-End 間の輻輳制御を働かせなければ根本的な輻輳の解消は難しい。しかし、トラフィックの一時的な過負荷状況においては、その過負荷状況を避けることができるならば、End-to-End 間の輻輳制御を働かせる必要がなくなり不必要な転送レートの減少を抑止できる。更に、損失パケットの再送をする場合には、その再送負荷も軽減できるため、ネットワークリソースの利用効率を改善することができる。従って、こうした一時的な過負荷状況によって発生したバッファオーバーフローによるパケットロスを回避する方式を検討することは重要である。

トラフィックの一時的な過負荷状況を避けるには、その負荷を時間的に分散させれば良い。これによりトラフィックの平滑化が行われ、バッファオーバーフローによるパケットロスを避けることが可能である。このような目的を達成するために IEEE802.3x では流量制御規格ポーズ機能が議論され、標準化されている[6]。ポーズ機能は、送信停止時間を記したポーズフレームを、トラフィック送信を一時的

に抑えたい Network Interface Card (NIC) へ送信し、その送信停止時間（ポーズ時間）だけ、トラフィックの送信を停止させるものである。

本稿では、流量制御規格ポーズ機能に着目し、制御パケットの送出数を最小化しつつバッファオーバーフローによるパケットロスを回避する方式の検討を行い、その特性評価を行う。

2. 関連技術

ポーズ機能は、全二重型イーサネットリンクにおいて一時的な過負荷状態によるバッファオーバーフローのために、パケットロスが発生するのを防ぐことを目的として設計されたものである。この方式では、エンドステーションペア間、スイッチとエンドステーション間、スイッチ間のリンクにおいて単純なフロー制御を行う。ポーズ動作は単純な「停止・再開型」である。図 1 に示すように、一時的にトラフィックを抑えたい NIC へポーズフレームを送信し、送信待ち時間をパラメータで指定する。ポーズフレームを受信した NIC は、フレームのパラメータに指定されている期間、データフレームの送信を停止する。ポーズは、最後に届いたパラメータが有効になるため、パラメータに 0 を指定すれば残りのポーズ時間をキャンセルすることができる。また、最初のポーズ期間を超過する前に 0 でない時間をパラメータに指定すればポーズ期間を延長することができる。

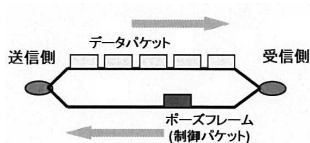


図 1 ポーズ機能

ポーズフレームのフォーマットを図 2 に示す。パラメータに、ポーズ時間を指定する。ポーズ時間は、512 ビット時間を 1 単位として指定し、その範囲は 0x0000～0xffff (65535)である。つまり、受信側はポーズ時間に、現在使用しているデータレートでの 512 ビット時間を乗じた期間だけ送信側をポーズ（待機）する。例えば、ポーズ時間に最大値の 0xffff が指定された場合、 $512 \times 65535 = 33553920$ ビットを転送する時間だけ停止する。リンク速度の変化に対するポーズ機能による最大送信停止時間の変化を表 1 に示す。リンク速度が高速となるに従って送信停止時間は短縮し、ポーズ機能の効果が低減する。

ポーズ機能は、送信停止による流量制御を行う。そのため、送信側に送出すべき情報があり、受信側のバッファが空であるにも関わらず、送信側から情報が送出されないバッファアンダフローが起こる可能性がある。バッファアン

ダフローは、通信性能の劣化を意味するため、発生を抑止しなければならない。

Destination MAC Address		
Source MAC Address		
Type	OP code	Pause time

MAC: Media Access Control
OP: Operation

図 2 ポーズフレームフォーマット

表 1 ポーズ機能による最大送信停止時間

リンク速度	送信停止時間
10Mbps	3.36s
100Mbps	336ms
1Gbps	33.6ms
10Gbps	3.36ms
100Gbps	336μs

3. 検討方式

ポーズ機能を用いたパケットロス回避方式として 2 つの方式を検討する。ポーズのオンとオフの 2 状態で制御を行うポーズ On-Off 制御方式とポーズ時間をネットワーク状況に合わせて計算するポーズ時間制御方式である。

