

音声・ビデオ伝送におけるメディア同期を対象としたユーザレベル QoS の定量的評価及びマッピング

伊藤 嘉浩^{†a)} 田坂 修二[†]

Quantitative Evaluation and Mapping of User-level QoS Focusing on Media Synchronization in Audio-Video Transmission

Yoshihiro ITO^{†a)} and Shuji TASAKA[†]

あらまし 本論文では、心理学的測定法である一対比較法と比較判断の法則を用いて、音声・ビデオ伝送におけるメディア同期を対象としたユーザレベル QoS パラメータを評価する方法を提案する。また、重回帰分析を用いて、測定により得られたアプリケーションレベル QoS パラメータ値から、ユーザレベル QoS パラメータ値を推定する方法についても検討する。実験により、ユーザレベル QoS パラメータ値の算出を行い、適合度検定の結果からその妥当性を確認している。また、主成分分析により、メディア同期品質に関する評価尺度のなかから、二つをアプリケーションレベル QoS パラメータとして選択している。そして、重回帰分析によって、これら二つのアプリケーションレベル QoS パラメータからユーザレベル QoS パラメータの推定を行っている。重回帰分析の結果、自由度調整済み寄与率は 0.96 以上の値となり、ユーザレベル QoS パラメータを高い精度で推定できることを示している。

キーワード ユーザレベル QoS, 心理学的測定法, QoS マッピング, 重回帰分析

1. ま え が き

インターネットは、その爆発的な普及により、現在、電話網に代わる新しい通信基盤としての役割を担いつつある。これに伴い、インターネット上で様々な通信アプリケーションが実用化され始めている。このように多様化したアプリケーションのなかでも、VoD (Video on Demand) など、インターネット上で音声やビデオなどの連続メディアの伝送を行うアプリケーションへの期待が高い。

連続メディアは、これまでのテキストベースの情報とは異なり、時間構造を有する。この時間構造を損うことなく高品質の連続メディアをユーザに提供するためには、ネットワークが一定のサービス品質 (QoS : Quality of Service) を保証している必要がある。し

かし、現在のインターネットはベストエフォート型のネットワークであり、QoS を保証できない。そこで、次世代のインターネットでは、一定の QoS をユーザに対して保証する SLA (Service Level Agreement) のようなサービスが期待されている。

インターネットでの通信機能は階層構造を有するので、各階層の提供するサービスごとに QoS が定義される。各階層における QoS の測定及び制御は確かに必要であるが、QoS を最終的に判断するのはユーザである。そのため、ユーザレベルの QoS の評価が最も重要となる。ユーザの視点に立って考えると、SLA サービスではユーザレベル QoS が保証されるべきである。

ユーザレベル QoS を対象とした SLA サービスを提供するためには、サービス提供者は常にユーザレベル QoS を監視しなければならない。しかし、ユーザレベル QoS は人間の主観を含んだものであり、これを直接かつ定量的に評価することは一般に困難である。もし何らかの形でユーザレベル QoS を定量的に表現でき、より下位の階層 (アプリケーションレベル, エンド・ツー・エンドレベルやネットワークレベル [1]) の

[†] 名古屋工業大学工学部電気情報工学科, 名古屋市
Department of Electrical and Computer Engineering,
Nagoya Institute of Technology, Nagoya-shi, 466-8555,
Japan

a) E-mail: yoshi@elcom.nitech.ac.jp

QoS との関係性を明確にできれば、サービス提供者は直接ユーザレベル QoS を測定しなくてもよい。測定の容易な下位層の QoS を測定し、その測定結果からユーザレベル QoS を推定すればよい。このためには、ユーザレベル QoS の定量的な表現方法と、下位層の QoS からユーザレベル QoS を求める QoS マッピング (QoS mapping) の技術が必要となる [1]。

QoS マッピングに関して、これまで多くの研究が行われている。特定の階層、特に下位層において、例えば、ATM など特定の伝送メディアの QoS を IP などのネットワーク層の QoS に変換することについては、文献 [2] をはじめとして多くの研究が報告されている。また、上位レイヤも含めた QoS マッピングは、文献 [3] ~ [5] で扱われている。特に、文献 [3] は、レイヤ間でサービス品質を変換する QoS マッピングと、ノード間のサービス品質をエンド・ツー・エンドのサービス品質に集約する QoS 連結 (QoS concatenation) にも言及している。文献 [3] ~ [5] は、QoS マッピングの例として、ネットワークレベル QoS パラメータである ATM セルの遅延や損失から、エンド・ツー・エンドレベル QoS パラメータであるアプリケーションが受信するフレームの遅延や損失への変換方法を示している。また、文献 [6] は、音声・ビデオストリーム伝送において、パケットごとの損失と遅延がビデオに与える影響をもとに各パケットをカテゴリーに分類し、各カテゴリーのパケットを DiffServ のクラスに対応させる方法を検討している。これは、アプリケーションレベルからネットワークレベルへの QoS マッピングに相当する。以上の研究は、特定のアプリケーションを想定したうえで、アプリケーションの要求する QoS への QoS マッピングを検討したものであり、主観品質などのユーザレベル QoS に関する検討は行っていない。

ユーザレベル QoS に関して、文献 [7], [8] は、ビデオクリップに対する主観評価だけでなく、人間がどの程度内容を理解しているかを示す QoP (Quality of Perception) について述べている。文献 [7], [8] では、ビデオクリップの内容が、QoP にどのような影響を与えるかが検討されている。

文献 [9] ~ [12] は、ユーザレベル QoS パラメータとアプリケーションレベル QoS パラメータとの関連性を、ユーザレベル QoS パラメータとして平均オピニオン評点 (MOS: Mean Opinion Score) を用いて議論している。MOS の測定では、順序づけられたカテゴリー

にあらかじめ数値を与え、対象に対する評価に基づいてその対象をカテゴリーに分類させる。そして、カテゴリーに与えられた数値を評価値とする方法 (評定尺度法 [13]) が用いられる。例えば、「非常に悪い」、「悪い」、「普通」、「良い」、「非常に良い」の各カテゴリーに対して、それぞれ、1, 2, 3, 4, 5 のように点数を与える。MOS は得られた結果をもとに、全被験者の平均値をとったものである。MOS は、音声や静止画像など単一メディアの主観評価方法としても広く用いられている。

本論文で対象とするような音声・ビデオを同時に扱うマルチメディア伝送のユーザレベル QoS パラメータとしては、MOS は以下の二つの理由から必ずしも適切ではない。第 1 に、MOS の測定で用いられる評定尺度法は、カテゴリー数が増えるほど被験者への負担が大きくなり、得られるデータの信頼性が低くなる。すなわち、MOS 評価でしばしば用いられる 5 段階程度のカテゴリーであっても、マルチメディアのような判断の容易でない対象を分類するには被験者にかかる負担が大きくなり、データの信頼性が低くなるのである。第 2 に、評定尺度法は序数尺度構成法 [13] であるため、平均などの統計的処理を行うことは不適切である。尺度の分類については 2. で述べる。

ユーザレベル QoS パラメータを QoS マッピングの観点から考えてみても、これには人間の主観評価を定量的に表現することができ、かつ統計的な操作の可能な距離尺度 [13] 以上の尺度を用いる必要がある。人間の主観評価を定量的に表す距離尺度を構成する方法に関しては、心理学の分野で多くの研究が行われている。MOS 評価によって定量的な測定が困難なマルチメディアアプリケーションのユーザレベル QoS パラメータも、心理学的な測定法を適用することで測定可能であると思われる。しかし、これまで、そのような研究を行った報告は見出されない。

本研究では、音声・ビデオ伝送を行うアプリケーションを対象として、ユーザレベル QoS パラメータの評価に心理学的測定法を適用する。更に、得られたユーザレベル QoS パラメータを、主成分分析と重回帰分析によりアプリケーションレベル QoS パラメータから推定する QoS マッピングの方法についても検討を行う。これまで、マルチメディアアプリケーションの QoS マッピングに関して、このような統計的な手法を適用した研究は見られない。本論文では、この方向の研究の第一段階として、基本的な構成のネットワーク

