

音声・ビデオストリーミングIP伝送におけるQoEを考慮したWFQスケジューラの配置

QoE-Based Arrangement of WFQ Schedulers for Audio-Video Streaming IP Transmissison

学生会員 竹尾 淳[†], 田坂 修二[†]

Jun Takeo[†] and Shuji Tasaka[†]

Abstract We propose an effective arrangement of packet schedulers (WFQ and FIFO) that can enhance the QoE of an audio-video streaming transmission over IP networks (typified by IPTV). Previously, the authors examined the relationship between the arrangement of WFQ and application-level QoS and observed that WFQ for all or both edge nodes leads to a high application-level QoS. Now, we have assessed the arrangement in terms of the QoE in addition to application-level QoS. The results show that WFQ on the receiver-side edge in the network satisfactorily enhances the QoE as well as the WFQ on both edges and the WFQ on all nodes. This implies that QoS control in the access network dominates QoE.

キーワード：QoE, 音声・ビデオIP伝送, ストリーミング, スケジューラ配置, WFQ, アプリケーションレベルQoS

1. ま え が き

近年, IPTVやビデオチャット, 地上デジタル放送の再配信など, 音声・ビデオのストリーミングサービスをIPネットワークで提供することに高い関心が寄せられている。これらのサービスが扱うトラフィックには時間構造があり, この構造が乱されるとサービス品質 (QoS: Quality of Service) が劣化し, ユーザの体感品質 (QoE: Quality of Experience)¹⁾ が損なわれる。

IPネットワークの転送機能は階層構造を成しており, 下位から, 物理, ノード (リンク), ネットワーク, エンド・ツー・エンド (トランスポート), アプリケーションの5レベルに分けられる²⁾。QoSの制御・評価項目も, それぞれのレベルごとに定義することができる。最終的なサービスの受け手であるユーザの体感品質, すなわちQoEは, より高い層のQoSとの関連が強い。

QoS制御には数多くの方法がある。近年のネットワーク機器の高機能化・低価格化により実現されたルータのQoS制御機能は, 容易に利用可能な手段である。特に, ノード (リンク) レベルQoS制御に相当するパケットスケジューラは, ノード単体で適用可能であり, 実際にネットワーク

機器の一部に適用されている。しかし, パケットスケジューラを持たないノードや, 管理方針からパケットスケジューラを適用しないノードも存在する。そのため, エンド・エンド間のすべてのノードがパケットスケジューラを適用しているケースは稀である。

これまで, 実際の音声やビデオを想定したトラフィックを転送し, スケジューラの評価を行っている研究には文献3)4)などがある。例えば, 文献3)では, 瞬時的な帯域の公平性がユーザの主観品質の向上には必ずしも結びつかない点に注目し, 少数のユーザのQoSを犠牲にすることにより, 高いQoSを提供できるユーザ数を多く保つ制御を提案し, 評価している。このような評価には, ネットワークレベルの評価尺度, すなわち, IPパケットを単位としたパケット欠落率や遅延ジッタなどの尺度が用いられることが多い。

サービスを提供する際, ユーザー一人ひとりのQoEを高く保つことは重要だが, 個別に調査することは現実的には難しい。したがって, 機械的に測れるQoSパラメータと人により測定されるQoEパラメータとの関係は, 高品質なサービスを提供する上で重要な情報である。すなわち, IPパケットのスループットや欠落率など, ネットワークレベルのQoSパラメータを測定するのみでは不十分であり, ネットワークの転送機能階層の上位に位置するアプリケーションレベルQoSを評価することが重要である*。

2009年5月21日受付, 2009年7月9日再受付, 2009年8月21日採録
†名古屋工業大学 大学院 工学研究科

(〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町1, TEL 052-732-2111)

†Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology
(1, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555, Japan)

*これは, アプリケーションのPDU (Protocol Data Unit) を単位とした測定である。

筆者らは、これまでにエンド-エンド間の一部のノードにノードレベルの QoS 制御技術である WFQ⁵⁾⁶⁾ を適用し、そのノードのネットワーク内における配置がアプリケーションレベル QoS に及ぼす影響を明らかにした⁷⁾。

本論文ではさらに QoE を測定し、アプリケーションレベル QoS との関連を検討をしており、この点が従来研究と異なる。すなわち、本論文では文献⁷⁾ で有効とされたスケジューラの配置から、QoE を高める配置を明らかにする。

