

通信路の品質変化に適応する自動通信制御機構の評価

野口 裕介[†] 谷口 秀夫[‡] 牛島 和夫[‡]

[†]九州大学大学院システム情報科学研究科

[‡]九州大学大学院システム情報科学研究院

計算機環境や通信環境の発達により、様々な性質を持つ複数の通信路を、同時に利用することが可能となってきた。我々は通信路の品質変化に適応するための通信方式を提案している。本稿では、提案する通信方式を利用した通信実験の評価について述べる。まず、通信時間と通信効率を最大とするウィンドサイズの導出式について説明する。次に、複数の通信環境と通信条件の下で、ウィンドサイズ固定の場合と最適ウィンドサイズを用いた場合の通信時間を測定した。測定により、最適ウィンドサイズによる制御を行うことで、通信時間の増大を抑えることができる事を示した。また、最適ウィンドサイズによる制御を簡略化する場合には、通信路の転送速度に比べ、計算機性能が高いと仮定して制御を行う方が通信時間の増大をより低く抑えることができる。

キーワード: 衛星通信, 通信制御手順, QoS

Evaluation of Communication Control Mechanism to Fit the Quality Change of Communication Automatically

Yusuke Noguchi, Hideo Taniguchi and Kazuo Ushijima

Graduate School of Information Science and Electrical Engineering Kyushu University

By the development of computing environment and communication environment, it is possible to use more than one communication line having various nature simultaneously. We have been proposing the data transfer protocol that can avoid to degrade the capacity of communication. In this paper, we describe evaluation of communication time on the network that simulates a wireless communication. First, we formulate a communication time and optimum window size that avoid to degrade the capacity of communication. The relation between communication environment and quality of communication decides the optimum window size. By our experimentation, we show that the control mechanism is succeeding.

Keywords: Satellite communication, Communication Protocol, QoS

1 はじめに

近年、計算機の高機能化や通信機器の低価格化に伴い、通信路を利用した計算機の利用が広がっている。一方、通信回線としては、従来のイーサネット型 LAN に加え、無線 LAN、電話回線、ISDN、および衛星通信などが利用可能になってきている。また、ハードウェアの低価格化や小型化が進んでおり、計算機の利用形態も様々に変化しつつある。このため、今後、1つの計算機が複数の通信回線を有し、それらを同時に利用するような環境が考えられる。しかしながら、計算機が複数の通信路を持つ場合、各通信路の性質は異なることが多い。例えば、有線通信路の場合、その通信品質は高くかつ安定している。これに対して、無線通信路の場合、障害物の影響により通信品質が急激にかつ大きく変動するという性質がある。また、通信速度に関しては、無線通信路と比べ有線通信路の方が高速である事が多い。このように性質が大きく異なる通信路を同時に有する場合、従来の単一の通信路のみを想定した通信制御では効率的なデータ通信を行うことは困難である。

我々は複数の通信路を有する計算機間で、この複数の通信路を活かして効率の良いデータ通信を行う方式を検討している。通信路の性質は、データ転送の「速度」と「遅延」そして「品質」で決定できる。ここで速度とは通信路のハードウェアが提供するデータ転送速度であり、遅延とは送受信時に発生するデータ通信の遅れであり、品質とは通信誤りの発生頻度である。一般に、これらは時刻要素を持ち、通信路の i の時刻 t における値として、速度を $S_i(t)$ 、遅延を $D_i(t)$ 、品質を $Q_i(t)$ と表現できる。つまり、通信路 i の時刻 t における有効通信速度は、 $L_i(S_i(t), D_i(t), Q_i(t), P_i, W_i)$ となる。ここで、 P_i と W_i はそれぞれ、通信制御手順における最大パケット長およびウィンドサイズである。この有効通信速度を利用して、複数の通信路におけるデータ通信を制御できる。

有効通信速度に影響を与える項目の中で、品質の時刻変化が最も大きい。特に衛星通信路のような無線通信路ではそれが顕著である [1][2]。そこで我々は、これまでに通信路の品質変化に

適応する通信制御手順である FCC 通信制御手順を提案し、実装を進めてきている。

以降、第2章では、通信路の品質変化に適応する通信制御機構を示し、第3章では、改善対象の通信条件としてウィンドサイズに着目し、通信時間と通信時間を最短とする最適ウィンドサイズの導出式について述べる。さらに、通信制御機構の実装を考慮した、最適ウィンドサイズの近似式について述べる。第4章では、ATM 網上に構築した擬似衛星通信路上でのデータ送受信において、近似式に基づく通信条件の制御を用いることで、実際にデータ送信効率を向上させることが可能である事を示す。

