

TR-AC-0042

012

ファジィクラシファイアシステムによる
QoSマッピングルールの自律的獲得手法

中岡 謙

2000. 3.28

ATR環境適応通信研究所

目次

あらまし	1
1. はじめに	2
2. QoS マッピングの現状と課題	3
3. 強化学習	4
4. ファジィクラシファイアシステム	6
4.1 ファジィクラシファイアシステムの構成	7
4.1.1 ルールベース	7
4.1.2 ファジィ推論機構	8
4.1.3 信頼度割当機構	9
4.1.4 ルール改善機構	9
4.2 QoS マッピングルール獲得手順	10
5. シミュレーションによる評価	11
5.1 シミュレーション条件	11
5.1.1 QoS パラメータ	11
5.1.2 ネットワーク及び端末の資源モデル	11
5.1.3 報酬の設定	13
5.2 単一のユーザ QoS に対するルール獲得	14
5.3 複数のユーザ QoS に対するルール獲得	15
6. おわりに	17
謝辞	17
参考文献	17

ファジィクラシファイアシステムによる QoS マッピングルールの自律的獲得手法

Autonomous Acquisition of QoS Mapping Rules Using Fuzzy Classifier System

(株) エイ・ティ・アール環境適応通信研究所
第一研究室
中岡 謙

ATR Adaptive Communications Research Laboratories
Department 1
Ken NAKAOKA

あらまし

近年、分散マルチメディア通信におけるサービス品質 (QoS: Quality of Service) の保証を目的としたQoS制御に関する研究が盛んに行われている。QoS保証されたマルチメディア通信を行うためには、伝送されるメディアに対してユーザが要求するQoSに基づいて、ネットワークや端末といったシステム側のQoSを事前に確保する必要がある。しかし、QoSの概念は用いられるレベルによって異なるため、アプリケーションなどの上位レベルとネットワーク及び端末などの下位レベルとの間において、QoSマッピングと呼ばれるQoSパラメータの変換が必要となる。従来はシステムの構築者などが事前にQoSマッピングを行うためのルールを記述していたが、効果的な記述方法は提案されていない。本レポートでは、ファジィクラシファイアシステムによる通信状況に適したQoSマッピングルールの自律的な獲得手法を提案する。また、本提案手法の有効性を計算機シミュレーションにより検証する。

Abstract

There is an extensive literature on distributed multimedia communication service QoS (Quality of Service) management that proposes a wide variety of architectures for managing network and terminal resources. These resources must be ensured in advance in order to deliver video that guarantees QoS, and the amount of these resources are calculated based on the QoS that is requested for the video. Different concepts of QoS apply to different system levels, thus requiring conversion of QoS parameters (called QoS mapping) between the higher application level and lower network and terminal levels. In the past, system designers have written rules in advance to effect QoS mapping, but so far, no effective descriptive method has been proposed. This report addresses a method of autonomously acquiring QoS mapping rules based on fuzzy classifier system, and computer simulation is performed to demonstrate that the acquired QoS mapping rules can satisfy the quality requirements of the user.

1. はじめに

コンピュータの高機能・高性能化や動画像符号/復号化技術の発達により、テキストや音声といった従来のメディアに動画像を加えた処理を行うマルチメディアアプリケーションをコンピュータ上で利用する機会が多くなってきている。また、ネットワークの高速化やインターネットの普及により、分散型マルチメディアアプリケーションを用いて動画像伝送を行いたいという要望が増大している。テレビ会議システムやテレビ電話のような分散マルチメディアアプリケーションによって動画像伝送を行う際には、動画像の持つ実時間性や画質を守りながら処理を行わなければならない。動画像伝送における品質要求はアプリケーションを使用するユーザなどによって行われ、このユーザ要求を保証するための枠組みとして、ネットワーク資源や端末資源を管理するアーキテクチャが提案されるなど、分散マルチメディア通信サービスにおける QoS (Quality of Service) 制御に関する研究が数多く報告されている[1], [2]。

インターネットのようなベストエフォート型のネットワークでは、ネットワークの輻輳によってパケットの損失や伝送遅延が起こり、動画像のフレーム落ちや画像のクオリティ低下を引き起こす。このような伝送遅延や情報の損失といったネットワークレベルでのQoSを保証するために、帯域保証型のネットワークである ATM (Asynchronous Transfer Mode) や、インターネット上で帯域予約を行うプロトコルである RSVP (Resource ReSerVation Protocol) などの研究が行われている[3], [4]。一方、ネットワークレベルでQoSが保証されたとしても、端末において従来からのラウンドロビン方式のタスクスケジューリングを行っていたのでは、端末上その他のアプリケーションの影響などによる負荷の増大によって、動画像の時間的制約を満足することができなくなる。そこで、端末側においては、CPU資源を事前に確保して、優先度に基づいたイベントのスケジューリングを行うことで動画像の品質を保証しようとするマルチメディア OS (Operating System) に関する研究が数多く報告されている[5]。

分散マルチメディアアプリケーションを用いてQoS保証された動画像伝送を行うためには、ユーザが希望する動画像品質を実現するために、ネットワークと端末においてどれくらいの資源が必要になるかを見積もる必要がある。ユーザレベルのQoSからネットワーク及び端末レベルのQoSへの変換はQoSマッピング、QoSの変換規則が記述されているルールはQoSマッピングルールと呼ばれるが、ユーザレベルのQoSとネットワーク及び端末レベルのQoSの間には表現的な隔りがあり、しかも、単純な線形写像による変換では対応しきれないため、事前にQoSマッピングルールを記述することが難しいという問題がある[7], [8]。

本レポートではファジィクラシファイアシステム (FCS: Fuzzy Classifier System)[13]によるQoSマッピングルールの自律的な獲得手法を提案する。FCSは分類子システム[12]のプロダクションルールにファジィ制御ルールを導入した強化学習法である。強化学習は、環境への行動に対する報酬に基づいて、エージェントが自己の内部に持つ条件-行為ルールを改善していく機械学習の一種であり、環境からの入力に対する適切な行動を獲得する手法として、ロボット

の行動計画の獲得などに用いられている[9]. 本レポートでは, エージェントの持つ条件一行為ルールをQoSマッピングルールとして表現し, QoSマッピングの良し悪しの判断基準となる報酬に従って自律的にQoSマッピングルールを獲得するための手法を提案する. そして, ユーザが希望する動画像品質を実現するために必要となるネットワーク及び端末レベルのQoSが, 本手法によって獲得されるQoSマッピングルールによって適切に求められることを示す.

本レポートの構成は以下の通りである. 2.ではQoS制御におけるQoSマッピングの現状と課題について述べる. 3.では強化学習について述べ, 自律的なQoSマッピングルールの獲得に対して強化学習が有効であることを述べる. 4.では本レポートで提案するFCSによるQoSマッピングルールの獲得手法について述べ, 5.でシミュレーションを通して本手法の有効性を検証する.