における音声・ビデオ伝送を例にとり、提案手法の適用可能性の確認を行う。

本論文では、音声やビデオなど複数の連続メディアを同時に伝送するアプリケーションを、単一メディアのみの伝送を行うものと区別するために、連続マルチメディアアプリケーションと呼ぶことにする。

以下に本論文の構成を示す。2. では、測定尺度の分類について述べる。3. において心理学的測定方法を用いたユーザレベル QoS の評価方法と重回帰分析による QoS マッピング法を提案する。4. では連続マルチメディアアプリケーションにおけるアプリケーションレベル QoS パラメータを導入する。5. ではユーザレベル QoS の算出、6. ではユーザレベル QoS への QoS マッピングについて述べる。

2. 測定尺度の分類

本章では、測定尺度について述べる。一般に、測定尺度は、名義尺度 (nominal scale)、序数尺度 (ordinal scale)、距離尺度 (interval scale)、比例尺度 (ratio scale) に分類される [13]^(注1)。名義尺度における数値はラベルとしての意味しかもたず、序数尺度においては数値の順序のみが意味をもつ。距離尺度では、相対的な差は意味をもつが、絶対的な値そのものは意味をなさない。距離尺度の性質に加えて、原点が一意に決まる尺度が比例尺度である。このなかで、名義尺度及び序数尺度に対しては、多くの統計的な処理の適用は許されていない。

MOS などの測定で用いられる評定尺度法は、基本的に序数尺度構成法であり、得られる結果は序数尺度である。したがって、平均値を求めるなどの統計的な処理を行うことは不適切である。評定尺度法で得られた尺度をそのまま統計的な操作が可能な距離尺度とみなして MOS 値を求めることも考えられる。しかし、そのためには、評定尺度上の数値に主観評価値として線形性の保証が必要である。単一メディアに関しては、経験的にこのような仮定に問題がない場合もあるが、マルチメディアにおける主観評価に対してこのような仮定の妥当性は保証されない。

3. 心理学的測定法と重回帰分析の適用

3.1 ユーザレベル QoS の評価方法

まず、ユーザレベル QoS の評価方法として、以下の理由から、心理学的な測定方法の一つである一対比較法 [13] を適用する。一対比較法では、二つの刺激か

らなる刺激対に対し、ある一定の基準に従って、例えば、価値があると判断されるほうを被験者を選択させる。刺激とは、心理実験において被験者に何らかの反応を生じさせる要因とするものである。具体的には、評価のために被験者に提示された音声・画像などを指す。これを多数の被験者に対して繰り返し行い、各刺激には、その刺激が選択された回数だけの得点を与える。一対比較法は、各刺激対に対して優劣の判定のみを行えばよいので、MOS 評価で用いられる評定尺度法など他の方法に比べて、評定そのものが著しく容易である。その結果、被験者の負担が少なくなり、信頼度の高いデータを得ることができる。本研究の対象である音声・ビデオを同時に扱うマルチメディア情報に対しては品質の判断が難しいため、一対比較法による測定が効果的である。ただし、刺激の数 n に対して対の数は ${}_nC_2 = n(n-1)/2$ となるので、刺激の数の増加につれて評価する対の数が急増する問題がある。

一対比較法から得られるデータは、ある刺激が他の刺激に比べて価値があると判断された割合であり、序数尺度である。したがって、このままの尺度では統計的な操作を適用できないので、序数尺度から距離尺度への変換が必要となる。一対比較法で得られた序数尺度から距離尺度を構成する方法として、Thurstone の比較判断の法則 [13], [14] が一般的に用いられる。

Thurstone の比較判断の法則とは、ある刺激 j が与えられたとき、ある尺度上の一点 s_j によって表される心理的過程 (弁別過程) が生じ、 s_j は平均 S_j 、標準偏差 σ_j をもつ正規分布に従う確率変数と仮定されるものである。 σ_j は刺激 j の弁別の散らばりとも呼ばれる。そして、一対比較法において二つの刺激 j, k が与えられたとき、 $s_j - s_k$ が正であれば、 j のほうが良いと判断され、負であれば k のほうが良いと判断されるものと仮定している。 s_j, s_k が正規確率変数であるので、 $s_j - s_k$ も正規確率変数となる。一対比較法によって測定された判断の割合から $s_j - s_k$ の分布を推定でき、文献 [15] で提案された方法により、この分布から平均 S_j を求めることができる。そして、このようにして求められた S_j を j に対する距離尺度として考える。本論文でも、この Thurstone の比較判断の法則を用いて距離尺度の構成を行う。

Thurstone の比較判断の法則は、物理学的・生理学

(注1): これらの尺度は、それぞれ、名目尺度、順序尺度、間隔尺度、比率尺度と呼ばれることもある。

的に根拠のあるものではなく、あくまでも仮定であるため、得られた尺度が適切なものであるかどうかの検証が必要である。文献[16]は、Thurstoneの比較判断の法則によって得られた尺度の適合度を検定する方法を提案している。これは、ある刺激に対して、一対比較法を用いて価値があると判断された割合と、比較判断の法則から求められた距離尺度より推定した割合との誤差から適合度を検討するものである。

本論文では、文献[16]の検定の結果、適合度が確認された距離尺度を“心理的尺度”と呼ぶ。この心理的尺度は、音声・ビデオ伝送におけるユーザレベル QoS パラメータとなる。心理的尺度は距離尺度であるため、原点及び尺度の単位を任意に選ぶことができる。したがって、心理的尺度の絶対値は意味をもたず、その値の差の等位性が保証されているにすぎない。

3.2 QoS マッピング

次に、3.1の方法で算出したユーザレベル QoS を他のレベルの QoS から推定する方法、すなわち、QoS マッピングを考える。このように、ある変数群から一つの変数を推定する一般的な方法として、重回帰分析[18]が広く用いられている。本論文でも、QoS マッピングにおける研究の第1歩として、重回帰分析によるアプリケーションレベル QoS からユーザレベル QoS への QoS マッピングを検討する。すなわち、アプリケーションレベル QoS パラメータを独立変数、ユーザレベル QoS パラメータを従属変数として重回帰式を求める。

この場合、アプリケーションレベル QoS パラメータをどのように選択するかが問題となる。本論文では、連続マルチメディアアプリケーションにおけるメディア同期品質[19]の観点から九つの尺度を採用し、このなかから主成分分析により必要な独立変数を選択する。アプリケーションレベル QoS パラメータについては、次章で述べる。

4. アプリケーションレベル QoS パラメータ

4.1 メディア同期

連続メディア伝送におけるアプリケーションレベル QoS としては、メディアの時間構造をいかに保持しているか、すなわちメディアの同期品質[19]が重要となる。したがって、本論文では、連続マルチメディアアプリケーションのアプリケーションレベル QoS としてメディア同期品質[11]を考えることにする。

メディア同期は、メディア内同期とメディア間同期

に分けて考えることができる。メディア内同期は単一メディアのストリームの連続性を保持するものである。すなわち、メディア同期のための情報の単位 (MU: Media Unit)、例えばビデオフレームが、送信側で生成された間隔と同じ間隔で、受信側で再生されているかどうかを示す。メディア間同期は複数のメディアのストリーム間の同期である。典型的な例としては、話者の音声と (ビデオの) 話者の唇の動きとの同期 (リップシンク) がある。

この時間的な構造は、多くの要因、例えば、メディアの処理に必要な CPU 処理能力の変動や通信ネットワークにおける遅延ジッタなどにより損なわれる可能性がある。そこで、メディア同期品質を維持するために、メディア同期制御が必要となる。

これまで多くのメディア同期制御方式が提案されているが、VTR (Virtual-Time Rendering) アルゴリズム[20], [22] は多様なネットワーク環境に適用可能な有効なものである。この方式では、一つのメディアストリームをマスタストリーム、他のストリームをスレーブストリームとしてマスタと同期させる。本論文では、メディア同期制御のために、VTR アルゴリズムを用いる。