3.1 ポーズ On-Off 制御方式

送信側を送信停止・再開にするポーズ・オン／オフの 2 状態の間をルータ／スイッチのキュー長に応じて遷移する方式である。ポーズのオン・オフ状態は、オン・オフを記したポーズフレームを送ることにより、制御を行う。図 3 にポーズ On-Off 制御方式のバッファ管理方法を示す。ポーズのオン・オフの 2 状態を制御するために、ルータ／スイッチのバッファに高・低の 2 つの閾値を設定する。バッファ内のキュー長が高閾値を超えたら、ポーズ時間に最大値「0xffff」を指定したポーズフレームを送信側に送り、送信停止を行う。これにより、バッファオーバーフローによるパケット損失を抑制する。この状態をポーズ・オン状態と呼び、送信側はトラフィックを送出しない。そのため、パケットはデキューを続け、バッファのキュー長は減少する。キュー長が低閾値まで減少したら、ポーズ時間に最低値 0x0000 を指定したポーズフレームを送信側に送り、送信停止をキャンセルする。この状態をポーズ・オフ状態と呼び、送信が再開することによってバッファアンダフローを回避する。図 4 にポーズ On-Off 制御方式の状態遷移図を示す。

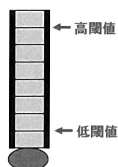


図 3 ポーズ On-Off 制御方式

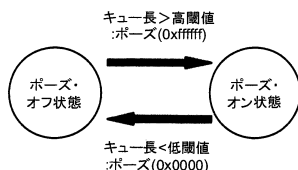


図 4 ポーズ On-Off 制御方式状態遷移図

3.1.1 ポーズ On-Off 制御方式の検討課題

ポーズ On-Off 制御方式では、キュー長が高閾値を超えた時に制御パケットであるポーズフレームを送出し、同様にキュー長が低閾値を下回った時も制御パケットであるポーズフレームを送出する。制御パケットは、TCP のトラフィックも使用し、輻輳制御を用いたストリーミングメディアを転送する UDP のトラフィックも使用する。インターネットのブロードバンド化に伴いマルチメディア・ストリーミング技術が普及し、こうした制御パケットを用いた通信が増加したことにより、制御パケットのオーバーヘッドがネットワーク輻輳を増長させてしまう問題がある。RFC1889 [5]でもこの問題が取り上げられ、制御パケット数を減少させる必要性が指摘されている。そのため、もしポーズ時間の設定を調節することにより、制御パケット数を減少させることができるならば、ポーズ時間調節による方式は有効な方式である。しかし、ポーズ時間調節による方式では、キュー長の変化率にしたがってポーズフレーム内に記入するポーズ時間を決める必要がある。この変化率はパケットのバッファへの入力速度とバッファからの出力速度の割合で決定される。この入力速度と出力速度は時間と共に各々変動するため、キュー長の変化率も常に変動していることになる。こうしたトラフィックの変動に対応してポーズ時間を計算することが要求される。

また、ポーズ On-Off 制御方式では、送信側の送信停止と再開をポーズフレームによって制御できれば十分であるため、停止と再開を指示する 2 状態がわかればよい。しかしながら、ヘッダー中のポーズ時間を設定するフィールドは、0x0000~0xffff の範囲で設定できるため、このフィールドを有効に活用すれば、より多くの情報を単一の制御パケットで伝達できる。

以上より、以下の特徴を持った方式が求められる。

- ・ 設定するポーズ時間の調整により、バッファオーバー

フローとアンダフローを避ける。

- ・ 制御パケット（ここではポーズフレーム）の数を減少する。
- ・ トラフィックの変動に対応してポーズ時間を計算し、設定する。

3.2 ポーズ時間制御方式

ネットワークの状況に従って、バッファオーバーフローとアンダフローを避けるようにポーズ時間を計算し、送信側の送信停止を行う方式である。ポーズ時間が経過すれば送信が再開されるため、ポーズ・オフにするための制御パケットが不要になり、制御パケットの減少を見込める。しかし、バッファアンダフローを発生させずに輻輳を回避するためには、過大なポーズ時間にならないように注意が必要である。