2. QoS マッピングの現状と課題

アプリケーションを使用するユーザが動画像に対して要求するユーザQoSには, 動画像の滑らかさを示すフレームレート, 画像サイズ, MPEGやMotion JPEGといった符号/復号化方式, 画質を示す圧縮クオリティなどがある. これに対して, ネットワークQoSは伝送帯域, 伝送遅延, 遅延ジッタなど, 端末QoSはCPU資源, メモリ資源などである. そのため, ユーザQoSをそのままの表現でネットワークや端末へ通知するわけにはいかない. そこで, ユーザQoSをネットワークQoSと端末QoS(以下, ネットワークQoSと端末QoSの両者を指す場合, システムQoSと呼ぶ)へと変換するQoSマッピングが行われるが, このQoSマッピングが適切でないと, ネットワークや端末が与えられたシステムQoSに従って資源管理を遵守したとしても, ユーザが希望する動画像品質を実現することはできない. そのため, ユーザの要求を満たすQoS制御を行うにあたっては, 適切なQoSマッピングの実現が必要不可欠である. 以下に, QoSマッピングに関する幾つかの研究を紹介する.

文献[6]では, マルチメディアプレゼンテーションにおいてプレゼンテーション手順をシナリオとして記述し, シナリオ中にプレゼンテーションの各場面に応じたQoS制御を指定している. そして, 伝送帯域, CPU, メモリなどといったプレゼンテーションを行う環境が, プレゼンテーションを作成した環境と異なる場合においても, シナリオ中に記述されたQoS制御を実行することで, 利用者の意図したとおりのプレゼンテーションを行うことを可能としている. この研究におけるQoSマッピングは, QoSマネージャがユーザの要求するユーザQoSリクエストテーブルとネットワークや端末の資源量を表すシステムQoSリクエストテーブル間の変換を行うことで実現されている.

文献[8]では, 動画像の符号化/伝送に必要なネットワーク資源と端末資源の予測手法について検討しており, 動画像品質を決定するパラメータからネットワーク資源と端末資源を予測するための式を導出している. そして, 利用可能なネットワーク資源および端末資源の範囲

内において高品質な動画像伝送を実現するための制御方式を提案している。

一般的に、取り扱う動画像の種類（符号／復号化方式やコンテンツ）、ネットワークの伝送方式、アプリケーションが動作する端末の種類などによって、ユーザ QoS とシステム QoS の対応関係は異なるため、事前に相応しい QoS マッピングルールを記述するには多大な労力を要する。また、動画像を伝送している最中にネットワーク資源や端末資源の利用状況が変化したり、ユーザによりアプリケーションの利用形態が変更されるなどして、想定外の通信状況が生じることがある。このような場合には、事前に用意された QoS マッピングルールでは通信状況の変化に追従することができず、それ以上処理を継続することが不可能になってしまうという問題も生じる。文献[6]では、システム構築者が事前に記述した QoS リクエストテーブルを用いており、また、文献[8]では、取り扱う動画像の符号化方式やアプリケーションが動作する端末の種類が特化された予測手法を用いているため、通信状況の変動に対する QoS マッピングルールの適応性という点で問題がある。

このように、分散マルチメディアアプリケーションによる動画像伝送では、様々な要因によって通信状況が変動するため、上述した従来の QoS マッピング手法のみの適用では不十分であると思われる。そこで、取り扱う動画像、ネットワークや端末の利用状況といった通信状況をあらかじめ想定して、事前に QoS マッピングルールを用意するだけでなく、通信状況の変動に応じて適応的かつ自律的に QoS マッピングルールを獲得するための手法が必要となる。

3. 強化学習

強化学習は本来、人工頭脳学や動物心理学、神経科学などの分野で用いられてきた用語である。箱の中に入れられた鼠がレバーに触れることで餌が与えられるという実験を想定する。レバーに触れることで餌が与えられるという事象が繰り返されることによって、最終的に鼠はレバーに触れるという動作を繰り返すようになる。このことは、餌という報酬によって鼠のレバーに触れるという行動が徐々に強化されていくことを示している。

一般的な強化学習のモデルを図1に示す。エージェントは環境から感覚を受け取り、環境に対して行動を出力する。エージェントは、環境からの感覚に基づいて行動を決定するための条

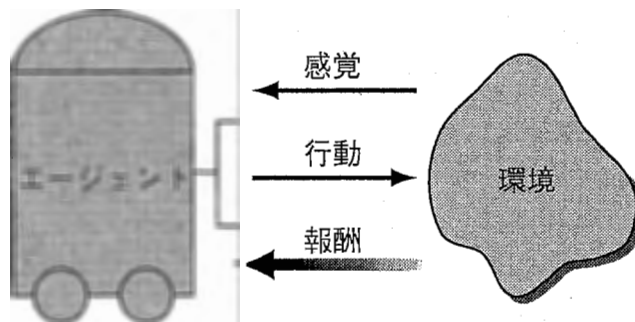


図1 強化学習モデル

件一行為ルール群を保持しており、受け取った感覚が条件部に適合する条件一行為ルールを選択し、行為部に記述された行動を出力する。エージェントの環境への行動に対する見返りとして、エージェントには報酬が与えられる。エージェントの目的は、報酬を最大化するような行動を選択することにより、環境と適切な相互作用を行うための条件一行為ルールを獲得することである。

本レポートでは、条件一行為ルールをQoSマッピングルールとして表現し、動画像伝送において必要となるQoSマッピングルールを強化学習によって獲得することを目指す。そして、ネットワークや端末、アプリケーションを利用するユーザをエージェントにとっての環境と捉え、環境との相互作用を通してQoSマッピングルールを自律的に獲得するための手法を提案する。本レポートで提案する手法は、以下の理由により効果的であると考えている。

- ・強化学習に基づいた自律的なルール獲得能力によって、システム構築者が通信状況に合わせたQoSマッピングルールを事前に用意する必要がない。
- ・通信状況の変化に追従して自律的にQoSマッピングルールの獲得を行うことで、ネットワークや端末、アプリケーションの利用形態の変化などによる想定外の状況においても、通信を継続することができる。

強化学習にはTD(λ)[10]、Q-Learning[11]などがあるが、本レポートではクラシファイアシステム (CS : Classifier System)[12]を採用する。CSは、条件一行為ルールに割り当てられた強さに基づいてルールの改善を行う経験強化型の強化学習法である。TD(λ)やQ-Learningが主にロボットの行動計画の獲得などに用いられているのに対して、CSはマルチエージェント系の学習に近年盛んに用いられている。CSについての詳細は、文献[12]などを参照されたい。