4.2 メディア同期の品質評価尺度

本節では、ユーザレベル QoS へのマッピングに用いるアプリケーションレベル QoS パラメータを定義する。本論文では、文献[21], [22]で用いられているメディア同期に関する評価尺度をアプリケーションレベル QoS パラメータとして考える。

音声及びビデオのメディア内同期の QoS パラメータとして、メディア出力の滑らかさを表す出力間隔の変動係数 (= 平均/標準偏差) を用いる。本論文では、音声、ビデオの変動係数を、それぞれ、 C_a , C_v で表す。更に、音声、ビデオのメディア内同期の平均 2 乗誤差 E_a , E_v を検討する。これらは、MU の生成間隔と出力間隔の差の 2 乗平均として定義される。次に、音声、ビデオの平均 MU レート R_a , R_v を用いる。平均 MU レートは、受信側で 1 秒間に出力された平均 MU 数である。また、総生成 MU 数に対する失われた MU 数の比率である MU 損失率も用いる。音声、ビデオの MU 損失率は、それぞれ、 L_a , L_v で表す。

メディア間同期品質を評価するために、メディア間同期平均 2 乗誤差 E_{int} を用いる。メディア間同期平均 2 乗誤差は、スレーブメディアの MU の出力時刻とこれに対応するマスタメディアの MU の出力時刻の差

から、それぞれのタイプスタンプの差を引いた値の 2 乗平均として定義される。

以上に示した九つのアプリケーションレベル QoS パラメータは、この段階では以下の QoS マッピングに用いるアプリケーションレベル QoS パラメータの候補としてあげたものであり、九つがすべては必要でないかもしれない。また、逆に、これらのパラメータだけで QoS マッピングを行うことは難しいかもしれない。そのような場合には、再度アプリケーションレベル QoS パラメータの検討を行う必要がある。

5. ユーザレベル QoS の算出

5.1 一対比較法による主観評価

3. で述べたように、まず、一対比較法を用いて音声・ビデオのストリームに対する主観評価値の測定を行う。

本論文では、ネットワークの負荷によって生じたアプリケーションレベル QoS (メディア同期品質) の変動が、ユーザレベル QoS にどのような影響を与えるかを問題とする。また、VTR メディア同期制御 [20] の有効性を定量的に測定する。

以上をふまえ、心理実験における刺激となる音声・ビデオストリームを以下の手順で作成する。初めに、基本のデータとなる音声・ビデオストリームを作成する。ネットワークに負荷をかけながら音声・ビデオストリームをネットワーク上で伝送することで、アプリケーションレベル QoS パラメータ値に変動を生じさせる。このとき、VTR メディア同期制御を行った状態と行わなかった状態の両方で測定を行う。

基本データとなる音声・ビデオストリーム (以下、基本ストリーム) を、ライブコンサートを記録した DVD から取得する。これは、ある女性歌手が歌っているシーンであり、大きな動きはないが、リップシンクの状態を認識しやすいものである。基本ストリームの音声及びビデオの諸元を表 1 に示す。

次に、この基本ストリームを、ネットワーク負荷を加えた状態で伝送することで、アプリケーションレベル QoS を変動させる。この伝送は、ネットワークシミュレータである ns [23] を用いてシミュレートされた。図 1 に示すネットワークを ns 上で構築し、サーバからクライアントに対して、基本ストリームを送信する。サーバの属するネットワークと、クライアントの属するネットワークをルータを介して接続し、ルータ間の回線速度は 4.0 Mbps とする。負荷生成器は、

表 1 基本ストリームの音声とビデオの仕様
Table 1 Audio and video specifications of the original stream.

	音声	ビデオ
符号化方式	ITU-T G.711 μ -law	MPEG1
画像サイズ [pixels]	-	320×240
ピクチャパタン	-	IBBPBBPBBPBBPBB
平均 MU サイズ [byte]	1000	5000
総 MU 数	120	300
総再生時間 [s]	15	15
平均 MU レート [MU/s]	8	20
平均 MU 間隔 [ms]	125	50
平均ビットレート [kb/s]	64	800

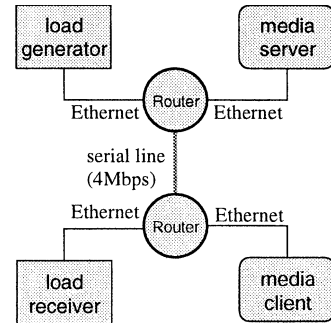


図 1 シミュレーションでのネットワーク構成
Fig. 1 Network configuration in the simulation.

負荷トラヒックとして、1,472 バイトのメッセージを UDP プロトコルにより、指数分布に従う間隔で負荷受信器に送信する。平均負荷トラヒック量 [Mbps] は、適度にアプリケーションレベル QoS が変動するように 3.00, 3.15, 3.30, 3.45 Mbps の 4 種類とした^(注2)。負荷生成器が負荷トラヒックを生成する一方で、サーバは音声・ビデオストリームの送信を行う。クライアントはメディア同期制御を行った状態と行わない状態のいずれかで音声・ビデオストリームを受信し、出力する。クライアントが出力した音声・ビデオストリームを記録し、これらの合計八つの音声・ビデオストリームを心理実験用のデータとした。これを心理実験用ストリームと呼ぶこととする。この八つの心理実験用ストリームでは、負荷が増加するにつれて、音声の途切れやビデオのぎくしゃく感が顕著になった。またメディア同期制御を行わないと、音声とビデオの同期のずれを認識しやすくなった。

作成した心理実験用ストリームに対して、そのアプリケーションレベル QoS パラメータ値を測定す

(注2): ルータにおいて、基本ストリーム及び負荷トラヒックのいずれにも優先制御などを行っていないので、例えば、負荷トラヒックが 3.45 Mbps であっても、実際に基本ストリームが使用する帯域は、0.55 Mbps 以上となる。

るとともに、一対比較法を適用し、主観評価値を測定する。一対比較法は以下の手順で行った。八つの心理実験用ストリームの一対のすべての組合せ (${}_8C_2 = 8 \times (8-1)/2 = 28$ 通り) を被験者に提示し、主観的に品質が良いと感じられるほうを選ばせる。被験者には、音声・ビデオの品質だけではなく、全体として主観的に良いと感じるものを選択するように指示した。このとき、どちらか一方を選択することが困難であっても、必ずどちらかを選択するように指示した。一対のうちの最初のデータを 15 秒間提示し、5 秒の間隔を空けて次のデータを 15 秒間提示する。これをランダムな順序で 28 回繰り返す。すべての被験者に対して同様の手順を行い、すべての組合せにおいて、どちらかが選択された割合を求める。評価者は、画質や音質評価の不熟練者である 20~33 歳の男女 33 名である。1 人当りの総評価時間は約 25 分であった。

二つの刺激 (提示された心理実験用ストリーム) i, j に対して、 i よりも j のほうの品質が良いと被験者が判断した割合 p'_{ij} を表 2 に示す。ここで、 p'_{ij} は真の判断の割合 p_{ij} の観測値となる。本論文では、Thurstone のモデルにおいて、真の値が存在するものと仮定し、その値の観測値を真の値に ' を付けて、また推定値には " を付けて表すものとする。表 2 において、最上段の行が i を表し、いちばん左の列が j を表す。上から 2 行目は及び左から 2 列目はメディア同期制御方式を示し、NC は制御なし、VTR は VTR メディア同期制御 [20] を行ったものである。また、上から 3 行目及び左から 3 列目は負荷生成器の生成した平均負荷トラヒック量 [Mbps] を示す。例えば、平均負荷トラヒック量が 3.15 Mbps で制御を行わなかったときと比べて、平均負荷トラヒック量が 3.30 Mbps で制御を行ったときの心理実験用ストリームの品質が良いと感じた被験者は全体の 94% であることがわかる。