以下、2 において、本論文のシミュレーションで用いたノードレベル QoS 制御と QoE パラメータ測定方法を概説する。そして、3 にて測定条件を示し、4 で結果と考察を述べる。

2. ノードレベル QoS 制御と QoE パラメータ測定方法

本論文では、シミュレーションを行った後、QoE パラメータの測定を行う。ノードレベル QoS 制御方法には WFQ スケジューリングを、QoE パラメータの測定には系列カテゴリー法⁸⁾を用いる。

2.1 WFQ スケジューリング

本論文では、ノードレベル QoS 制御として WFQ スケジューラを扱う。WFQ は、GPS (Generalized Processor Sharing) におけるビット単位でスケジューリングを行う仮定を、パケット単位で扱えるように近似したパケットスケジューラである。各パケットの送出は、パケットの重みにパケットサイズを掛けた値を比較し、その値の小さいものから行われる。

これをフローベースのスケジューラと見なすと、WFQ はフローに割り当てる帯域幅を動的に変更するアルゴリズムである。各フローが利用できる帯域幅は、次のように決定される。フローの要求帯域幅の総和が出力帯域幅より狭い場合は、それらの要求帯域幅を利用できる。また、余剰帯域幅は、要求帯域幅が満たされないフローに対し、それらに付与された優先度の割合で再割り当てされる。一方、要求帯域幅の総和が出力帯域幅よりも広い場合は、その瞬間バックログ状態にあるフローの総和に対する、各フローの要求帯域の割合分を利用可能とする。

2.2 系列カテゴリー法

系列カテゴリー法は、QoE を定量的に評価するための計量心理学的測定法の一つである。まず、評価尺度法による評価を行う。実験者が複数段のカテゴリーをあらかじめ設定し、被験者は評価対象 (刺激と呼ぶ) をそのカテゴリーに分類する。評価の段数は、評価の簡単さや精度などから、5 ないし 7 が一般的に用いられる。

分類により得られた結果は、品質の順序のみを表す順序尺度である。統計的処理を施すには距離尺度の尺度水準を満たす必要があるため、カテゴリー判断の法則⁹⁾を用いる。カテゴリー判断の法則とは、順序付けられているカテゴリーに対し、各刺激が属していると判断される累積頻度のセッ

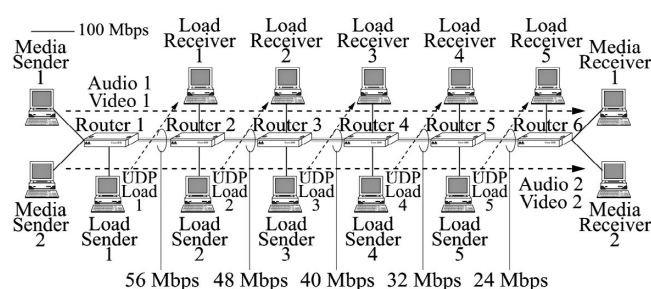


図 1 シミュレーションでのネットワーク構成
Network configuration in simulation.

トと、刺激の尺度値およびカテゴリーの境界値を関係付ける法則である。

さらに、変換された尺度と実測値との適合度を確認するため、Mosteller の適合度検定⁹⁾を行う。これによって得られた尺度を心理尺度と呼び、QoE パラメータとする。

3. 測定条件

文献⁷⁾では、コンピュータシミュレーションにより、いくつかの場面を想定してアプリケーションレベル QoS を測定した。本論文では、さらに QoE パラメータを測定することにより、QoE を考慮したスケジューラの配置を求める。

3.1 シミュレーション環境

WFQ の配置が QoE に及ぼす影響を調査するため、まず、アプリケーションレベル QoS を測定する。

シミュレーションで用いたネットワーク構成⁷⁾を図 1 に示す。6 台のルータ (Router) からなるネットワークに、2 台のメディア送信端末 (Media Sender)、2 台のメディア受信端末 (Media Receiver)、5 台の負荷送信端末 (Load Sender)、5 台の負荷受信端末 (Load Receiver) が接続されている。各ルータ間の接続速度は、ルータ 1-ルータ 2 間が 56 Mbps であり、ルータ 2 からルータ 5 までルータ 1 台経過する毎に 8 Mbps ずつ減少させている。したがって、ルータ 5-ルータ 6 間は 24 Mbps である。これは、例えば、CDN (Contents Delivery Network) のように、メディア送信端末がバックボーンネットワーク、すなわち、高速なリンクで接続されるネットワークに配置されている場合を想定している。