文献[6]などで採用されているQoSマッピングルールの表現方法を図2に示す。このようなQoSマッピングルールは連続的なQoSを扱うことができず、離散的な値でQoSを指定することになる。QoS制御においては、ネットワーク資源や端末資源をできる限り有効に利用することが望まれるため、QoSマッピングルールが連続的なQoSを表現できることが要求される。離散的なQoSしか扱うことができないQoSマッピングルールの場合、離散値の分割間隔を細かく設定することになるが、分割間隔をどのように決定すればよいか、また、分割間隔を細かくするほど必要となるQoSマッピングルールの数が増加するなどの問題が生じる。CSでは記号処理に適した条件一行為ルールを採用しているため、CSにおける条件一行為ルールをそのま

ユーザQoS				
フレームレート	画像サイズ	圧縮クオリティ		
15	320x240	120		
ネットワークQoS			端末QoS	
伝送帯域	伝送遅延	ジッタ	CPU	メモリ
35000	10	0.3	80	40

図2 QoSマッピングルール例

ま QoS マッピングルールとして表現すると、離散的な QoS しか扱うことができないという問題が生じる。

そこで、本レポートでは CS における条件-行為ルールにファジィ制御ルールを導入したファジィクラシファイアシステム(FCS)を採用する[13]。ファジィ制御ルールは離散的な値から連続的な値まで取り扱うことができるため、QoS マッピングルールをファジィ制御ルールで表現することにより、連続的な QoS を扱うことのできる QoS マッピングルールを記述することができる。また、ファジィ制御ルールは人間の感覚を言語的に表現できるため、人間が評価をおこなうシステムに対するファジィ制御の有効性が数多く報告されている。動画像伝送における QoS 制御は、動画像に対するユーザ QoS を保証することを目的とした資源管理であり、ユーザが希望する動画像品質が実現されているかどうかは、最終的にはユーザ自身で判断する必要がある。そのため、人間の評価を必要とする制御システムに対して有効である FCS を採用することで、ユーザの要求を適切に反映した QoS マッピングルールの獲得が可能になると期待される。

4. ファジィクラシファイアシステム

本レポートで提案する FCS による QoS マッピングルール獲得のための構成図を図3に示す。FCS はルールベース、ファジィ推論機構、信頼度割当機構、ルール改善機構の4つのブロックで構成される。FCS は、動画像の送受信、符号/復号化、再生などを担当するアプリケーション、若しくはミドルウェア上に搭載されるため、FCS にとっての環境はネットワークや端末、ユーザとなる。

本レポートでは、受信端末主導型の動画像伝送における QoS マッピングルールの獲得を行う。本レポートでの受信端末主導型とは、動画像の品質を示すユーザ QoS が受信端末から送信

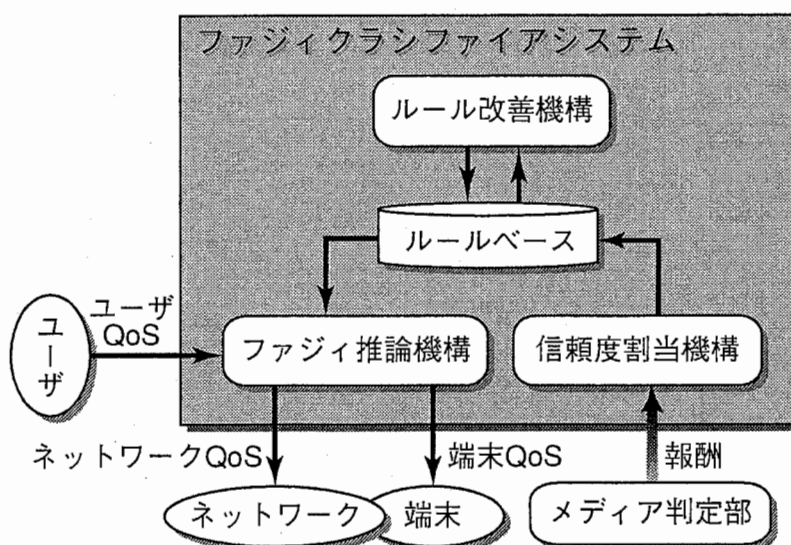


図3 FCS による QoS マッピングルール獲得構成図

端末へと通知され、該ユーザQoSに従った動画像が送信端末から受信端末に向けて伝送される通信形態のことである。動画像を伝送するために必要なネットワークQoS、並びに、受信端末上で動画像を処理するために必要な端末QoSの導出は受信端末側で行うため、本レポートでは受信端末側におけるQoSマッピングルールの獲得について述べる。送信端末においても、CCDカメラから取り込まれた動画像符号化処理などのため、受信端末から通知されたユーザQoSに基づいて自身の端末資源を求める必要がある。本提案手法は送信端末と受信端末のいずれ側に対しても適用可能であるが、送信端末におけるQoSマッピングに関しては本レポートの範囲外とする。本章では以下、FCSを構成する各ブロックの役割と、FCSが環境との相互作用を通して如何にしてQoSマッピングルールを獲得するかについて述べる。また、これ以降、単にルールと表現されたものはQoSマッピングルールを指すものとする。

4.1 ファジィクラシファイシステムの構成

4.1.1 ルールベース

FCSで用いられるファジィ制御ルールは、IF - THEN形式で以下のように表現される。

$$\text{Rule}^i: \text{IF } x_1 \text{ is } A_1^i, x_2 \text{ is } A_2^i, \dots, \text{ and } x_k \text{ is } A_k^i, \text{ THEN } y \text{ is } B^i. \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

ここで、 i はファジィ制御ルール番号、 x_k は入力変数、 y は出力変数であり(式(1)は k 入力1出力であるファジィ制御ルールの例)、入力変数部分は前件部、出力変数部分は後件部と呼ばれる。また、 A, B はメンバシップ関数の種類を示すファジィラベルである。図4に、max-min合成及び重心法と呼ばれるファジィ推論の演算過程を示す。このファジィ推論法は、各ファジィ制御ルールの入力変数に対する適合度合い(前件部適合度)を求め、各ファジィ制御ルールの推論結果を後件部メンバシップ関数と前件部適合度の積とし、各ファジィ制御ルールの推論結果の和の重心からファジィ制御ルール全体の推論結果を求めるものである。ファジィ推論の詳細については、文献[14]などを参照されたい。