2 通信路の品質変化に適応する通信制御機構

通信路の品質変化に適応する基本機構を Fig.1 に示し、その概要を以下に説明する。

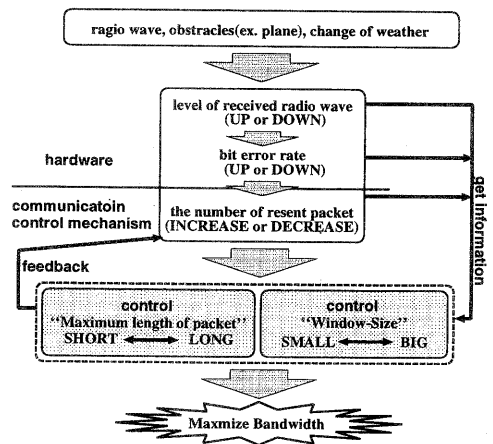


Fig. 1 Mechanism

(原因) 通信路の品質変化は、電磁波や障害物により変化する。

(現象) 通信路の品質変化により、受信信号レベル、ビット誤り率、パケット再送率および通信容量が変化する。

(対処) 受信信号レベル、ビット誤り率、パケット再送および通信容量の変化に合わ

せ、最大パケット長やウィンドサイズを制御する。この制御を改善制御と名付ける。
(目的) 改善制御により、通信容量を最大化する。

以上の制御により通信容量を最大化するためには、改善制御の規則が非常に重要である。改善制御においては、現在の通信路の品質に合わせた改善ではなく、今後の通信路の品質を予想した改善が有効と考えられる。このためには、

- (予想材料) 何を材料に予想するか?
- (予想手段) どのようにして予想するか?
- (改善対象) 何を変更して改善するか?
- (改善内容) 具体的な改善の内容は?

を検討する必要がある。

予想材料としては、受信信号レベル、ビット誤り率、パケット再送および通信容量がある。改善対象は通信制御手順に依存する項目であるから、通信制御手順と関係が深いパケット再送や通信容量を予想材料とすれば、その変化を把握しやすく、改善対象への処理も速やかに行える。一方、受信信号レベルやビット誤り率は、パケット再送や通信容量に比べ、通信路の品質変化の原因に近い層での変化である。このため、これらを予想材料とすれば、より確実に、かつ早い時間に通信路の品質変化を把握できると思われる。

予想手段として、時間の1次微分(単位時間前と現在との差)により、単位時間後を予想する。さらに、時間の2次微分により予想することも考えられる。

改善対象は、Fig.1に示したように、最大パケット長やウィンドサイズである。通信制御手順の実装を考慮すると、最大パケット長の変更よりウィンドサイズの変更が容易である。このため、ウィンドサイズの変更を優先的に行い、不十分な場合に、最大パケット長の変更を行う。

改善制御を明らかにするためには、予想材料と通信容量の関係を明らかにする必要がある。

以降では、通信制御機構の実装を考慮した、通信時間および通信時間を最小にするウィンドサイズ(以降、最適ウィンドサイズと呼ぶ)の定式化と近似式導出について述べる。

3 通信時間の定式化

文献[3]に示すように、通信の流れをモデル化し、通信時間に影響を与える要素を変数として仮定することにより、通信時間 T は、以下の式で表される。

$$T = (aW + b) \left(\frac{V}{W} + 1 \right) \frac{D}{(P - Lc)V} \quad (1)$$

また、この通信時間を最小とするウィンドサイズ(以降、最適ウィンドサイズとする) W_0 は、以下の式で表される。

$$W_0 = \sqrt{\frac{b}{a} \times \frac{\frac{1}{e\mu} - Lc}{P}} \quad (2)$$

ここで、各変数の意味は以下の通りである。

- P : 最大パケット長 (単位: bit)
- W : ウィンドサイズ
- D : 送信データ総量 (単位: bit)
- Lc : コマンドパケット長 (単位: bit)
- e : 通信路の初期品質
- μ : 通信路の品質劣化度
- V : 送信パケット数

また、変数 a, b は、計算機と通信路との性能関係により決定される係数である。具体的には、送信側計算機のデータ送信処理時間、通信路のデータ転送処理時間、および受信側計算機のデータ受信処理時間の大小関係による。このため、変数 a, b は、送信および受信処理命令数や通信遅延を含む。従って、通信制御機構を実現する場合、これらに関する具体的な値の決定は、以下の理由により困難である。