メディア送信端末は、MU*を単位として、それぞれ一組の音声 (Audio)・ビデオ (Video) を対応するメディア受信端末に送信する。メディア送信端末 i ($i = 1, 2$) から送信される音声とビデオを、それぞれ音声 i とビデオ i と呼ぶ。メディアの仕様は表 1 に示される。なお、これは、主観評価環境の制限から、文献⁷⁾とは異なる仕様となっている。ビデオソースには女性ボーカリストのミュージックビデオを用いた。

音声・ビデオへの干渉トラフィックとして、負荷送信端末はペイロード長 1,472 バイトの UDP データグラムを指数分

* MU (Media Unit) とは、本実験におけるアプリケーション PDU である。例えば、ビデオの 1 フレームに相当する。

表 1 音声とビデオの仕様
Specifications of the audio and video streams.

	Audio 1	Audio 2	Video 1	Video 2
符号化方式	リニア PCM	モノラル	MPEG-1 (CBR)	
表示サイズ		—	640 × 360	
ピクチャパタン		—	IPPPPP	
ビットレート [kbps]	768 (一定)		5,999 (平均)	5,999 (平均)
MU サイズ [kbyte]	4.8 (一定)		31.26 (平均)	31.29 (平均)
平均 MU レート [MU/s]	20.0		24.0	
測定時間 [秒]	60			
測定回数 [回]	5			

表 2 各フローの優先度と割当帯域幅
Priority of each flow and its allocated bandwidth.

	Priority	Router				
		1	2	3	4	5
Audio 1	1	768	768	768	768	768
Video 1	1	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
Audio 2	0	768	768	768	768	768
Video 2	0	6,000	6,000	6,000	6,000	5,488
Load 1-5	1	42,464	34,464	26,464	18,463	10,976

注) Priority の値が大きいほど優先度が高い。上記の割当帯域幅は、負荷の帯域幅が充分大きい場合に、余剰帯域幅の再分配が行われた後のものである。割当帯域幅は理論値であり、単位は kb/s である。

表 3 測定内容 (ネットワークの端に WFQ を適用する場合)
Cases of the measurement when WFQ is applied to an edge or both edges of the network.

	Router 1	Router 2	Router 3	Router 4	Router 5
case 1	FIFO	FIFO	FIFO	FIFO	FIFO
case 2	WFQ	FIFO	FIFO	FIFO	FIFO
case 6	FIFO	FIFO	FIFO	FIFO	WFQ
case 2+case 6	WFQ	FIFO	FIFO	FIFO	WFQ
case 7	WFQ	WFQ	WFQ	WFQ	WFQ

布に従う間隔で生成し、対応する負荷受信端末に送信する。以下、これを負荷データとし、この平均送信ビットレートを平均負荷 (UDP average load) と呼ぶ。これは、Web や FTP トラフィックなどの多種のデータ伝送が多重化されたものを模擬したものである。

本シミュレーションでは、Web や FTP トラフィックなどの負荷データが音声・ビデオと同じ優先度で転送される場合と、それらよりも低い優先度で転送される場合を想定する。そのため、各フローに表 2 に示される優先度を付与した。WFQ を適用されるルータでは、同表のように帯域割当が行われる。

3.2 測定内容

文献 7) で得られた結論より、ネットワークの端に WFQ を適用する場合を測定する (表 3)。これは、CDN と NGN のような品質管理のできるネットワークの間に、ベストエフォート網が挟まれた場合を想定している。文献 7) 4.1 節との比較を容易にするため、測定内容は統一した。ただし、比較のため、すべてのルータが WFQ の場合 (case 7) を追加してある。

評価尺度に関して、音声・ビデオをストリーミング伝送

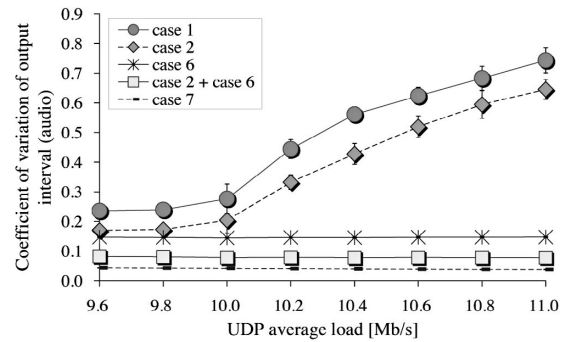


図 2 出力間隔の変動係数 (音声 1)
Coefficient of variation of output interval for audio 1.