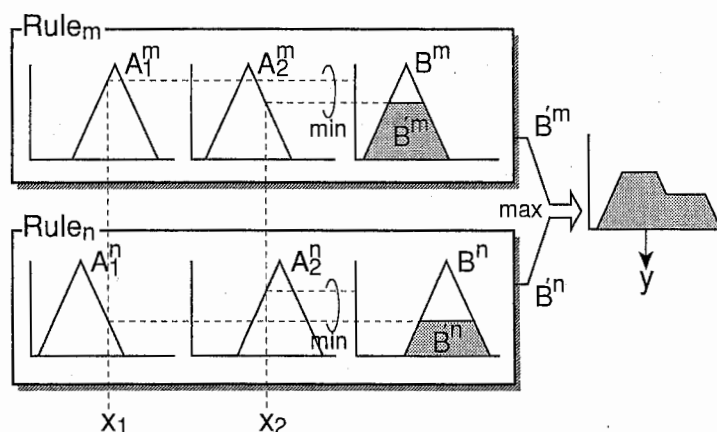


図4 max-min合成及び重心法によるファジィ推論法

本レポートで用いるQoSマッピングルールはファジィ制御ルールによって表現され、ルールベースにはこれらルールが複数用意されている。ユーザQoSはファジィ制御ルールの前件部に、システムQoSは後件部に対応する。ここで、ユーザQoSを x_{user} 、ネットワークQoSを y_{net} 、端末QoSを y_{term} とし、これら各QoSに対応するファジィラベルをそれぞれ A_{user} 、 B_{net} 、 B_{term} とすると、本レポートで扱うルール i は以下のように記述される。

$$Rule^i: IF x_{user} \text{ is } A_{user}^i, THEN y_{net} \text{ is } B_{net}^i \text{ and } y_{term} \text{ is } B_{term}^i. \quad (2)$$

文献[13]では、形状が予め定まった複数のメンバシップ関数が前もって用意されており、その中のファジィラベルに対応するメンバシップ関数を用いてファジィ推論を行っている。FCSによるルールの獲得とは、与えられた入力に対して適切な出力を導き出すようなファジィラベルの組み合わせを持つルールを発見することである。しかしながら、最もらしいファジィラベルの組み合わせを持つルールが獲得されたとしても、事前に用意されているメンバシップ関数の形状が不適切であると、希望する出力が必ずしも得られるとは限らない。そこで、本レポートでは式(2)のファジィラベルの代わりに、メンバシップ関数の形状を決定するパラメータを用いることにした。そして、メンバシップ関数の形状を三角型とし、以下の式でメンバシップ関数 $M(x)$ を表す。

$$M(x) = -\frac{2|x-\alpha|}{\beta} + 1 \quad (3)$$

ここで、 α はメンバシップ関数の頂点の x 座標、 β は底辺の長さを表しており、 α 、 β の値を変更することで様々な形状の三角型メンバシップ関数を表現することができる。本レポートで用いるルールは、メンバシップ関数の形状を決定するパラメータの並びとして図5のように表現され、所望のQoSマッピングを行うことのできるパラメータ α 、 β の組み合わせを持つルールを発見することが、本レポートにおけるルール獲得となる。

4.1.2 ファジィ推論機構

ファジィ推論機構は、ユーザQoSを入力として取り込み、ルールベース中のルールを用いてmax-min合成及び重心法によるファジィ推論を行い、出力としてシステムQoSを求める。ファジィ推論機構で行われる各QoSを入出力としたファジィ推論がQoSマッピングに相当する。

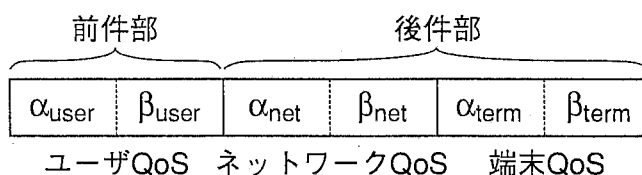


図5 FCSにおけるQoSマッピングルール表現

ファジィ推論を行う際に、先に述べたように各ルールにおいて前件部適合度が求められる。前件部適合度は、各ルールのユーザ QoS に対する適合度合いを示しており、この値が大きいほど、そのルールの特徴を大きく反映した QoS マッピングが行われたことになる。

4.1.3 信頼度割当機構

ファジィ推論機構で求められるシステム QoS に基づいて、ネットワーク資源と端末資源が確保される。その後、受信端末から送信端末へとユーザ QoS が通知され、送信端末から受信端末へ向けて動画像が伝送される。QoS マッピングを適切に行うことのできるルールが獲得されれば、受信端末上にてユーザ QoS で示される品質の動画像が再生される。FCS がこのようなルールを獲得するためには、ファジィ推論機構で行われた QoS マッピングが適切であったかどうかの評価基準が必要となる。この評価基準となるものがメディア判定部から渡される報酬である。

受信端末上で再生される動画像品質はルールの性能に左右されるため、メディア判定部では再生される動画像品質に基づいて報酬を決定し、信頼度割当機構へその報酬を渡す。報酬の決定にあたっては、以下に述べる 2 通りの方法がある。1 つは、画面上で再生される動画像に対してユーザ自身が評価を行い、その評価結果を基にメディア判定部において報酬を決定する方法である。この方法は動画像の評価をユーザに委ねるため、評価回数が多くなるとユーザへの負担が大きくなるが、ユーザ自身が評価を行うことでユーザの主観を適切に反映した評価を行うことができる。2 つめは、ユーザがあらかじめ評価関数をメディア判定部に設定しておき、その評価関数に基づいて報酬を求める方法である。ユーザが評価関数を設定しさえすれば自動的に報酬が決定されるが、ユーザの主観を反映した評価関数の設定が難しいという問題がある。

各ルールは信頼度という値を保持しており、信頼度割当機構はメディア判定部から渡される報酬を各ルールに信頼度の増減という形で割り当てる。信頼度はファジィ推論機構で行われた QoS マッピングの良し悪しを各ルールに反映したものであり、後述するルール改善機構におけるルールの更新の際に使用される。ルール i に対する報酬の割当は以下のように行われる。

$$d_i = g_i \times P \quad (i=1, 2, \dots, n_{rule}) \quad (4)$$

ここで、 d_i はルール i の信頼度、 P はメディア判定部から受け取る報酬、 g_i はファジィ推論の際に求められるルール i の前件部適合度、 n_{rule} はルールベースに用意されているルール数である。前件部適合度 g_i は、ルール i のユーザ QoS に対する適合度合いを示しており、この値が大きいほど報酬の基となった QoS マッピングにおけるルール i の貢献度が大きくなり、信頼度として割り当てられる報酬もそれに比例して大きくなる。

4.1.4 ルール改善機構

ルール改善機構では、各ルールに割り当てられた信頼度に基づいて、遺伝的アルゴリズムによりルールの更新を行う。遺伝的アルゴリズムは生物の進化過程を模倣したプログラミング技

法であり、問題の解に対して選択、交叉、突然変異といった遺伝的演算と呼ばれる操作を施すことにより、与えられた問題に対する準最適な解を求める計算手法である。まず、信頼度 d_i が低いものから順に選ばれた n_{kill} 個 ($n_{kill} < n_{rule}$) のルールを淘汰し (選択), 残った $n_{rule} - n_{kill}$ 個のルール同士を掛け合わせることで新たに n_{kill} 個のルールを生成し (交叉), 先に淘汰された n_{kill} 個のルールと置き換える。その後、ルールを構成するパラメータの値をある確率で変更する (突然変異)。このように、信頼度に基づいた遺伝的演算によって有効なルールが探索される。遺伝的アルゴリズムの詳細については、文献[15]などを参照されたい。