- (1) 処理命令数は、通信制御機構が動作するプロセッサや実行プログラムを生成するコンパイラの種類や版毎にそれぞれ異なる。また、通信を行う際に、他計算機の情報を取得する必要がある。
- (2) 通信遅延は、わずかな差異が最適ウィンドサイズの結果に大きな影響を与えるため、正確な値を要求される。仮定した値が実際の値から大きく外れると、かえって通信効率を悪化させる恐れがある。

そこで、(式2)からこれらの変数を排除することを試みる。

通信速度 t の通信路において、ウィンドサイズ (W) が 1 の時、送信データ総量 D のデータ送受信に要した時間を $T_{t,W=1}$ とすると、(式 1) より (具体的には文献 [3] 参照) 通信遅延 d は以下の式で表される。

$$d = \left(\frac{(P-Lc)T_{t,W=1}}{D} - \frac{P}{t} - \frac{Ids}{Ps} - \frac{Idr}{Pr} - \frac{Ics}{Pr} - \frac{Lc}{t} - \frac{Icr}{Ps} \right) \times \frac{1}{2} \quad (3)$$

ここで、変数 Ids, Idr, Ics, Icr はそれぞれ、データ送信命令数、データ受信命令数、コマンド送信命令数、コマンド受信命令数である。また、変数 Ps, Pr はそれぞれ、送信側および受信側計算機のプロセッサ性能である。(式 2) と (式 3) より、計算機の性能に比べて通信路の性能が低い場合における最適ウィンドサイズは、以下の式で表される。

$$W_{03} = \sqrt{\left(\frac{t(P-Lc)T_{t,W=1}}{PD} - 1 \right) \frac{\frac{1}{e\mu} - Lc}{P}} \quad (4)$$

(式 4) により、処理命令数と通信遅延を要素として含まない式で最適ウィンドサイズを予測することができ、通信制御機構の実現が可能になる。

4 実測と評価

4.1 擬似衛星通信路

測定のため、擬似衛星通信路環境を作成した。擬似衛星通信路環境の概要を Fig.2 に示し、以下に説明する。通信を行う各計算機に、衛星通信環境を擬似する擬似通信路環境処理部を置く。FCC 通信制御手順に基づいた通信を行うプロセス (FCC プロセス) は、送信データを擬似通信路環境処理部に渡す。計算機間の通信は、擬似通信路環境処理部が行う。擬似通信路環境処理部は、通信誤りを発生したり、送信時に任意の通信待ちを生じさせることで通信遅延を制御する。擬似通信路環境処理部で発生する通信誤りは、以下の契機で発生することができる。

(1) ランダム：指定した発生頻度で無作為にパケットを消失させる。

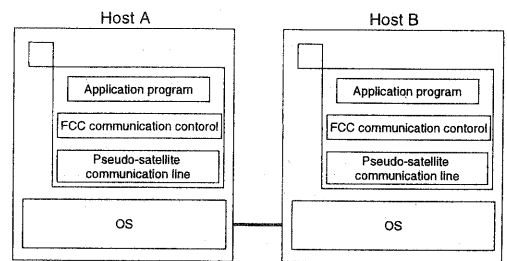


Fig. 2 Pseudo-satellite communication line

(2) 発生周期指定：あらかじめ指定した、パケット数間隔に従ってパケットを消失させる。

(3) 発生時間指定：あらかじめ指定した、通信開始からの時間契機に従ってパケットを消失させる。

(3) の契機では、パケットを消失させる時間契機のデータとして、実際の衛星通信路を用いた場合の通信記録を利用することもできる。

FCC プロセスから擬似通信環境処理部へのデータ送信時間を d_i 、計算機間通信での実遅延時間を d_r 、擬似通信環境処理部で発生する通信待ちを d_s とすると、FCC プロセスから見た通信遅延 d は、 $d = d_i \times 2 + d_r + d_s$ となる。

以降では、最大通信速度 155Mbps の ATM 網を用い、複数の通信速度と通信品質下での通信実験における測定結果を示す。

4.2 測定環境

擬似衛星通信路環境上で我々の提案している FCC 通信制御手順 [3] を用いてデータ量 10Mbytes のデータ送受信を行った。通信誤りはランダムに発生する環境を用いた。測定に用いた計算機および通信路を以下に示す。

- 送受信計算機
 - プロセッサ: Celeron 400MHz
 - オペレーティングシステム: BSD/OS Ver.3.1
 - ATM インタフェースボード: Efficient ENI-155S-MF-PCI
- 通信路
 - ATM スイッチ: Fore RunnerLE 155