図 5 にポーズ時間制御方式のバッファ管理方法を示す。バッファに 1 つの閾値を設定し、キュー長が閾値を超えたらポーズフレームを送出する。これにより、バッファオーバーフローによるパケットロスを抑制する。ターゲットキュー長は、ポーズ機能の送信停止により閾値から減少させるキュー長であり、 Q_{diff} はその差分量[bit]である。ターゲットキュー長と差分量は、閾値が決定すれば求める固定値である。

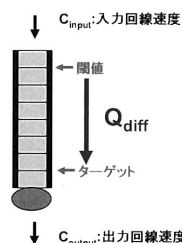


図 5 ポーズ時間制御方式

ポーズフレームに設定するポーズ時間は、ネットワーク状況を考慮し、差分量 Q_{diff} を用いて計算した値を使用する。ポーズ時間の計算には、キュー長の変化率を考慮する必要がある。この変化率はバッファへのデータ入力速度とバッファからのデータ出力速度の割合で求まる。それぞれの速度はネットワーク状況に応じて変化するため、正確な速度を求めるには常に単位時間あたりのデータ転送量を計測する必要がある。そのため、計算負荷が高く計測値を保持するメモリが必要になる。そこで、ここでは固定値である入力回線速度に注目し、この値を用いてポーズ時間を求めることを検討する。ここで、 C_{input} は入力回線速度とし、 T_{cur} は新たにポーズフレームを送出しようとしている時間とする。つまり、キュー長が閾値に達した時間を示す。 T_{sent} は直前にポーズフレームを送った時間であり、 R は重み付け

パラメータを示す。この時、キュー長を閾値からターゲットキュー長まで減少させるために必要となる時間 P_{time} を(1)で求め、設定するポーズ時間を(2)で求める。

$$P_{time} = R * \frac{2Q_{diff}}{C_{input}(T_{cur} - T_{sent})} * \frac{Q_{diff}}{C_{input}} \quad (1)$$

$$T_{pause} = \frac{P_{time} * C_{input}}{512} = \frac{RQ_{diff}^2}{128C_{input}(T_{cur} - T_{sent})} \quad (2)$$

(1)は、 Q_{diff} を C_{input} で転送する時間を基準に、ポーズフレームを送出した時間から新たに送出しようとしている時間の差($T_{cur}-T_{sent}$)と Q_{diff} を C_{input} で転送した時間の2倍($2Q_{diff}/C_{input}$)の割合を掛け、それに重み付けをしたものである。 $2Q_{diff}/C_{input}$ が示すものは、キュー長が閾値からターゲットキュー長まで減少して、その後増加し再度閾値まで達した時間である。 R は、ネットワーク管理者がネットワークの構成などを考慮して設定する固定値である。また、 Q_{diff} と C_{input} も同様に固定値である。(1)で変動する値は、 $T_{cur}-T_{sent}$ だけである。この値が小さければ、単位時間当たり大量のトラフィックが到着しバッファオーバフローが発生する可能性が高いと判断し、より大きいポーズ時間を設定する。(1)で得た計算値を実際に設定するポーズ時間は(2)によって換算する。

更に、ポーズ時間制御方式で設定するポーズ時間の範囲を限定する。その最大値と最小値は(3)で与えられる。

$$T_{pause} = \begin{cases} Q_{diff}/512 & \text{if}(T_{pause} \leq Q_{diff}/512) \\ T_{pause} & \text{if}(Q_{diff}/512 < T_{pause} < 65535) \\ 65535 & \text{if}(T_{pause} \geq 65535) \end{cases} \quad (3)$$

最小値は $Q_{diff}/512$ である。パケット出力速度よりパケット入力速度が速いためにキュー長が増えたと考えられるので、最小値として入力回線速度で Q_{diff} ビットを転送する時間だけ送信停止する時間を設定する。最大値は、ポーズ時間で設定できる最大値である。