4.2 QoS マッピングルール獲得手順

(1) ユーザ QoS を設定するためのインタフェースが受信端末の画面上に表示される。ユーザはこのインタフェースを通してユーザ QoS を設定する。ユーザ QoS の設定方法としては、キーボードやスライディングバーから値を入力する方法などがある。

(2) ルールベースに初期ルールとして n_{rule} 個のルールを生成する。図5に示したように、各ルールはメンバシップ関数の形状を決定するパラメータの並びによって構成されているため、これらのパラメータに初期値を設定することで初期ルールを生成する。本レポートにおけるルールの獲得とは、表現可能な全ルールの集まりによって構成される問題空間内で、目的とするルールを探索することである。探索の初期段階においては、できるだけ問題空間内を広く探索することが望まれるため、ルールを構成する各パラメータの値は一様乱数によって決定される。

(3) ファジィ推論機構にてユーザ QoS を入力として取り込み、ルールベース中のルールを用いてファジィ推論を行い、出力としてシステム QoS を求める。

(4) システム QoS に基づいて、ネットワーク資源と端末資源が確保される。ネットワーク QoS は端末が接続されているネットワークへ通知され、ATM では CAC (Connection Admission Control) によるコネクション受付、インターネットでは RSVP プロトコルなどによってネットワーク資源が確保される。また、端末 QoS は、アプリケーションが動作する OS やミドルウェアなどへ通知され、動画像を処理するために必要な端末資源として確保される。

(5) ユーザ QoS パラメータが受信端末から送信端末へと通知され、送信端末はユーザ QoS に従った動画像を受信端末に向けて伝送する。もし、受信端末から通知されるユーザ QoS に従った動画像を伝送できないと送信端末が判断した場合は、両端末間においてユーザ QoS の再設定を行うための QoS 交渉と呼ばれるプロトコルが起動されるが、本レポートでは、送信端末は受信端末から通知されるユーザ QoS に従った動画像を常に伝送できるものとする。

(6) メディア判定部において、受信端末上で再生される動画像品質に基づいて報酬を決定し、信頼度割当機構へ報酬を渡す。

(7) 受信端末上で再生される動画像品質がユーザ QoS で示された品質に到達し、システム QoS が適切に求められた時点で、ルールの獲得を終了する。

(8)ネットワーク資源と端末資源は有限である。そのため、これら資源の限界によって、ユーザが希望する動画像品質を実現することができないと判断された場合、ユーザに対して新たなユーザ QoS の入力を促す。

(9)信頼度割当機構において、報酬を各ルールに信頼度として割り当てる。

(10)ルール改善機構において、信頼度に基づいた各ルールの更新を行い、更新されたルールを用いて新たなQoSマッピングを行うために、送信端末に向けて動画像伝送を中断するよう通知する。その後(3)へ戻り、(7)の終了条件を満たすまで処理を繰り返す。

初期のルールは一様乱数によって生成されるため、ルール獲得の初期段階においては適切なQoSマッピングを行うことができない。しかし、(3)~(10)の報酬に基づいたルール改善を繰り返していくに従い、受信端末上で再生される動画像品質は次第に向上していき、最終的にユーザ QoS を満たす QoS マッピングを行うことのできるルールが獲得される。

5. シミュレーションによる評価

本レポートで提案したFCSによるルール獲得手法の有効性を検証するため、ネットワークに接続された2つの端末間における動画像伝送のモデルを考え、計算機シミュレーションによる評価を行う。

5.1 シミュレーション条件

5.1.1 QoS パラメータ

ルールは受信端末に搭載されたFCSにより獲得される。送信端末から受信端末へ伝送される動画像符号化方式として Motion JPEG を想定する。ユーザ QoS として、1秒間に表示される画像の枚数であるフレームレート u_f (frame/s)、画像内のピクセル (画素) 数で表される画像サイズ u_s (pixel) (u_s は画像の横ピクセル数であり、横：縦 = 4 : 3 とする)、画像品質を左右する圧縮クオリティ u_q の3種類を用いる。ここで、圧縮クオリティ u_q は、画像符号化の際に用いる量子化スケールをユーザに分かり易く表現し直したものであり、圧縮クオリティ u_q が大きくなるほど高品質で詳細な画像となる。ネットワーク QoS は、動画像を伝送するために必要なネットワーク資源量として、端末が接続されているネットワークの利用可能な全伝送帯域に対する使用率 s_b (%) を用いる。端末 QoS は、動画像を復号化するための CPU 資源量として CPU 使用率 s_c (%)、動画像を受信して復号化するまでの蓄積バッファとしてメモリ使用率 s_m (%) の2種類を用いる。

5.1.2 ネットワーク及び端末の資源モデル

ユーザ QoS (u_f, u_s, u_q) で示される品質で動画像伝送を行うために必要となるシステム QoS (s_b, s_c, s_m) をユーザ QoS から導出するための資源モデルを考える。この資源モデルから導出されるシステム QoS と、ルールから出力されるシステム QoS に基づいて、受信端末上で再生さ

れる動画像品質を求める。文献[8]では、動画像品質を決定する品質パラメータから、動画像を伝送/符号化するために必要となるネットワーク資源量と端末資源量を予測するための式を求め、品質パラメータから必要資源量へのQoSマッピングを行っている。このような式を用いることにより、実環境の特徴を反映した資源モデルによるシミュレーションを行うことができるが、これらの予測手法では、取り扱う動画像の符号化方式や端末の種類が特化されている。そこで、本シミュレーションでは、動画像の品質パラメータから、その動画像を処理するために必要となる資源量を導出する資源モデルを、以下のように考える。

まず、フレームレートは1秒間に表示される画像枚数であるため、必要資源量はフレームレートの $O(n)$ のオーダーで増加すると考える。また、1枚当たりの画像容量は画像サイズが u_s (pixel) のとき $3u_s^2/4$ (pixel²) であるため、必要資源量は画像サイズの $O(n^2)$ のオーダーで増加すると考える。文献[7]では、圧縮クオリティと必要資源量との関係を明らかにしており、それによると、圧縮クオリティが大きくなるにつれて必要資源量は非線形に増大しているが、本レポートでは画像サイズ同様、 $O(n^2)$ のオーダーで増加するものとする。以上のことから、本レポートでは、動画像のパラメータが必要資源量に与える影響を次式のように定義する。

$$I_F^{(R)}(u_f) = \frac{Th_F^{(R)} \cdot (u_f - F_{\min}) + Tl_F^{(R)} \cdot (F_{\max} - u_f)}{F_{\max} - F_{\min}} \quad (5)$$

$$I_S^{(R)}(u_s) = \frac{Th_S^{(R)} \cdot (u_s^2 - S_{\min}^2) + Tl_S^{(R)} \cdot (S_{\max}^2 - u_s^2)}{S_{\max}^2 - S_{\min}^2} \quad (6)$$

$$I_Q^{(R)}(u_q) = \frac{Th_Q^{(R)} \cdot (u_q^2 - Q_{\min}^2) + Tl_Q^{(R)} \cdot (Q_{\max}^2 - u_q^2)}{Q_{\max}^2 - Q_{\min}^2} \quad (7)$$