Table 1 Communication parameters

parameter :	value	parameter :	value
<i>Ids</i> :	23,000 (instructions)	<i>e</i> :	9.77×10^{-8} (error/bit)
<i>Idr</i> :	18,000 (instructions)	<i>Ps</i> :	4.00×10^8 (instructions/sec)
<i>Ics</i> :	5,000 (instructions)	<i>Pr</i> :	4.00×10^8 (instructions/sec)
<i>Icr</i> :	5,000 (instructions)	<i>Lc</i> :	64 (bits)
		<i>D</i> :	83,886,080 (bits)

ATM switch

- 最大通信速度:155 Mbps

本測定では、ウィンドサイズの制御に着目し、最大パケット長を 1024bits、タイムアウト時間を 1 秒の固定値とした。ただし、測定中にタイムアウトによる再送は発生しなかった。また、予備測定で、CPU のカウンタ機能を利用して *Ids* と *Idr* を調べた。結果は、*Ids* = 23,000, *Idr* = 18,000 であり、通信路の速度によらずほぼ一定であった。最適ウィンドサイズの計算に用いた定数パラメータは、Table1 の通りである。

4.3 最適ウィンドサイズによる制御の効果

測定結果を Fig.3 に示す。Fig.3 のグラフは、横軸が通信路の通信誤り率 (BER: Bit Error Rate)、縦軸がデータ転送にかかった時間である。グラフ中の ‘CPU’ は、通信環境を高速計算機環境と仮定した最適ウィンドサイズの場合であり、‘Line’ は、通信環境を高速通信路環境と仮定した最適ウィンドサイズの場合である。(A) から (E) の順に、それぞれ通信速度が 1Mbps、2Mbps、10Mbps、100Mbps、150Mbps の時のデータの転送時間を示している。グラフ (A),(B),(C) は通信環境が高速計算機環境の場合、グラフ (D),(E) は通信環境が高速通信路環境の場合である。図より以下のことがわかる。

(1) (A) から (E) 全てのグラフで、通信路の品質が高い場合にはウィンドサイズに関係無く、通信時間は比較的短い。しかし、BER が高くなり、 1.0×10^{-5} を超えた辺りから、

ウィンドサイズの値によって通信時間に大きな差が発生している。この時、いずれのグラフにおいても、通信環境に適した最適ウィンドサイズを用いた方が通信時間が短い。したがって、通信路の性能が高い場合と計算機の性能が高い場合のいずれの場合でも、通信誤り率が大きくなると最適ウィンドサイズの効果が大きくなると言える。