5.2 Thurstone の比較判断の法則による心理的尺度の構成

5.1 の実験により得られた判断の比率をもとに、Thurstone の比較判断の法則を用いて距離尺度である心理的尺度を構成する。この法則では、弁別過程の分散と相関係数に対する仮定をもとに、五つのケース (ケース I~V) が定義されている。このなかで、ケース V の仮定が最も厳しい。ケース V では、各刺激に対する弁別の散らばりは等しく、各弁別過程は独立であると仮定される。この法則を適用する場合は、最初にケース V の適用を試み、必要に応じてケース IV, III

表 2 心理実験から求めた判断の割合 p'_{ij}
Table 2 Experimental proportions p'_{ij} .

i		1	2	3	4	5	6	7	8
j	方式	NC	NC	NC	NC	VTR	VTR	VTR	VTR
	負荷	3.00	3.15	3.30	3.45	3.00	3.15	3.30	3.45
1	NC	3.00	-	0.79	0.61	1.00	0.12	0.15	0.18
2	NC	3.15	0.21	-	0.58	0.91	0.03	0.06	0.06
3	NC	3.30	0.39	0.42	-	0.88	0.00	0.00	0.00
4	NC	3.45	0.00	0.09	0.12	-	0.00	0.00	0.03
5	VTR	3.00	0.88	0.97	1.00	1.00	-	0.55	0.58
6	VTR	3.15	0.85	0.94	1.00	1.00	0.45	-	0.55
7	VTR	3.30	0.82	0.94	1.00	0.97	0.42	0.45	-
8	VTR	3.45	0.48	0.45	0.61	0.91	0.12	0.12	0.21

表 3 弁別の差 Z'_{ij}
Table 3 Discriminal differences Z'_{ij} .

i		1	2	3	4	5	6	7	8
j	方式	NC	NC	NC	NC	VTR	VTR	VTR	VTR
	負荷	3.00	3.15	3.30	3.45	3.00	3.15	3.30	3.45
1	NC	3.00	0.00	0.80	0.27	-	-1.17	-1.03	-0.91
2	NC	3.15	-0.80	0.00	0.19	1.34	-1.88	-1.55	0.11
3	NC	3.30	-0.27	-0.19	0.00	1.17	-	-	-0.27
4	NC	3.45	-	-1.34	-1.17	0.00	-	-	-1.88
5	VTR	3.00	1.17	1.88	-	-	0.00	0.11	0.19
6	VTR	3.15	1.03	1.55	-	-	-0.11	0.00	0.11
7	VTR	3.30	0.91	1.55	-	1.88	-0.19	-0.11	0.00
8	VTR	3.45	-0.04	-0.11	0.27	1.34	-1.17	-1.03	0.00

などの適用を検討することが必要となる [13]。本論文でも、ケース V の適用から始める。

ケース V による距離尺度の構成手順を以下に示す。表 2 の各判断の割合から、標準正規分布得点 Z'_{ij} を求める。この Z'_{ij} が、刺激 i, j の真の心理的尺度 (刺激 i, j に対して生じる心理的過程の平均) の差 $Z_{ij} = S_j - S_i$ の観測値となる。ケース V においては、各刺激に対する弁別の散らばり、すなわち、刺激に対する評価値の標準偏差は等しく、各弁別過程は独立であるものと仮定される。この弁別の散らばりを σ とすれば、 $\sqrt{2}\sigma Z_{ij}$ が二つの刺激の心理的尺度の差となる [14]。距離尺度においては、原点の移動及びスケールの変換は任意に行うことができる。したがって、 $1/\sqrt{2}\sigma$ を全体に掛けることで、 Z'_{ij} を心理的尺度の差の観測値とすることができる。得られた結果を表 3 に示す。ここで、 p'_{ii} ($i = 1, 2, \dots, 8$) は、同じ刺激に対する判断の割合であるので 0.5 とすれば、 Z'_{ii} は 0 となる。また、 p'_{ij} が 0 または 1 であるところ (すなわち、すべての被験者がどちらか一方のみしか選択しなかった場合) は、 Z'_{ij} が、それぞれ、 $-\infty, +\infty$ となるため欠損値として扱う。

心理的尺度の推定値 S'_k は、結果に欠損値が含まれない場合、

$$S'_k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Z'_{jk} \quad (1)$$

により、最小 2 乗解として求めることができる [15]。

表 4 心理的尺度
Table 4 Psychological scales.

	制御方式	平均負荷トラフィック量 [Mbps]	心理的尺度
1	NC	3.000	1.478
2	NC	3.150	1.026
3	NC	3.300	1.069
4	NC	3.450	0.000
5	VTR	3.000	2.633
6	VTR	3.150	2.504
7	VTR	3.300	2.302
8	VTR	3.450	1.333

ここで, n は刺激の数である。しかし, 結果に欠損値が含まれる場合には, 式 (1) は発散するため, これを用いて距離尺度を求めることはできない。

Gulliksen [24] は欠損値のあるデータに対する距離尺度の最小 2 乗解の計算方法を提案しており, 文献 [25] などでも用いられ, その有効性が確認されている。本論文でもこの手順を用いるものとする。付録にその概要を示す。得られた心理的尺度は表 4 のようになった。

5.3 心理的尺度の検定

前述したように, Thurstone の比較判断の法則から得られる尺度は人工的な尺度であり, 得られた尺度と心理実験の結果との適合性を検証しなければならない。文献 [16] は, この適合性の検証方法を提案している。本論文でも, 5.2 で得られた心理的尺度と 5.1 で算出した結果との適合度を, 文献 [16] に基づいて検証する。その概要を以下に示す。

表 4 の値を使って求めた二つの刺激に対する心理的尺度の差の推定値 Z''_{ij} を求める。この Z''_{ij} の値と標準正規分布表から, i よりも j のほうが品質が良いと判断される割合の推定値 p''_{ij} を求めることができる。例えば, 測定値 p'_{ij} と推定値 p''_{ij} の誤差の 2 乗和を求め, この値を用いて, 測定値と推定値が等しいという仮説に対し, カイ 2 乗検定 [26] などの統計的検定を行うことが考えられる。しかし, p'_{ij} の分散は真の値 p_{ij} に依存するため, カイ 2 乗検定の前提となる等分散性を保証することができない。したがって, このままの形で仮説検定を行うことは困難である。

そこで, 分散の不等性を解消するために, 文献 [16] では, 逆正弦変換 [17] を用いている。逆正弦変換により, 2 項分布に従う確率変数は, 近似的に正規分布に従う確率変数に変換できる。 $\theta'_{ij}, \theta''_{ij}$ [deg] を以下のように定義する。

$$\theta'_{ij} = \sin^{-1} \sqrt{p'_{ij}} \quad (2)$$

$$\theta''_{ij} = \sin^{-1} \sqrt{p''_{ij}} \quad (3)$$

n_s を被験者の数とすると, θ'_{ij} は分散 $821/n_s$ をもつ正規分布で近似でき, その分散が真の p_{ij} に依存しない [17]。次式の χ^2_0 を求めれば, この値は自由度 $(n-1)(n-2)/2$ のカイ 2 乗分布に従うので, カイ 2 乗検定を適用することができる [16]。

$$\chi^2_0 = \sum_{j=1}^{n_s} \sum_{i < j} \frac{(\theta''_{ij} - \theta'_{ij})^2}{821/n_s} \quad (4)$$

ここで, $\sum_{i < j}$ は, $i < j$ となる i に対して和をとることを意味する。ただし, 欠損値がある場合は, 欠損値の数だけ自由度を減じる必要がある。表 3 において, $i < j$ となる Z'_{ij} のなかで, 欠損値となるものの数は 6 であるので, 自由度は, $(8-1)(8-2)/2 - 6 = 15$ となる。ここで, 品質が良いと判断される割合の実測値と推定値が等しいという仮説 (帰無仮説) を置く。先の χ^2_0 を用いれば帰無仮説に対してカイ 2 乗検定が適用できる。