$I_F^{(R)}(u_f)$, $I_S^{(R)}(u_s)$, $I_Q^{(R)}(u_q)$ はそれぞれフレームレート u_f , 画像サイズ u_s , 圧縮クオリティ u_q の資源 R への影響率である。式(5)において、 F_{\min} と F_{\max} はそれぞれフレームレート u_f の最小値と最大値、 $Th_F^{(R)}$ と $Tl_F^{(R)}$ はフレームレート u_f の資源 R への影響率 $I_F^{(R)}(u_f)$ を調整するためのパラメータであり、式(6), (7)においても同様である。パラメータ $Th_F^{(R)} \sim Tl_Q^{(R)}$ を変更することにより、処理能力の異なるネットワークや端末を想定したシミュレーションを行うことができる。

次に、端末が接続されるネットワークの利用可能な全伝送帯域 $R_{\max}^{(B)}$ を

$$\begin{aligned} R_{\max}^{(B)} &= I_F^{(B)}(F_{\max}) \times I_S^{(B)}(S_{\max}) \times I_Q^{(B)}(Q_{\max}) \\ &= Th_F^{(B)} \times Th_S^{(B)} \times Th_Q^{(B)} \end{aligned} \quad (8)$$

と定義し、ユーザ QoS (u_f, u_s, u_q) で示される動画像品質を実現するために必要となる伝送帯

域の使用率 $R_{\text{opt}}^{(B)}$ を，次式のように求める．

$$R_{\text{opt}}^{(B)} = \frac{I_F^{(B)}(u_f) \times I_S^{(B)}(u_s) \times I_Q^{(B)}(u_q)}{R_{\text{max}}^{(B)}} \times 100.0 \quad (9)$$

CPU処理能力 $R_{\text{max}}^{(C)}$ とCPU使用率 $R_{\text{opt}}^{(C)}$ ，メモリ容量 $R_{\text{max}}^{(M)}$ とメモリ使用率 $R_{\text{opt}}^{(M)}$ についても，式(8)，(9)と同様に求める．

5.1.3 報酬の設定

前章で述べたように，送信端末から伝送される動画像のフレームレート，画像サイズ，圧縮クオリティの各パラメータは，受信端末から通知されるユーザQoS (u_f, u_s, u_q) に従うものとする．しかしながら，該ユーザQoSで示される品質の動画像を伝送できるだけの伝送帯域が確保されていないければ，伝送される動画像のフレームが送信端末において適宜間引かれるものとする．そのため，端末資源が適切に求められていたとしても，受信端末上においてフレームレート u_f にて動画像を再生することができない．同様に，受信端末側において端末資源が適切に確保されていないければ，受信した動画像の復号化処理などが追いつかず，フレームレート u_f にて動画像を再生することができない．ルール出力であるシステムQoS (s_b, s_c, s_m) から，受信端末上で再生される動画像のフレームレートは次のように求められる．

まず，伝送帯域使用率 s_b から予約伝送帯域 $R_{\text{resv}}^{(B)}$ は

$$R_{\text{resv}}^{(B)} = \frac{R_{\text{max}}^{(B)} \times s_b}{100.0} \quad (10)$$

と求められ，ネットワーク資源のみによって決定される再生フレームレート $F_{\text{real}}^{(B)}$ は，次式のように算出される．

$$F_{\text{real}}^{(B)} = I_F^{(B)-1} \left(\frac{R_{\text{resv}}^{(B)}}{I_S^{(B)}(u_s) \times I_Q^{(B)}(u_q)} \right) \quad (11)$$

CPU資源とメモリ資源のみによって決定される再生フレームレート $F_{\text{real}}^{(C)}$ ， $F_{\text{real}}^{(M)}$ も，式(10)，(11)と同様にして求められ，受信端末上での再生フレームレート F_{real} を次式のように定義する．

$$F_{\text{real}} = \min \{ F_{\text{real}}^{(B)}, F_{\text{real}}^{(C)}, F_{\text{real}}^{(M)} \} \quad (12)$$

本レポートにおけるFCSによるルールの獲得とは，メディア判定部で求められる報酬を最大化するようなルールを発見することである．また，本シミュレーションでは，ユーザQoS (u_f, u_s, u_q) で示される品質の動画像を受信端末上にてフレームレート u_f で再生することを目的とし，

そのために必要な資源使用率 ($R_{opt}^{(B)}, R_{opt}^{(C)}, R_{opt}^{(M)}$) を導き出すことのできるルールの獲得を行う。受信端末上での再生フレームレート F_{real} がユーザ QoS で示されるフレームレート u_f に近いほど、更に、 $F_{real} = u_f$ の時点におけるシステム QoS (s_b, s_c, s_m) の値が小さいほど、ルールの出力が必要資源使用率 ($R_{opt}^{(B)}, R_{opt}^{(C)}, R_{opt}^{(M)}$) に近づいていると考えられるので、メディア判定部で求められる報酬 P を以下のように定義した。

$$P = \begin{cases} 99.0 - (u_f - F_{real}) + \frac{s_b + s_c + s_m}{300.0} & (F_{real} < u_f) \\ 100.0 - (F_{real} - u_f) - \frac{s_b + s_c + s_m}{300.0} & (F_{real} \geq u_f) \end{cases} \quad (13)$$

5.2 単一のユーザ QoS に対するルール獲得

ユーザ QoS としてフレームレート $u_f = 30$ frame/s, 画像サイズ $u_s = 500$ pixel, 圧縮クオリティ $u_q = 75$, ルールベースに用意するルール数 $n_{rule} = 20$ という条件の下でルール獲得を行い、図 6 にそのシミュレーション結果を示す。図の横軸は試行回数、左縦軸は獲得されたルールから出力されたシステム QoS, 右縦軸は受信端末上で再生される動画のフレームレート F_{real} を示す。試行回数とは、4.2 で述べた(3)~(10)の処理の繰り返し回数である。試行回数を重ねるごとに、受信端末上で再生される動画のフレームレート F_{real} がユーザ QoS のフレームレート $u_f = 30$ frame/s に次第に近づいていき、64 回目の試行において $F_{real} = u_f$ となった。その後もルールの獲得を続け、与えられたユーザ QoS で示される品質にて動画伝送を行うための必要資源使用率 ($R_{opt}^{(B)}, R_{opt}^{(C)}, R_{opt}^{(M)}$) を出力するルールが、136 回目の試行において獲得された。