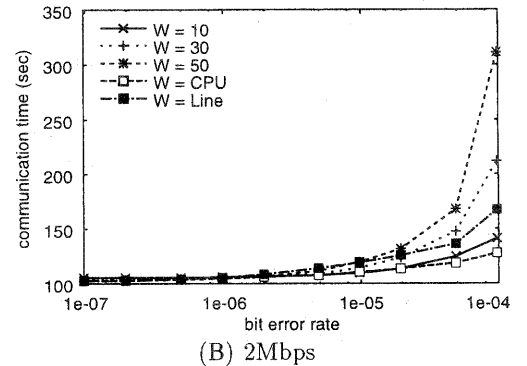
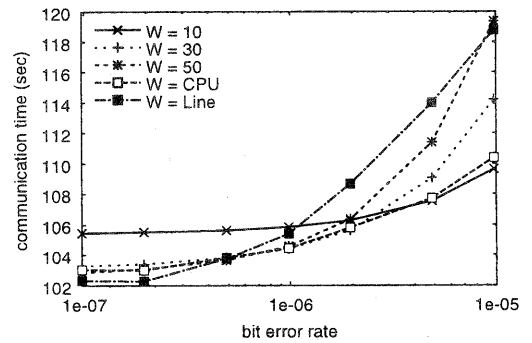
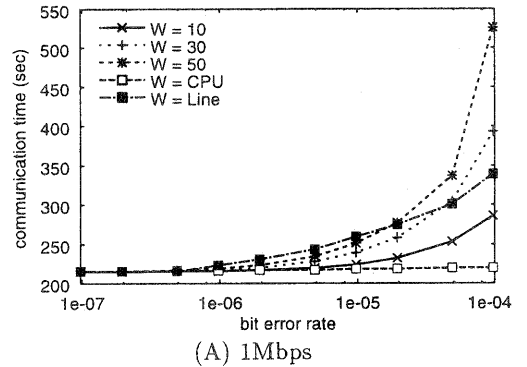
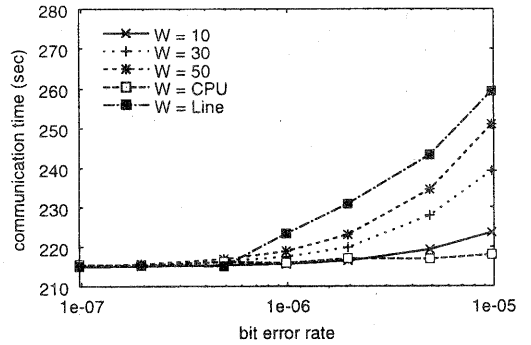
(2) 計算機に対して通信路が高速な場合に、高速通信路環境を仮定した最適ウィンドサイズの制御 (Line) を行うと、BER の変動に対する通信時間の変動はほとんどない。グラフ (D) と (E) をみると、BER が 9.77×10^{-8} の場合と 9.77×10^{-5} の場合では、ウィンドサイズ固定の場合の通信時間は約 90%(150Mbps, $W=50$) から 153%(100Mbps, $W=30$) 増大している。が、高速通信路環境を仮定した最適ウィンドサイズ (Line) の場合の通信時間の増大は、最大で約 0.018% 程度に抑えられている。一方、高速計算機環境を仮定した最適ウィンドサイズの制御 (CPU) では、最大で約 77%(150Mbps)、最小でも約 43%(100Mbps)、増大している。しかしながら、その程度はウィンドサイズ固定の場合ほどではない。次に、通信路が低速な場合では、高速計算機環境を仮定した最適ウィンドサイズの制御 (CPU) を行うことで、BER の変動に対する通信時間の変動は非常に小さい。グラフ (A)、(B)、(C) をみると、BER が 9.77×10^{-8} の場合と 9.77×10^{-5} の場合では、ウィンドサイズ固定の場合での通信時間は約 33%(1Mbps,

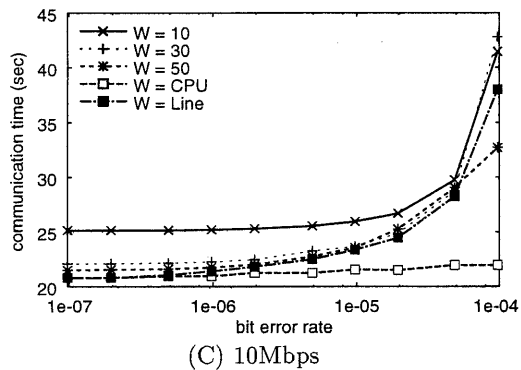
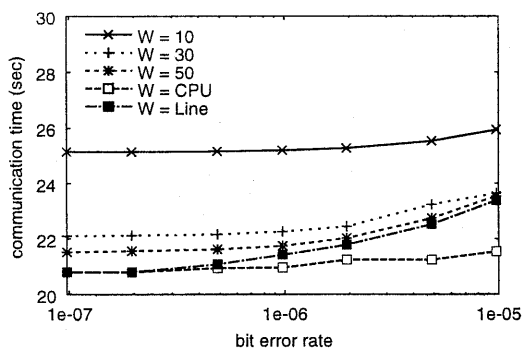
$W=10$) から約 202%(2Mbps, $W=50$) 増大している。対して、高速計算機環境を仮定した最適ウィンドサイズの制御では、通信時間の増大は最大でも 23% 程度である。一方、高速通信路環境を仮定した最適ウィンドサイズの制御では、通信時間は約 60%(1Mbps) から 83%(10Mbps) 増大している。以上より、通信路の性能と計算機性能の相対関係からなる通信環境にあわせた最適ウィンドサイズの制御は効果的であると言える。

- (3) グラフ (A)、(B)、(C) では、高速計算機環境において高速通信路環境を仮定したウィンドサイズ制御を行うと、BER が大きい場合にウィンドサイズを固定としたときよりも通信時間が大きくなっている。一方、グラフ (D)、(E) を見ると、高速通信路環境において高速計算機環境を仮定した制御を行った場合には、ウィンドサイズ固定として制御したときより通信時間が大きくなってはいない。つまり、あらゆる状況下での通信制御を簡略化して行う場合には、通信環境として高速計算機環境を仮定した制御を行う方が、通信時間の増大を小さくできる。
- (4) 通信速度が高速でかつ通信品質が高い場合に、最適ウィンドサイズで送信したときの方が送信時間が大きくなる場合がある。ただし、その差は非常に小さく、10Mbytes の転送で 1 秒以下である。