また、バッファサイズやキュー長がパケット数 n で扱われているシステムの場合は、(1)から(3)を $Q_{diff}=n*PacketSize_{ave}$ と置き換えれば同様に適用可能である。ここで、 $PacketSize_{ave}$ は平均パケット長を示す。

4. 特性評価

検討したポーズ On-Off 制御方式とポーズ時間制御方式について特性評価を行う。ここでは、コンピュータシミュレーションを行い、図6に示す入力ポート数 N 、出力ポート数 N のルータ/スイッチを想定する。 N は任意の整数である。シミュレーションパラメータを表2に示す。入力トラフィックの到着はポアソン分布に従い、ネットワーク負荷の変化に対する2つの検討方式の特性を評価する。パケットの宛先は各アウトポートポートヘランダムに決定されるものとした。また、ポーズ On-Off 制御方式における高閾値

と低閾値は900パケット及び100パケットとし、ポーズ時間制御方式における閾値は900パケット、ターゲットキュー長は100パケットとした。パケットロス率、制御パケット数、ポーズ設定時間の最大値と最小値について特性評価を行う。

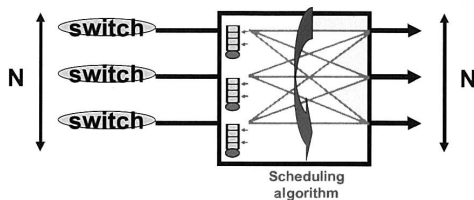


図6 シミュレーショントポロジ

表2 シミュレーションパラメータ

項目	説明
スイッチタイプ	N×Nスイッチ
バッファタイプ	FIFO
バッファサイズ	1000パケット
回線速度	1Gbps
パケットサイズ	1518バイト
シミュレーション時間	10000000パケット時間
スケジューリングアルゴリズム	待ち時間の長いパケットを優先

4.1 パケットロス率

図7は、ポーズなし・ポーズ On-Off 制御方式・ポーズ時間制御方式についてのネットワーク負荷に対するパケットロス率の変化を示す。ポーズ On-Off 制御方式・ポーズ時間制御方式ともパケットロスの発生は観察されなかった。これはポーズ機能を使用しているため、バッファオーバフローによるパケットロスが発生する前に、スイッチからポーズフレームが送出され、送信側が送信停止したためである。これにより、バッファのキュー長は減少し、パケットロスは発生しない。対照的に、ポーズなしの場合はスイッチサイズ N が大きくなるにつれてパケットロス率が上昇している。これは異なるインポートポートへ入ってきた複数のパケットの宛先が、同じアウトポートポートとなり重なる確率がポート数の増加に従って増えるためである。そのため、バッファのキュー長が減少しにくくバッファオーバフローとなり、パケットロスが発生する。

また、バッファアンダフローについても評価を行ったが、評価の対象としたネットワーク負荷0.6以降で、いずれの方式でも、その発生は観察されなかった。これは、ポーズ時間制御方式で発生する可能性のあるバッファアンダフローを抑止できたことを示す。