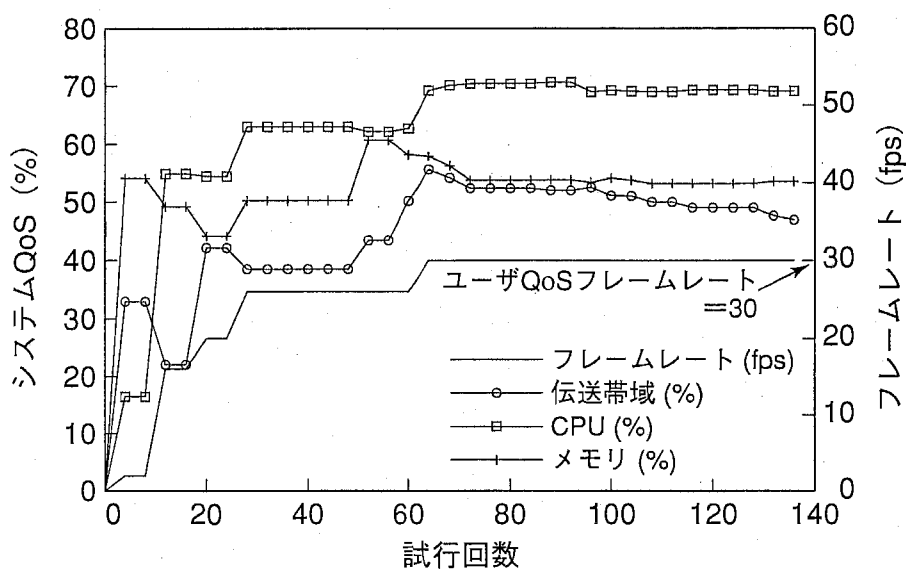


図 6 再生フレームレートおよびシステム QoS の推移

5.3 複数のユーザ QoS に対するルール獲得

ネットワークと端末の利用状況によっては、常に同じ品質の動画像を受信端末上にて再生できるとは限らない。また、動画像のコンテンツによっては、要求されるユーザ QoS が異なることも考えられる。このような場合、ユーザから新たなユーザ QoS が入力される度にルールの獲得を行う必要がある。前節のシミュレーション結果で示されたように、本提案手法によるルール獲得には複数の試行回数を要するため、ユーザが希望する品質で動画像が再生されるまでにある程度のタイムラグが生ずる。ユーザ QoS が頻繁に変更される場合には、このようなタイムラグはできるだけ少ない方が望ましい。

ルールベース中のルール群は、報酬として各ルールに割り当てられる信頼度に基づいて更新される。信頼度は、各ルールのユーザ QoS に対する適合度合いである前件部適合度に比例して与えられるため、最終的に獲得されるルール群の中で QoS マッピングに必要であるルールは、前件部適合度を持つルールのみである。ユーザ QoS の値が変化すると前件部適合度を持つルール集合も変わるため、様々なユーザ QoS を与えていくに従い、前件部適合度を持つルール集合の和集合としてルールベース中のルール群が次第に形成されていく。また、類似したユーザ QoS を与えた場合、前件部適合度を持つルール集合も類似したものとなるため、以前に獲得されたルール集合同士の相互補完効果による試行回数の減少が期待される。

そこで、本節では様々なユーザ QoS が与えられたときのルール獲得に要する試行回数を調べる。ルールベースに用意するルール数 $n_{rule} = 200$ とし、100 種類のランダムに生成したユーザ QoS に対してルールの獲得を順次行い、その試行回数の推移を図 7 に示す。横軸はユーザ QoS のパターン番号、縦軸は各ユーザ QoS パターンにおけるルール獲得に要した試行回数である。ユーザ QoS によりばらつきがあるものの、ルール獲得に要する試行回数はほぼ横這い状態であ

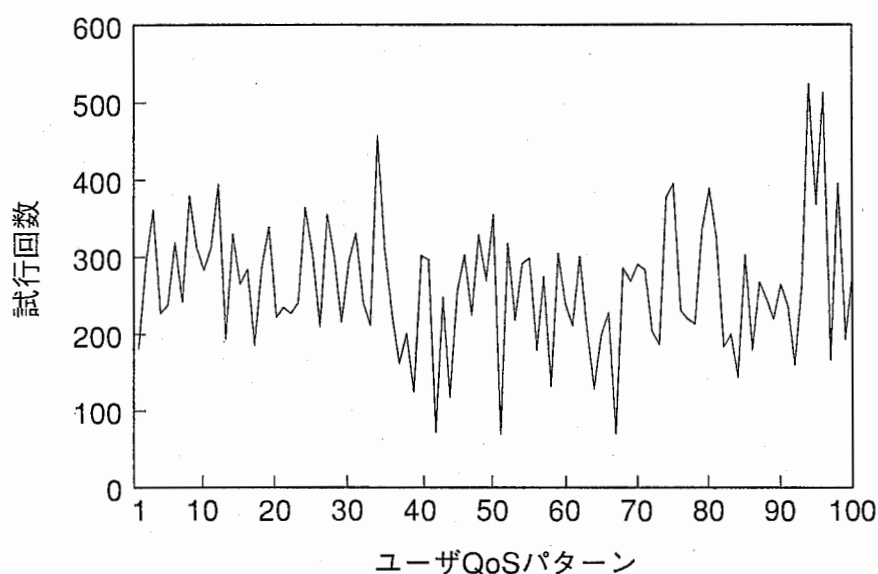


図 7 様々なユーザ QoS を与えたときのルール獲得に要する試行回数の推移

り、ユーザ QoS の増加に伴う試行回数の減少は見られなかった。そこで、各ユーザ QoS に対して前件部適合度を持つルール数を調べてみたところ、試行回数を経るに従って該ルール数は増加していき、ルール獲得が終了する頃には、ルールベース中の大多数のルールが前件部適合度を持つ状態であった。これは、4.1.4 のルール改善において信頼度が高いルールが低いルールに取って代わり、試行回数を経るに従って前件部適合度を持つルールが大多数を占めることに起因する。そのため、既に獲得されているルール群が新たなルール獲得のために破壊されてしまい、ルール獲得に要する試行回数の減少を妨げていると考えられる。

そこで、前件部適合度が高いものから順に n_{fired} 個のルールを選んでファジィ推論を行い、それ以外のルールの前件部適合度を 0 とする。また、4.1.4 において淘汰される n_{kill} 個のルールとして、以前のユーザ QoS におけるルール獲得にて前件部適合度を持ったルールを非優先的に選ぶこととする。そして、ファジィ推論の対象となるルール数 $n_{fired} = 4$ 、淘汰されるルール数 $n_{kill} = n_{rule} \times 0.2$ 、ルールベースに用意するルール数 $n_{rule} = 400$ として、先程と同じ 100 種類のユーザ QoS に対するルール獲得を行った結果を、図 8 の実線で示す（図中の破線は図 7 で示したものの）。ユーザ QoS によりばらつきがあるものの、入力として与えるユーザ QoS パターンが増加するに従い、各ユーザ QoS におけるルール獲得に要する試行回数が次第に減少している様子が分かる。また、各ユーザ QoS に対するルール獲得において n_{fired} 個のルールが前件部適合度を持つため、 $n_{rule} = 100 \times n_{fired} = 400$ としたが、100 種類のユーザ QoS に対するルール獲得過程において、トータルで 136 個のルールのみが前件部適合度を持つという結果が得られた。これは、新たなユーザ QoS に対するルール獲得において、以前に獲得されたルール同士の相互補完により新たなルールが生成されていることを示しており、このことが試行回数の減少に繋がっていると考えられる。