ここで有意水準 α を 0.05, すなわち, 正しい仮説が誤って棄却される確率を 5% 以下にしたいものとする。自由度 15 のカイ 2 乗分布に従う確率変数 χ^2 に対して,

$$P(\chi^2 < c) = 1 - \alpha = 0.95 \quad (5)$$

となる c は 25.00 である。したがって, $\chi^2_0 < 25.00$ であれば, 95% の確率で仮説が誤って棄却されないこととなる。実際に, χ^2_0 の値を計算すると 12.270 となるので, 5% の有意水準では両者が等しいという帰無仮説は棄却されない。したがって, S'_k から推定した割合 p''_{ij} と実測値 p'_{ij} が適合しているものとみなし, 得られた尺度 S'_k を心理的尺度として用いることにする。

もし適合度の検定により, 5% や 1% の有意水準で帰無仮説が棄却される場合は, 各刺激に対する弁別の散らばりが一定であるというケース V の仮定をはずし, 文献 [27] で提案される方法を用いて各刺激の弁別の散らばりを推定し, ケース IV, III などの適用を検討しなければならない。

5.4 心理的尺度に対する考察

表 4 の心理的尺度を図 2 に図示する。図 2 において横軸は平均負荷トラフィック量 [Mbps] であり, 縦軸は心理的尺度である。

図 2 から, メディア同期制御を行わなかった場合に比べて, メディア同期制御を行った場合のほうが, 全体に主観的に良いと判断されていることがわかる。

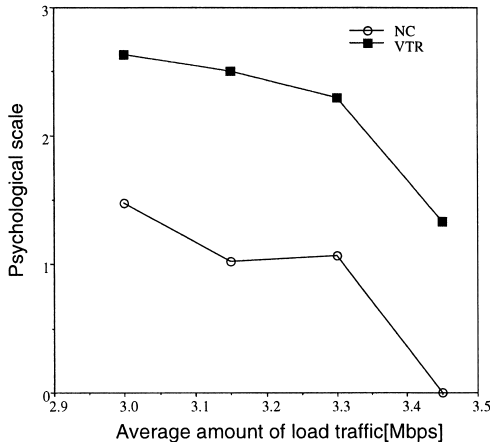


図2 平均負荷トラフィック量に対する心理的尺度(表4から)

Fig. 2 Psychological scale versus average amount of load traffic (from Table 4).

また、平均負荷トラフィック量が 3.30 Mbps まではいずれの場合も緩やかに心理的尺度が低下しているが、3.45 Mbps になると大きく低下している。更に、メディア同期を行った場合、3.45 Mbps の負荷をかけた状態でも、メディア同期を行わなかった場合の 3.00 Mbps 負荷時の品質とほぼ同じであると判断されていることがわかる。このことについては次章で更に詳しく考察する。

6. QoS マッピング

本章では、4.2 で示したアプリケーションレベル QoS パラメータから 5. で算出したユーザレベル QoS パラメータへの重回帰分析による QoS マッピングを検討する。重回帰分析においては、独立変数として用いた変数がそれぞれ独立でないと、多重共線性の問題が生じる [18]。しかし、4.2 で示したアプリケーションレベル QoS パラメータが互いに独立である保証はない。そこで、まず、アプリケーションレベル QoS パラメータ間の相関を調べ、その分類を行う。次に、主成分分析 [18] を行い、各刺激の主成分得点を求める。主成分得点は主成分ごとに独立であるから、初めにこの主成分得点を用いて重回帰分析(主成分回帰)を行う。最後に、先のアプリケーションレベル QoS パラメータの分類結果をもとに、いくつかのアプリケーションレベル QoS パラメータを独立変数として選択し、重回帰分析を行う。

表5 アプリケーションレベル QoS パラメータ間の相関係数

Table 5 Correlation coefficients between application-level QoS parameters.

	R_v	L_v	E_v	E_{int}	C_v	R_a	L_a	E_a	C_a
R_v	1.00	-1.00	-0.01	-0.01	-0.74	1.00	-1.00	-0.11	-0.40
L_v	-1.00	1.00	0.00	0.00	0.74	-1.00	1.00	0.10	0.39
E_v	-0.01	0.00	1.00	1.00	0.63	-0.04	0.00	0.98	0.91
E_{int}	-0.01	0.00	1.00	1.00	0.62	-0.04	0.00	0.98	0.91
C_v	-0.74	0.74	0.63	0.62	1.00	-0.76	0.74	0.66	0.89
R_a	1.00	-1.00	-0.04	-0.04	-0.76	1.00	-1.00	-0.14	-0.43
L_a	-1.00	1.00	0.00	0.00	0.74	-1.00	1.00	0.10	0.39
E_a	-0.11	0.10	0.98	0.98	0.66	-0.14	0.10	1.00	0.92
C_a	-0.40	0.39	0.91	0.91	0.89	-0.43	0.39	0.92	1.00

6.1 アプリケーションレベル QoS パラメータの選択

アプリケーションレベル QoS パラメータとして、4.2 で示した九つのものを検討する。5.1 で心理実験用ストリームを作成するときに、各アプリケーションレベル QoS パラメータの値を測定した。これらの測定値に基づいて、各 QoS パラメータ間の相関係数を求める。表5 にその結果を示す。

表5 より、相関係数の値に応じて、アプリケーションレベルの QoS パラメータをいくつかのカテゴリーに分類できることがわかる。そのなかで、以下の二つのカテゴリーにおいては、アプリケーションレベル QoS パラメータが同一カテゴリー内のパラメータと非常に高い相関を示している。

(a) R_v, R_a, L_v, L_a

(b) E_v, E_a, E_{int}

また、これ以外の変数を以下のように別のカテゴリーに分類する。

(c) C_v, C_a

カテゴリー(c)は、カテゴリー(a)(b)とやや高い相関を示している。

6.2 主成分回帰による QoS マッピング

表5 の相関係数をもとに、主成分分析を行った。各主成分が九つの QoS パラメータのもつ情報をどれだけ有しているかを示す(累積)寄与率を見ると、第1主成分の寄与率が 0.606、第2主成分までの累積寄与率が 0.989 となった。したがって、第1主成分のみでは不十分であるが、第2主成分まで用いれば九つの QoS パラメータが表している情報の 98.9% を表現できる。そのため、ここでは第2主成分までを求める。

表6 に各主成分の主成分負荷量と重み係数を示す。主成分負荷量は主成分と各変数との相関を表し、重み係数は主成分と各変数の相対的な方向を表すものである。図3 は、各アプリケーションレベル QoS パラメータ

表 6 主成分負荷量と重み係数

Table 6 Principal component loading and weight coefficients.

	主成分負荷量		重み係数	
	第一主成分	第二主成分	第一主成分	第二主成分
R_v	-0.799	0.599	-0.342	0.323
L_v	0.792	-0.609	0.339	-0.328
E_v	0.606	0.793	0.259	0.427
E_{int}	0.608	0.791	0.260	0.426
C_v	0.977	0.048	0.418	0.026
R_a	-0.815	0.576	-0.349	0.310
L_a	0.792	-0.609	0.339	-0.328
E_a	0.671	0.722	0.287	0.389
C_a	0.871	0.483	0.373	0.260

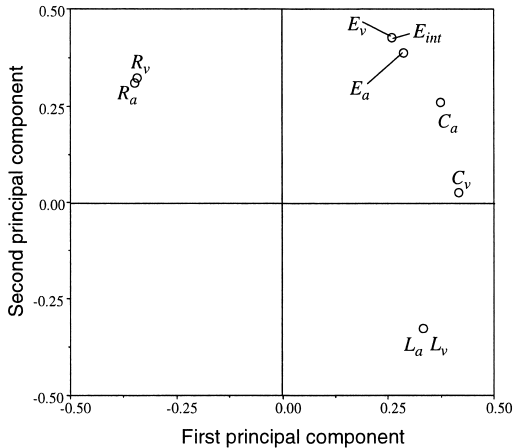


図 3 第 1 及び第 2 主成分における各パラメータの重み係数

Fig. 3 Weight coefficients of the first and second principal components.