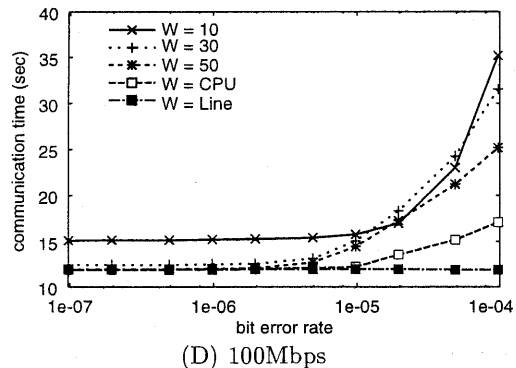
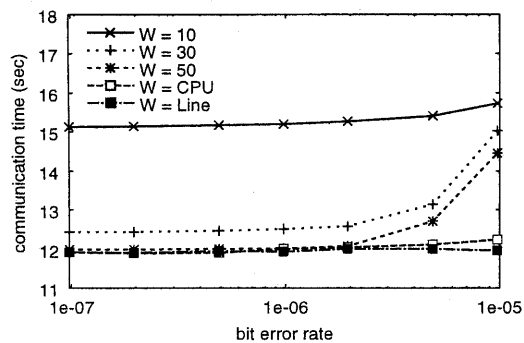
5 おわりに

通信品質と通信時間の関係を定式化し、通信品質の変化に対して最大の通信効率を最大化するため、通信制御手順のウィンドサイズに着目し、最適ウィンドサイズの定式化を行った。最適ウィンドサイズを求める式は、通信速度、データ送信処理時間、データ受信時間の関係で特徴づけられる通信環境により異なる。さらに、提案する通信制御機構の実現を考慮し、特定条件下での通信時間の実測値を利用して、正確な値を取得することが困難な通信遅延や処理命令数

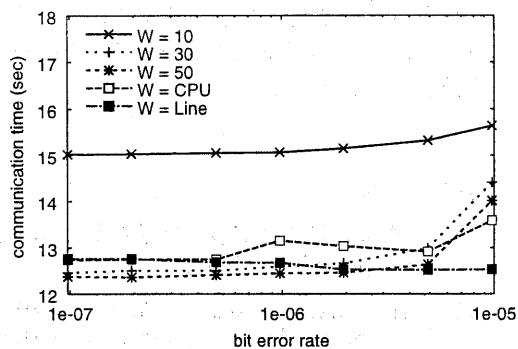




(C) 10Mbps



(D) 100Mbps



(E) 150Mbps

Fig. 3 Relation between BER and communication time

の変数を含まない最適ウィンドサイズの式を導出した。

次に、最大通信速度 155Mbps の ATM 網上に構築した擬似衛星通信路環境でのデータ送受信を行い、通信速度が 1Mbps, 2Mbps, 10Mbps, 100Mbps, 150Mbps として、通信誤り率を 9.77×10^{-8} から 9.77×10^{-5} まで変化させたときに、ウィンドサイズを 10、30、50 の固定した場合と、最適ウィンドサイズを用いた場合での通信時間を測定した。測定から以下の結論を得た。通信路の性能が高い場合および計算機の性能が高い場合のいずれの場合でも、通信誤り率が大きくなると最適ウィンドサイズの効果が大きくなる。また、簡易な対処で大きな効果を得るため、多様な通信路に 1 つの最適ウィンドサイズ計算式で対応するためには、通信環境として高速計算機環境を仮定して制御を行う方が、通信時間の増大を低く抑えられる。

残された課題としては、通信途中に通信品質

を変動させ、変化した通信品質に対する最適ウィンドサイズの動的な設定を行うことの効果を確認することがある。

参考文献

- [1] 大学間共同通信実験, 信学会誌, vol.80, no.5, pp.435-456(1997).
- [2] T.Hatsuda, "Packet Communication Ultra-Small Aperture Terminal System for the Hokkaido Integrated Telecommunication Network," IEEE Trans. MTT, vol.43, no.7, pp. 1692-1698 (1995).
- [3] 谷口秀夫, 野口裕介: "通信路の品質変化に対応する通信制御手順", 信学技法, IN97-151, pp.46-56, 1998.

本研究は、日本学術振興会の未来開拓学術研究推進事業
(プロジェクト番号: JSPS-RFTF96P00603) による。