するアプリケーションを測定対象とするため、アプリケーションレベル QoS パラメータはメディアの時間構造を評価するものでなければならない。本シミュレーションでは幾つかのアプリケーションレベル QoS パラメータを測定したが、本論文では出力間隔の変動係数のみを示す。

出力間隔の変動係数とは、MU の出力間隔の標準偏差を、MU の出力間隔の平均値で割ったものである。この値が小さいほどメディアは滑らかに出力され、メディア内同期品質が高いといえる。

3.3 QoE パラメータ測定

QoE パラメータの測定には評定尺度法を用いる。評定尺度法における評価尺度には、品質尺度と妨害尺度がある。前者は評価対象に“良い”、“悪い”などの絶対的な品質で評価するが、後者は提示された基準に対しての劣化程度を評価する。あらかじめ基準が提示される後者の方が、被験者は品質を判断しやすい。そのため、本論文では 5 段階妨害尺度を用いる。評価語は“劣化がわからない (imperceptible)”, “劣化がわかるが気にならない (perceptible, but not annoying)”, “劣化が気になるが邪魔にならない (slightly annoying)”, “劣化が邪魔になる (annoying)”, “劣化が非常に邪魔になる (very annoying)” の五つである。評価基準には伝送前の音声・ビデオを用いる。評価時間が長くなると被験者が基準を忘れてしまう可能性があるため、評価中に基準を何度でも確認できるようにした。総評価時間の関係から、シミュレーションで用いた音声・ビデオのうち、15 秒間を提示する。

被験者は 20 代から 30 代の男性 18 名である。被験者一人当たりの評価時間は約 30 分となった。

4. 測定結果

はじめに、アプリケーションレベル QoS のシミュレーション結果を示す。その後、主観評価によって得られた QoE パラメータを論じる。

4.1 アプリケーションレベル QoS

図 2 に平均負荷に対する音声 1 の変動係数を示す。全測定領域において、case 6 の値が小さく、メディア受信端末に最も近いルータへの WFQ の適用が有効であることがわ

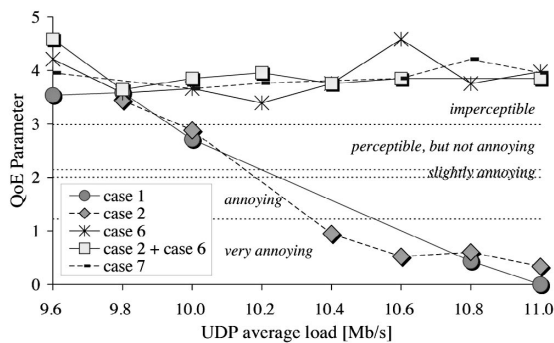


図3 QoEパラメータ (音声・ビデオ1)
QoE parameter for audio-video 1.

かる. case 2 + case 6 のように, ネットワークの両端に WFQ がされる場合, case 6 よりも変動係数は小さくなる. さらに, case 7 のようにすべてのルータに WFQ を適用する場合, 最も小さい値を示す. なお, ビデオ 1 についても同様の傾向がみられた.

このように, 測定パラメータを変更しても, 文献 7) と同様の結果が得られることを確認した.

4.2 QoE パラメータ

主観評価によって得られた結果にカテゴリー判断の法則を適用した. 適合度検定の結果, 有意水準 0.05 で, “得られた尺度が実測値に適合する” という帰無仮説が棄却された. そのため, 得られた尺度値と実測値の誤差が大きい点を八つ取り除いたところ, 仮説は棄却されなくなった. したがって, この時の尺度を QoE パラメータとした.

図 3 に平均負荷に対する QoE パラメータを示す. 図より, case 6, case 2 + case 6, case 7 が, 全測定領域において “劣化がわからない” にカテゴライズされている. これは, 図 2 からわかるように, これらの case では, 常にアプリケーションレベル QoS が高いためである. また, 4.1 節では, WFQ の数が増えるにつれ, すなわち, case 6, case 2 + case 6, case 7 の順に変動係数が小さくなっていったが, 主観的には差がない結果となった.