タについて、第 1 主成分の重み係数の値を横軸に、第 2 主成分の重み係数の値を縦軸にして、その位置をプロットしたものである。ビデオ及び音声の MU レートと、それらの損失率は負の相関をもつため原点に対して対称な位置にある。図 3 から、6.1 で示した各アプリケーションレベル QoS パラメータの属するカテゴリを確認することができる。

表 6 の重み係数を各アプリケーションレベル QoS パラメータ値に乘じて和をとり、各刺激に対する主成分得点を求めた。これを表 7 に示す。各主成分得点は独立であるので、まず、この主成分得点を独立変数、心理的尺度を従属変数として重回帰分析（主成分回帰）を行う。その結果、第 1 主成分得点を X_1 、第 2 主成分得点を X_2 とし、心理的尺度の予測値を \hat{S} で表すと、次の重回帰式が得られた。

$$\hat{S} = 1.540 - 0.367X_1 - 0.118X_2 \quad (6)$$

重回帰式への当てはめの程度を表す自由度調整済み寄

表 7 主成分得点

Table 7 Principal component scores.

制御方式	平均負荷トラフィック量 [Mbps]	第一主成分	第二主成分
1 NC	3.000	0.101	1.937
2 NC	3.150	0.276	2.102
3 NC	3.300	0.835	1.963
4 NC	3.450	4.089	-0.505
5 VTR	3.000	-2.623	-0.704
6 VTR	3.150	-2.587	-0.716
7 VTR	3.300	-1.932	-0.918
8 VTR	3.450	1.841	-3.158

与率は 0.975 となり、心理的尺度と適合度の高い尺度を主成分得点から構成できることが確認できた。

6.3 アプリケーションレベル QoS パラメータからの QoS マッピング

6.2 では、主成分得点を用いて重回帰分析を行ったが、各重み係数を見ただけでは、第 1 及び第 2 主成分の物理的意味は不めいりょうである。したがって、主成分回帰から得られた回帰式の物理的意味付けが難しいため、アプリケーションレベル QoS パラメータの変化がユーザレベル QoS パラメータに与える影響を見出すことが困難である。また、主成分得点を求めるためには、すべてのアプリケーションレベル QoS パラメータの値を測定しなければならない。しかし、サービス品質の監視を考えると、測定する QoS パラメータの数は少ないほうが望ましい。そこで、次に、主成分得点ではなく、アプリケーションレベル QoS パラメータから独立変数を選択することを検討する。

先に行った各アプリケーションレベル QoS パラメータのカテゴリに基づいて 2 変数を選択し、これらを独立変数として重回帰分析を行う。6.1 のカテゴリ (c) に属するアプリケーションレベル QoS パラメータは、各アプリケーションレベル QoS パラメータに対して相関が強い傾向にある。したがって、多重共線性の影響を避けるために、カテゴリ (c) のアプリケーションレベル QoS パラメータは独立変数として採用しない。そこで (a) (b) のカテゴリから一つずつ QoS パラメータを独立変数として選択する。特に、音声とビデオのメディア同期品質に関する変動がユーザレベル QoS に与える影響を考えると、音声とビデオに関するアプリケーションレベル QoS パラメータを一つずつ選ぶ。ここでは、 $[L_a, E_v]$ と $[E_a, L_v]$ の 2 組を独立変数として採用すると、重回帰式は次のようになる。

$$\hat{S} = 2.541 - 1.336L_a - 0.004489E_v \quad (7)$$

$$\hat{S} = 2.481 - 0.003532E_a - 0.223L_v \quad (8)$$

自由度調整済み寄与率は、それぞれ、0.968, 0.973 と

なり、主成分回帰の場合と同程度の高い寄与率を示している。したがって、主成分回帰を行わなくとも、これら二つのアプリケーションレベル QoS パラメータを用いることで、心理的尺度を高い精度で推定できることがわかる。

これら二つの重回帰式から、以下のことがわかる。 $1.336/0.004489 = 297.6$ より、音声の MU 損失率がある値 L_{a0} のときに感じられる主観的な品質の劣化量は、ビデオのメディア内同期平均 2 乗誤差が $297.6L_{a0}$ のときのものと同程度である。また同様に、 $0.223/0.003532 = 63.1$ より、ビデオの MU 損失率値が L_{v0} のときと音声のメディア内同期平均 2 乗誤差が $63.1L_{v0}$ のときの主観的な品質の劣化量は等しい。

以上の議論は、アプリケーションレベル QoS からユーザレベル QoS へのマッピングを考えたが、逆に、得られた重回帰式を用いて、希望のユーザレベル QoS を得るのに必要なアプリケーションレベル QoS を求めることができる。例えば、ネットワークのふくそう時に、ビデオに割り当てられる帯域が不十分なため、ビデオの MU 損失率が大きくなったとしても、ルータなどにおける QoS 制御機能を用いて、音声のメディア内同期平均 2 乗誤差を小さくするように音声に帯域を割り当てれば、主観的な品質を維持することができる。

6.4 メディア同期の制御利得

最後に、上記以外の QoS パラメータからのユーザレベル QoS パラメータへの QoS マッピングを検討する。今回の実験環境では、アプリケーションレベル QoS パラメータの値を変動させるため、平均負荷トラヒック量とメディア同期制御方式の有無を変化させた。そこで、平均負荷トラヒック量 L [Mbps] を一つの独立変数とし、また、制御方式の有無をダミー変数 C によって次式で定義して独立変数とし、重回帰分析を試みる。

$$C = \begin{cases} 0 & (\text{制御なし}) \\ 1 & (\text{制御あり}) \end{cases} \quad (9)$$

ここで、 L はエンド・ツー・エンドレベル QoS パラメータに、 C はアプリケーションレベル QoS パラメータになる。重回帰式は、以下のようになった。

$$\hat{S} = 10.006 - 2.826L + 1.298C \quad (10)$$

自由度調整済み寄与率は 0.894 となり、他の結果ほど寄与率は高くない。しかし、この回帰式から以下のことがわかる。心理的尺度は平均負荷トラヒック量が

増加するごとに減少する。また、メディア同期制御を行った場合、無制御の場合よりも、心理的尺度値にして 1.298 の値の分、主観的によいとみなすことができる。ただし、距離尺度においてスケールは任意であるので、この 1.298 という値を負荷量に換算すると $1.298/2.826=0.4593$ Mbps に相当する。5.4 でも述べたように、このことは、図 2 において、平均負荷トラヒック量が 3.00 Mbps でメディア同期制御を行わなかった場合と、平均負荷トラヒック量が 3.45 Mbps で制御を行った場合の心理的尺度がほぼ同じ値となっていることから確認できる。すなわち、この場合の VTR メディア同期制御は、平均負荷トラヒック量を 0.45 Mbps 程度軽減する効果がある。これは“メディア同期の制御利得”ともいえるものである。また、この回帰式から、本実験環境に限定すれば、メディア同期制御方式と平均負荷トラヒック量から、おおよその主観評価値を推定することができる。

心理的尺度と各推定値を図 4 に示す。横軸は平均負荷トラヒック量 [Mbps] であり、縦軸は心理的尺度の測定値及び推定値を示す。図 4 を見ると、主成分回帰によって、その自由度調整済み寄与率が示すとおり、ユーザレベル QoS パラメータである心理的尺度をアプリケーションレベル QoS パラメータから高い精度で推定できていることがわかる。また、アプリケーションレベル QoS パラメータから 2 変数を選択して重回帰分析を行った場合にも、主成分回帰と近い結果が得

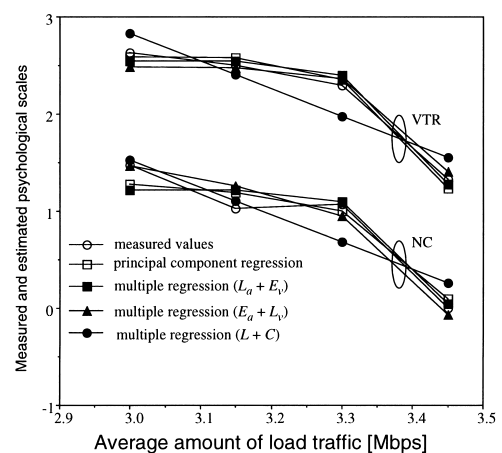


図 4 平均負荷トラヒック量に対する心理的尺度の測定値と QoS マッピングによる推定値

Fig. 4 Measured and estimated psychological scales versus average amount of load traffic.