以降の評価では、スイッチサイズ N の変化に対して検討方式の特性の傾向に大きな変化がないため、 N が8の時の評価結果について記す。

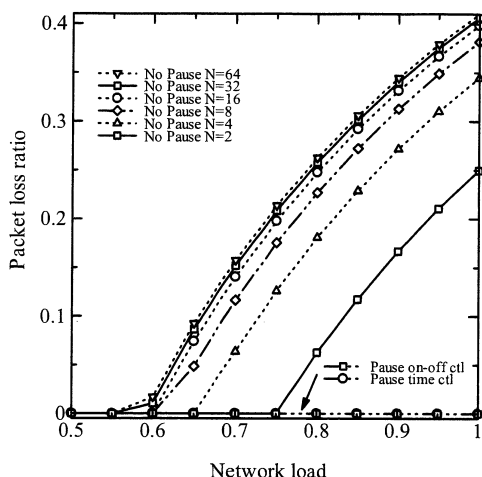


図 7 パケットロス率

4.2 制御パケット数

ネットワーク負荷およびRの変化に対する制御パケット数を表3に示す。ここでは、制御パケット数は、送出したポーズフレームの数を示す。

ネットワーク負荷が0.6以下では、制御パケット数は両方式とも0である。これは、バッファのキュー長が、ポーズ On-Off 制御方式の高閾値及びポーズ時間制御方式の閾値を超えることがなく、制御パケットを送出することがなかったためである。ポーズ時間制御方式は、ポーズ On-Off 制御方式に比べてRの値が大きくなるにつれて制御パケット数を減少する。Rが4の時、制御パケット数が半数未満になり、Rが10以上の時、ポーズ On-Off 制御方式と比べて制御パケット数を約70%減少することが可能である。

4.3 ポーズ設定時間の最大値・最小値

表4は、ネットワーク負荷に対してポーズ時間制御方式によって計算したポーズ時間の最大値と最小値を示す。ポーズ On-Off 制御方式が設定したポーズ時間の最大値と最小値はそれぞれ65535と0であり、ポーズ時間に指定できる範囲の最大値と最小値と同じである。

ネットワーク負荷が0.6以下では、ポーズフレームの送出が無いため、ポーズ時間の設定はない。ポーズ時間制御方式における最小値は、(3)より Q_{diff} の値に制限される。ここではパケット長が1518 Byteであるため、最小値は $1518[\text{byte}] * 800[\text{packet}] * 8[\text{bit}] / 512[\text{bit}] = 18975$ となり、ポーズ時間制御方式におけるポーズ時間の範囲は18975～65535となる。Rが1の時は、計算したポーズ時間が小さいため、ポーズ時間制御方式の最小値に補正されて送出される。そのため、最大値と最小値がともに18975となる。Rが大きくなるにつれて、最大値と最小値の差が大きくなっていく。これは、最大値と最小値の間でネットワーク状況に合わせてポーズ時間が計算され設定されていることを示す。Rが10以上になると最小値が最大値に近くなっていく。これは、1つのポーズフレームによる送信停止時間が長くなり、バッファアンダフローの発生する可能性が高くなることを示す。そのため、Rの設定には考慮が必要である。

4.4 考察

以上の評価より、ポーズ時間制御方式とポーズ On-Off 制御方式はパケットロスを抑制できることが確認された。制御パケットの送出数は、ポーズ時間制御方式を用いることで、重み付けRの値によってポーズ On-Off 制御方式の半数未満に低減することが可能であることが確認できた。また、4.3節で行った設定されるポーズ時間の最大値・最小値の評価より、ポーズ時間制御方式は、ネットワークの状況に応じてポーズ設定時間を変化させていることが観察できた。

表 3 制御パケット数

ネットワーク負荷	0.6	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.0
ポーズ On-Off 制御方式	0	47008	47088	47120	47120	47136	47128	47136	47136
ポーズ時間制御方式(R=1)	0	38048	38120	38136	38152	38152	38160	38152	38160
ポーズ時間制御方式(R=2)	0	30504	30600	30560	30640	30472	30664	30648	30600
ポーズ時間制御方式(R=3)	0	24984	25056	25072	25016	25080	25016	25048	25048
ポーズ時間制御方式(R=4)	0	21784	21824	21832	21832	21840	21840	21840	21840
ポーズ時間制御方式(R=5)	0	20089	20128	20136	20136	20144	20144	20144	20144
ポーズ時間制御方式(R=6)	0	19040	19072	19080	19080	19080	19088	19080	19088
ポーズ時間制御方式(R=7)	0	18152	18184	18184	18192	18192	18192	18192	18192
ポーズ時間制御方式(R=8)	0	17392	17416	17424	17424	17424	17424	17432	17424
ポーズ時間制御方式(R=9)	0	16720	16752	16752	16760	16752	16760	16760	16760
ポーズ時間制御方式(R=10)	0	16133	16160	16168	16168	16168	16168	16168	16176
ポーズ時間制御方式(R=11)	0	15674	15704	15704	15712	15712	15712	15712	15712
ポーズ時間制御方式(R=12)	0	15675	15704	15712	15712	15712	15712	15712	15712