したがって, メディア受信端末に最も近いルータに WFQ を適用するのみで十分に高い QoE が得られるといえる. これは, 機械的に測定された QoS パラメータのみでは得られない結果である.

5. む す び

本論文では, 音声・ビデオストリーミング IP 伝送を対象として, ノードレベル QoS 制御手段であるパケットスケジューラのネットワーク内における配置が QoE パラメータに及ぼす影響を調査した. そして, QoE の観点から音声ビデオストリーミング IP 伝送に適したパケットスケジューラの配置を提案した. 測定に際して, パケットスケジューラには WFQ を, QoE パラメータの測定には系列カテゴリー法を用いた.

筆者らがすでに明らかにしたパケットスケジューラの音

声・ビデオに適した配置では, すべてのノードにパケットスケジューラを適用することが高い QoS を実現するという結論を得ている. さらに, パケットスケジューラを適用するノードを減らす際には, メディア送信端末と受信端末への適用が, QoS の観点から有効であることを示した.

本論文でこれを QoE の観点から検討した結果, メディア受信端末に最も近いノードへのパケットスケジューラの適用のみで, すべてのノードに適用した場合, ネットワークの両端に適用した場合と同等の高い品質を得られることを明らかにした.

したがって, 本測定環境における音声・ビデオストリーミング IP 伝送では, メディア受信端末に最も近いノードにパケットスケジューラを適用することが QoE を高く保つ方法である. つまり, アクセス回線向けの QoS 制御が, 効率よく高い QoE を提供するといえる.

最後に, 実験に関してご支援いただいた本学中尾行宏氏に感謝する.

〔文 献〕

- 1) ITU-T Rec. G.100/P.10 Amendment 1: “Amendment 1: New Appendix 1 — Definition of Quality of Experience (QoE)” (Jan. 2007)
- 2) S. Tasaka and Y. Ishibashi: “Mutually Compensatory Property of Multimedia QoS”, Conf. Rec. IEEE ICC2002, pp. 1105–1111 (Apr./May 2002)
- 3) D. A. Hayes, M. Rumsewicz and L. L. H. Andrew: “Quality of Service Driven Packet Scheduling Disciplines for Real-time Applications: Looking Beyond Fairness”, Proc. IEEE INFOCOM’99, pp. 405–412 (Mar. 1999)
- 4) Y.-C. Tu, M. C. Chen, Y. S. Sun and W.-K. Shih: “Bulk Scheduling for Delay Sensitive Streaming Applications”, Conf. Rec. IEEE GLOBECOM2006, 1, pp. 2261–2266 (Nov. 2006)
- 5) A. Demers and S. Shenker: “Analysis and Simulation of a Fair Queueing Algorithm”, Proc. ACM SIGCOMM’89, 19, 4, pp. 1–12 (Sep. 1989)
- 6) A. K. Parekha and R. G. Gallager: “A Generalized Processor Sharing Approach to Flow Control in Integrated Services Networks: The Single-node Case”, IEEE/ACM Trans. Networking, 1, 3, pp. 344–357 (June 1993)
- 7) 竹尾 淳, 田坂 修二: “音声・ビデオストリーミング IP 伝送のアプリケーションレベル QoS を向上する WFQ スケジューラの配置”, 映像学誌 (投稿中)
- 8) 田中 良久: “心理学的測定法 第二版”, 東京大学出版会 (1997)
- 9) F. Mosteller: “Remarks on the Method of Paired Comparisons: III. a Test of Significance for Paired Comparisons When Equal Standard Deviations and Equal Correlations are Assumed”, 16, 2 (June 1951)



たけお じゅん
竹尾 淳 2000 年, 名古屋工業大学工学部電気情報工学科卒業. 2002 年, 同大学院博士前期課程修了. 現在, 同後期課程在学中. DiffServ におけるアプリケーションレベル QoS の研究に従事. 学生会員.



たさか しゅうじ
田坂 修二 1971 年, 名古屋工業大学工学部電気工学科卒業. 1976 年, 東京大学大学院博士課程修了. 工博. 同年, 名古屋工業大学情報工学科勤務. 現在, 同大学院工学研究科情報工学専攻教授. 1984 年から 1985 年まで, カリフォルニア大学ロサンゼルス校客員研究員. マルチメディア QoS, 無線ネットワークの研究に従事.