られている．平均負荷トラヒック量と制御方式の有無を独立変数とした場合の推定精度はそれほど高くないが、これらの独立変数がユーザレベル QoS に与える影響を把握することができる．

これらの結果からは、選択した QoS パラメータ、若しくは選択した QoS パラメータの属するカテゴリ内の QoS パラメータが必ずしも主観評価と関連が高いと結論づけることはできない．本実験においては、多くのアプリケーションレベル QoS パラメータ間に相関があった．これと同様に、今回用いなかった他の QoS パラメータ（例えば、ビデオの画像品質を表す PSNR など）も、今回選択した QoS パラメータと相関があり、これらの QoS パラメータが主観評価結果と大きく関連がある可能性を無視することはできない．今後は他の QoS パラメータについても、より詳細な検討を行う必要がある．

7. む す び

本論文では、ユーザレベル QoS の評価方法として、心理学的測定法を適用することを検討した．まず、心理学的測定方法の一つとしてよく用いられている一対比較法と Thurstone の比較判断の法則を利用し、音声・ビデオストリームに対する心理的尺度を構成した．本尺度は、距離尺度であり、実験結果と高い整合性を示した．また、QoS マッピング方法として、まず、主成分回帰分析を行い、アプリケーションレベル QoS パラメータから、先に求めたユーザレベル QoS パラメータ（心理的尺度）への変換を行った．その結果、主成分得点を用いることで、心理的尺度と非常に近い推定値を求めることができた．次に、主成分分析の結果から選択した二つのアプリケーションレベル QoS パラメータを独立変数として重回帰分析を行ったところ、主成分回帰に近い精度で、心理的尺度を推定できることを示した．

本論文では、この方向の研究の第一歩として、一つの実験環境を例にとり、提案手法の適用可能性を確認することができた．しかし、今後は、提案手法の汎用性と、応用について議論していかなければならない．特に、本手法の応用を検討する際、ここで算出したユーザレベル QoS パラメータ（心理的尺度）は、距離尺度であることに注意しなければならない．すなわち、心理的尺度の絶対値は意味をもたず、その差の等位性が保証されているにすぎない．したがって、その応用に必要な心理的尺度の値を定める方法を確立する必要

がある．そこで、例えば、あるリファレンスとなる刺激を用意し、この刺激に対する心理的尺度値と、対象とする刺激に対する値とを比較するような方法が考えられる．このようにして必要なユーザレベル QoS パラメータ値を決めることができれば、本論文で示したユーザレベルとアプリケーションレベル間の QoS パラメータの関係を示す重回帰式より、必要なアプリケーションレベル QoS パラメータ値を求めることができる．そして、このパラメータ値を実現するようなアプリケーションあるいはネットワークを設定することも可能となる．このような具体的な応用方法は、今後の検討課題である．

また、提案手法の汎用性についても今後議論していく予定である．本論文では、基本的な構成のネットワークを用いて、1 種類の音声・ビデオストリームをもとに解析を行った．しかし、文献 [7], [8] にもあるように、主観評価結果は、音声・ビデオストリームの内容と大きく関連があるものと思われる．したがって、他の種類のデータを用いた場合の測定も行う予定である．更に、今回用いた負荷トラヒックによる変動では、アプリケーションレベル QoS パラメータ間に高い関連性が見られた．このことがどの程度一般的に成立するかを検証するために、例えば、インターネットの実トラヒックを負荷として用いた場合の QoS パラメータ間の関連についても検討を行う必要がある．このような環境下では、線形回帰ではなく、非線形な重回帰分析も検討しなければならないであろう．

謝辞 本研究について御討論頂いた石橋豊教授に深謝する．また、データ取得に協力して頂いた山本健司君に感謝する．なお、本研究は、平成 14 年度科学研究費補助金基盤研究（B）（課題番号 14350200）及び堀情報科学振興財団第 11 回研究助成金（一般）によって行われた．

文 献

- [1] 田坂修二, 石橋 豊, “分散マルチメディアアプリケーションにおける QoS と QoS マッピング”, 信学技報, CQ2001-40, pp.7-14, July 2001.
- [2] P. Francis-Cobley and N. Davies, “Performance implications of QoS mapping in heterogeneous networks involving ATM,” Proc. IEEE International Conference on ATM (ICATM'98), pp.529-535, Colmar, France, June 1998.
- [3] L.A. DaSilva, “QoS mapping along the protocol stack: discussion and preliminary results,” Conf. Rec. IEEE ICC2000, vol.2, pp.713-717, New Orleans, USA, June 2000.

- [4] J.-F. Huard and A.A. Lazar, "On QoS mapping in multimedia networks," Proc. 21st IEEE Annual International Computer Software and Application Conference (COMPSAC '97), pp.312-317, Washington D.C., USA, Aug. 1997.
- [5] J.-F. Huard and A.A. Lazar, "On end-to-end QoS mapping," Proc. IEEE/IFIP 5th International Workshop on Quality of Service (IWQOS'97), pp.303-314, New York, USA, May 1997.
- [6] J. Shin, J. Kim, and C.-C.J. Kuo, "Quality-of-service mapping mechanism for packet videod in differentiated services network," IEEE Trans. Multimedia, vol.3, no.2, pp.219-231, June 2001.
- [7] G. Ghinea and J.P. Thomas, "QoS impact on user perception and understanding of multimedia video clips," Proc. ACM Multimedia'98, pp.49-54, Bristol, UK, Sept. 1998.
- [8] G. Ghinea, J.P. Thomas, and R.S. Fish, "Multimedia, network protocols and users -bridging the gap," Proc. ACM Multimedia'99, pp.473-476, Orlando, USA, Oct. 1999.
- [9] K. Fukuda, N. Wakamiya, M. Murata, and H. Miyahara, "QoS mapping between user's preference and bandwidth control for video transport," Proc. IEEE/IFIP 5th International Workshop on Quality of Service (IWQOS'97), pp.291-301, New York, USA, May 1997.
- [10] O. Maeshima, Y. Ito, M. Ishikura, and T. Asami, "A method of service quality estimation with a network measurement tool," Proc. 18th IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference (IPCCC'99), pp.201-209, Scottsdale, USA, Feb. 1999.
- [11] S. Tasaka and Y. Ishibashi, "Mutually compensatory property of multimedia QoS," Conf. Rec. IEEE ICC2002, pp.1105-1111, New York, USA, April/May 2002.
- [12] Y. Ishibashi, S. Tasaka, and H. Ogawa, "A comparison of media synchronization quality among reactive control," Proc. IEEE INFOCOM2001, pp.77-84, Anchorage, USA, April 2001.
- [13] 田中良久, 心理学的測定法, 第2版, 東京大学出版会, 東京, 1977.
- [14] L.L. Thurstone, "A law of comparative judgment," Psychological Review, vol.34, pp.273-286, 1927.
- [15] F. Mosteller, "Remarks on the method of paired comparisons: I the least squares solution assuming equal standard deviations and equal correlations," Psychometrika, vol.16, no.1, pp.3-9, March 1951.
- [16] 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," Psychometrika, vol.16, no.2, pp.207-218, June 1951.
- [17] 日本数学会, 岩波数学辞典第3版, 岩波書店, 東京, 1985.
- [18] 圓川隆夫, 多変量のデータ解析, 朝倉書店, 東京, 1988.
- [19] 田坂修二, "ネットワーク環境におけるメディア同期," 信学誌, vol.84, no.3, pp.177-183, March 2001.
- [20] Y. Ishibashi and S. Tasaka, "A synchronization mechanism for continuous media in multimedia communications," Proc. IEEE INFOCOM'95, pp.1010-1019, Boston, USA, April 1995.
- [21] S. Tasaka, T. Nunome, and Y. Ishibashi, "Live media synchronization quality of a retransmission-based error recovery scheme," Conf. Rec. IEEE ICC2000, pp.1535-1541, New Orleans, USA, June 2000.
- [22] S. Tasaka, H. Nakanishi, and Y. Ishibashi, "Dynamic resolution control and media synchronization of MPEG in wireless LANs," Conf. Rec. IEEE GLOBECOM'97, pp.138-144, Phoenix, USA, Nov. 1997.
- [23] URL <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [24] H. Gulliksen, "A least squares solution for paired comparisons with incomplete data," Psychometrika, vol.21, no.2, pp.125-134, June 1956.
- [25] 印東太郎, "鉛筆の硬さの心理的尺度の構成," 品質管理, vol.10, 増刊号, pp.97-100, Oct. 1959.
- [26] 小林龍一, 推定と検定, 朝倉書店, 東京, 1969.
- [27] L.L. Thurstone, "Stimulus dispersions in the method of constant stimuli," J. Experimental Psychology, vol.15, pp.284-298, 1932.