表 4 ポーズ時間制御方式におけるポーズ設定時間の最大値・最小値

R	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.0
1	(max.)	None	18975	18975	18975	18975	18975	18975	18975
	(min.)	None	18975	18975	18975	18975	18975	18975	18975
2	(max.)	None	33451	33307	31220	32324	30740	30020	29972
	(min.)	None	18975	18975	18975	18975	18975	18975	18975
3	(max.)	None	49937	48689	45882	46146	37843	36355	36115
	(min.)	None	18975	18975	18975	18975	22941	23661	23589
4	(max.)	None	65535	65535	60952	49217	36139	38875	46290
	(min.)	None	18975	18975	18975	23397	31556	30860	28532
5	(max.)	None	65535	65535	65535	46458	40698	48905	58240
	(min.)	None	18975	18975	21333	30788	37483	35059	32036
6	(max.)	None	65535	65535	65535	47825	49817	58024	65535
	(min.)	None	18975	18975	25844	36283	40818	38299	35659
7	(max.)	None	65535	65535	62247	53177	57664	65535	65535
	(min.)	None	18975	18975	31964	42138	44802	41730	42042
8	(max.)	None	65535	65535	65271	57328	64935	65535	65535
	(min.)	None	18975	21573	35587	47873	48377	47849	48281
9	(max.)	None	65535	65535	65535	60904	65535	65535	65535
	(min.)	None	18975	24501	41202	52529	52817	53753	53681
10	(max.)	None	65535	65535	65535	63231	65535	65535	65535
	(min.)	None	18975	27692	42138	60832	59008	59488	60616
11	(max.)	None	65535	65535	65535	65535	65535	65535	65535
	(min.)	None	18975	30476	47561	63831	64695	65391	65247
12	(max.)	None	65535	65535	65535	65535	65535	65535	65535
	(min.)	None	18975	33403	50657	65535	65535	65535	65535

5. 結論

トラフィックの一時的な過負荷状況によって発生するバッファオーバーフローを抑制しパケットロスを回避することは、ネットワークリソースの利用効率を改善する上で重要である。また、制御パケットによるオーバーヘッドを減少させることは、ネットワークの輻輳を軽減する効果があるため考慮すべき課題である。

本稿では、流量制御規格ポーズ機能に着目し、ポーズ On-Off 制御方式およびポーズ時間制御方式を検討した。特性評価より、両方式は、バッファオーバーフローとバッファアンダフローを回避しパケットロスを抑制する方式であり、ポーズ時間制御方式は更に制御パケットによるオーバーヘッドを大きく減少させることが可能である。そのため、輻輳制御を伴ったアプリケーションが多くなる今後のインターネットにおいて、ネットワーク全体のリソースを改善する上で、ポーズ時間制御方式は有効である。

今後の課題として、ポーズ機能の送信を輻輳の初期兆候として利用し、実際にパケットロスが発生する前に End-to-End の輻輳制御を働かせる手法の検討が挙げられる。これにより、損失パケットの再送をさらに減少し、ネットワークリソースの更なる有効利用が可能になると考えられる。

参考文献

- [1] C. Perkins, "RTP: Audio and Video for the Internet," Addison-Wesley, 2003.
- [2] M. Handley, J. Padhye, S. Floyd, and J. Widmer, "TCP Friendly Rate Control (TFRC): Protocol Specification," IETF, RFC 3448, January 2003.
- [3] S. Floyd, M. Handley, J. Padhye, and J. Widmer, "Equation-Based Congestion Control for Unicast Applications," Proc. of SIGCOMM 2000, August 2000.
- [4] R. Rejaie, M. Handley, and D. Estrin, "RAP: An End-to-End Rate-Based Congestion Control Mechanism for Real-time Streams in the Internet," Proc. of IEEE Infocom 99, March 1999.
- [5] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, and V. Jacobson, "RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications," RFC 1889, January 1996.
- [6] Annex 31 B, "Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specification", IEEE standard 802.3, 1998 Edition.