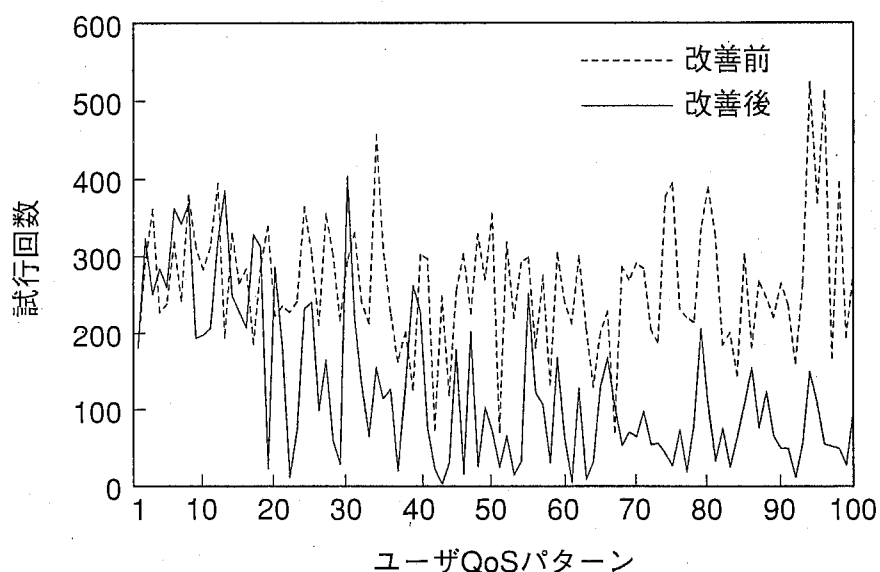


図 8 様々なユーザ QoS を与えたときのルール獲得に要する試行回数の推移 (改良後)

6. おわりに

本レポートでは、FCSによるQoSマッピングルールの自律的な獲得手法を提案し、受信端末主導型の動画像伝送における本手法の適用方法について述べた。そして、計算機シミュレーションにより、本提案手法の有効性の検証を行った。その結果、受信端末上で再生される動画像品質とルールから出力されるシステムQoSに基づいて設定される報酬に従って、ユーザQoSで示される品質にて動画像伝送を行うためのシステムQoSを導出するQoSマッピングルールが獲得された。また、新たなユーザQoSを逐次与えていく場合、以前に獲得されたルール同士の相互補完効果により、各ユーザQoSにおけるルール獲得に要する試行回数が次第に減少していくという結果が得られた。しかし、新たなユーザQoSにおけるルール獲得の際には依然としてある程度の試行回数を要するため、ルールの表現や更新方法などを改善することにより、試行回数を更に減少させていくことが今後の課題として挙げられる。

本レポートでは、送信端末から受信端末に向けて動画像を伝送する際の受信端末側におけるQoSマッピングルールの獲得について述べたが、1つの端末で送信と受信の両方を行う場合においても、本提案手法の適用は可能である。また、動画像の送受信を行っている最中にネットワーク資源や端末資源を共有する他のアプリケーションが起動すると、それらのアプリケーションとの間で資源の再配分が行われるため、使用可能な資源量が減少することがある。このような場合、ユーザQoSを下げることで資源量を調節するといった対処が必要となるが、資源の減少量に応じてユーザQoSの下げ幅を求めるための、いわば逆QoSマッピングを行うためのルール獲得に対しても、本提案手法の適用が有効である。

謝辞

日頃ご指導頂く、(株)エイ・ティ・アール環境適応通信研究所小宮山牧兒社長、松田潤第一研究室室長、荻野長生主幹研究員、ならびに第一研究室各研究員に感謝致します。

参考文献

- [1] C. Aurrecochea, A.T. Campbell, and L. Hauw, A survey of QoS architectures, ACM/Springer Verlag Multimedia Systems Journal, Special Issue on QoS Architecture, vol.6, no.3, pp.138-151, May 1998.
- [2] K. Nahrstedt and J.M. Smith, The QoS broker, IEEE Multimedia, vol.2, no.1, pp.53-67, Spring 1995.
- [3] The ATM Forum Technical Committee, Traffic management specification version 4.0, Apr. 1996.
- [4] R. Braden, L. Zhang, D. Estrin, S. Herzog, and S. Jamin, Resource reservation protocol (RSVP) - version 1 functional specification, RFC2205, Sep. 1997.
- [5] 阿部 陸, 嶋野淳子, 渥美幸雄, “端末におけるサービス品質保証方式の提案と評価,” 信学論 (B), vol.J82-B, no.5, pp.711-721, May 1999.
- [6] 呉 世雄, 藤川和利, 松浦敏雄, 下條真司, 宮原秀夫, “分散型マルチメディアシステム Symphony におけるQoS指定を含んだシナリオ記述言語の設計,” 信学論 (B-I), vol.J79-B-I, no.5, pp.329-337,

May 1996.

- [7] 山崎達也, 松田 潤, “スプライン関数を用いたQoSマッピング,” 1998信学総大, SB-11-2, pp.728-729, Mar. 1998.
- [8] 福田健太郎, 若宮直紀, 村田正幸, 宮原秀夫, “利用可能なネットワーク資源とエンドシステムのCPU資源を考慮したMPEG-2動画像転送,” 信学技報, CQ98-47, pp.13-20, Oct. 1998.
- [9] L.P. Kaelbling, M.L. Littman, and A.W. Moore, Reinforcement learning : a survey, Journal of Artificial Intelligence Research 4, pp.237-285, May 1996.
- [10] R.S. Sutton, Learning to predict by the methods of temporal differences, Machine Learning, vol.3, pp.9-44, 1988.
- [11] C.J.C.H. Watkins and P. Dayan, Technical note : Q-learning, Machine Learning, vol.8, pp.279-292, 1992.
- [12] J.H. Holland, The possibilities of general-purpose learning algorithms applied to parallel rule-based systems, Machine Learning, R.S. Michalski and J.G. Carbonell, eds., vol.2, pp.593-623, 1986.
- [13] 中岡 謙, 古橋 武, 内川嘉樹, 前田 宏, “ファジィクラシファイアシステムの報酬と信頼度割り当てに関する一提案 —大規模システムにおける知識発見を目指して—,” 日本ファジィ学会誌, vol.8, no.1, pp.65-72, 1996.
- [14] R.R. Yager and L.A. Zadeh, Fuzzy sets, neural networks, and soft computing, Van Nostrand Reinhold, A Division of Wadsworth, Inc., 1994.
- [15] D.E. Goldberg, Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning, Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1989.