付 録

1. 欠損値のある場合の比較判断の法則の適用

文献 [24] では, 以下の Q を最小化する S'_i, S'_j ($i, j = 1, \dots, n$) を求め, 心理的尺度の推定値としている. n は刺激の数である.

$$Q = \sum_{j=1}^n \sum_i^{n_j} \{Z'_{ij} - (S'_j - S'_i)\}^2 \quad (\text{A.1})$$

ここで, n_j は第 j 行における利用可能なデータの数 (対角成分の 0 を除く) であり, $\sum_i^{n_j}$ は, 第 j 行のなかで, Z'_{ij} が利用可能となるすべての i に対して和をとることを意味する. Q を S'_j で偏微分し, 0 とおくと, 次式が得られる.

$$n_j S'_j - \sum_i^{n_j} S'_i = \sum_i^{n_j} Z'_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{A.2})$$

式 (A.2) は n 元連立一次方程式となるが, 文献 [24] の示すように, この n 個の方程式の解を求めるには, 行列形式を用いた解法が便利である. 本論文でもこ

の行列による解法を用いるものとし、 $n = 8$ として、表 3 の実際の値を用いて本解法を示す。

初めに以下の変数を定義しておく。表 3 で欠損値となっている要素を 0 とし、それ以外の第 i 列第 j 行要素を Z'_{ij} とする 8×8 行列 D を作る。 D の各要素 D_{ij} を用いて、 8×8 行列 M の各要素 M_{ij} を以下のように定義する。

$$M_{ij} = \begin{cases} 0 & (i \neq j \text{ で } D_{ij} = 0) \\ -1 & (i \neq j \text{ で } D_{ij} \neq 0) \\ n_j & (i = j) \end{cases} \quad (\text{A} \cdot 3)$$

表 3 から求めた D 、 M を以下に示す。

$$D = \begin{pmatrix} 0.00 & 0.80 & 0.27 & 0.00 & -1.17 & -1.03 & -0.91 & 0.04 \\ -0.80 & 0.00 & 0.19 & 1.34 & -1.88 & -1.55 & -1.55 & 0.11 \\ -0.27 & -0.19 & 0.00 & 1.17 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & -0.27 \\ 0.00 & -1.34 & -1.17 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & -1.88 & -1.34 \\ 1.17 & 1.88 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.11 & 0.19 & 1.17 \\ 1.03 & 1.55 & 0.00 & 0.00 & -0.11 & 0.00 & 0.11 & 1.17 \\ 0.91 & 1.55 & 0.00 & 1.88 & -0.19 & -0.11 & 0.00 & 0.80 \\ -0.04 & -0.11 & 0.27 & 1.34 & -1.17 & -1.17 & -0.80 & 0.00 \end{pmatrix} \quad (\text{A} \cdot 4)$$

$$M = \begin{pmatrix} 6 & -1 & -1 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 7 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 4 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & 4 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 5 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 5 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 0 & -1 & -1 & -1 & 6 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 7 \end{pmatrix} \quad (\text{A} \cdot 5)$$

次に、 $\mathbf{1}$ を 8×1 の単位列ベクトルとして、 8×1 列ベクトル x を次式で定義する。

$$x \triangleq D\mathbf{1} \quad (\text{A} \cdot 6)$$

x の各要素は、式 (A・2) の右辺に対応する。計算の結果、 x の転置行列を x' で表すと、 x' は以下になる。

$$x' = \begin{pmatrix} -2.00 & -4.14 & 0.44 & -5.73 & 4.52 & 3.75 & 4.84 & -1.68 \end{pmatrix} \quad (\text{A} \cdot 7)$$

一方、心理的尺度の推定値 S'_i を第 i 番目の要素とする 8×1 列ベクトルを s とすれば、式 (A・2) の左辺は、 Ms となる。したがって、式 (A・2) は以下のように表すことができる。

$$Ms = x \quad (\text{A} \cdot 8)$$

M の逆行列を M^{-1} とすると、 s は次式から求めることができる。

$$s = M^{-1}x \quad (\text{A} \cdot 9)$$

しかし、 M は行和及び列和が 0 となるため、階数が $n - 1$ となる。したがって、 M は逆行列をもたない。そこで、 S'_j の一つ、ここでは、 S'_1 を原点として考え、 x から第 1 要素を取り除いた 7×1 列ベクトルを x_1 とする。そして、 M から第 1 行第 1 列を取り除いた 7×7 行列を M_1 とすれば、これは逆行列をもつ。この逆行列を M_1^{-1} とする。 x'_1 、 M_1 、 M_1^{-1} は、それぞれ、以下のようになる。

$$x'_1 = \begin{pmatrix} -4.14 & 0.44 & -5.73 & 4.52 & 3.75 & 4.84 & -1.68 \end{pmatrix} \quad (\text{A} \cdot 10)$$

$$M_1 = \begin{pmatrix} 7 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 4 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & 4 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 5 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & 5 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & -1 & -1 & 6 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 7 \end{pmatrix} \quad (\text{A} \cdot 11)$$

$$M_1^{-1} = \begin{pmatrix} 0.272 & 0.150 & 0.179 & 0.142 & 0.142 & 0.147 & 0.147 \\ 0.150 & 0.374 & 0.198 & 0.104 & 0.104 & 0.118 & 0.150 \\ 0.179 & 0.198 & 0.433 & 0.134 & 0.134 & 0.176 & 0.179 \\ 0.142 & 0.104 & 0.134 & 0.316 & 0.149 & 0.147 & 0.142 \\ 0.142 & 0.104 & 0.134 & 0.149 & 0.316 & 0.147 & 0.142 \\ 0.147 & 0.118 & 0.176 & 0.147 & 0.147 & 0.294 & 0.147 \\ 0.147 & 0.150 & 0.179 & 0.142 & 0.142 & 0.147 & 0.272 \end{pmatrix} \quad (\text{A} \cdot 12)$$

s から第 1 要素を取り除いた 7×1 の列ベクトル s_1

は、式 (A.9) と同様に、次式から求められる。

$$s_1 = M_1^{-1} x_1 \quad (\text{A.13})$$

ここでは、刺激 1 の尺度値を原点としているので、 s の第 1 要素を 0 とすると、 s_1 から s が求まる。得られた尺度を値の小さなものから並べ、便宜的に、最も小さな値をとる刺激の心理的尺度が 0 となるように更に原点を移動する。これが最終的な心理的尺度 S'_j ($j = 1, 2, \dots, 8$) となる。

(平成 14 年 5 月 22 日受付, 8 月 14 日再受付)



伊藤 嘉浩 (正員)

平 3 名工大・工・電気情報卒。平 5 同大大学院博士前期課程了。同年国際電信電話(株)入社。KDDI 研究所主査を経て、平 13 より名工大・電気情報助手、現在、同大講師。工博。インターネットにおけるサービス品質制御・評価の研究に従事。IEEE, 情報処理学会各会員。



田坂 修二 (正員:フェロー)

昭 46 名工大・工・電気卒。昭 51 東大大学院博士課程了。同年名工大・情報勤務。現在、同大・電気情報教授。昭 59~60 UCLA 客員研究員。工博。マルチメディア通信、無線ネットワークの研究に従事。IEEE, ACM, 情報処理学会各会員。