

動画像マルチキャスト通信における統合化資源割当制御

山下 岳人 若宮 直紀 村田 正幸 宮原 秀夫

大阪大学 大学院基礎工学研究科 情報数理系専攻

〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

Tel: 06-6850-6588 Fax: 06-6850-6589

E-mail: tkt-ymst@ics.es.osaka-u.ac.jp

あらまし

資源予約型システム上の動画像マルチキャストアプリケーションにおいては、限られたシステム資源をそれぞれのクライアントに効果的に割り当てることにより高品質な動画像をユーザに提供することができる。本稿では、動画像品質と必要となるネットワークおよびCPU資源との関係を用い、利用可能な資源量にもとづいてシステム全体で効率的な資源割当を行うアルゴリズムを提案する。このアルゴリズムでは、クラスタリングによってユーザを適切なマルチキャストセッションに収容することでネットワーク、サーバに与える負荷を軽減し、ユーザの得る「利得」と必要資源に対する「コスト」によって表現される「効用」を最大化することにより割当資源量を決定する。提案アルゴリズムを用いることにより、限られた資源の範囲内で高品質な動画像通信が実現できることを示している。

キーワード ユーザ効用, 資源割当, QoS 保証, マルチキャスト通信

Integrated Resource Allocation Scheme for Real-Time Video Multicast

Taketo YAMASHITA Naoki WAKAMIYA Masayuki MURATA Hideo MIYAHARA

Department of Informatics and Mathematical Science,
Graduate School of Engineering Science, Osaka University

1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan

Tel: 06-6850-6588 Fax: 06-6850-6589

E-mail: tkt-ymst@ics.es.osaka-u.ac.jp

Abstract

For providing distributed multimedia applications with end-to-end QoS (Quality of Service) guarantees, resource reservation based control mechanisms should be employed in both of networks and end systems. In this paper, we propose a resource allocation scheme for maximizing the user's utility, which is represented as relation between benefit obtained through allocated resources and cost paid for them. In the scheme, each client is accommodated in the proper cluster to reduce the load of the server and the networks. We confirm that our proposed scheme can achieve an effective use of resources while providing high quality video transfer.

key words utility, resource allocation, QoS guarantees, multicast transfer

1 はじめに

実時間動画データを利用する分散型マルチメディアシステムにおいては、サーバで取り込んだ動画を実時間で符号化、転送、受信、復号化して再生を行う。このようなアプリケーションにおいて、効果的かつ効率的にサービスを提供するためには、動画の符号化、復号化の実時間処理、転送遅延や動画の品質などに関するさまざまな QoS (Quality of Service) 保証が必要となる [1]。

情報の損失や伝送遅延といったネットワークレベルの QoS を保証するためには、帯域予約型ネットワークを用いることが有効である [2]。一方、エンドシステムにおいて高品質な動画の符号化、復号化を実時間で行うためには、処理遅延やデッドライン制御などの QoS 保証が必要となる。このような CPU レベルの QoS 保証を提供するためには、タスクの優先度や時間的制約を考慮した CPU 資源のスケジューリングを行うことのできるリアルタイム OS を用いることが有効であると考えられる [1, 3-6]。これらリアルタイム OS と帯域予約型ネットワークを組み合わせることにより、高品質な動画の実時間通信を実現可能であると考えられるが、動画通信に必要なネットワークおよび CPU 資源を適切に予測し、また確保しなければ、アプリケーションの要求する実時間性や動画品質を保証することはできない。

MPEG-2 動画通信においては、ネットワークおよびエンドシステムで必要となる資源量と、それらを利用することにより得られる動画品質の間には強い相関があり [7]、さらに、文献 [8, 9] においては、割り当てられた資源から得られる「利得」と資源に対して支払う「コスト」の関係によって表されるユーザの「効用」の総和を最大化し、限られたネットワークの帯域、エンドシステムの CPU 資源の範囲内で高品質な動画マルチキャスト通信を行うための資源割当制御手法が提案されている。しかしながら、提案手法では、サーバのアクセスリンクなど全てのクライアントが競合するボトルネックの帯域しか考慮しておらず、複数ドメインからなる広域ネットワークなどクライアントによってボトルネックの異なる環境には適用できない。

そこで、本稿では、資源予約型の動画マルチキャストシステムにおいて、エンドシステムの CPU 資源およびクライアントのアクセスリンクを含めたマルチキャストツリーの各リンク帯域を割当資源として考え、それぞれの利用可能な資源をユーザへ効率的に割り当てるための手法を提案する。そのため、あらためて「効用」、「利得」、「コスト」を定義し、効用の総和を最大化することにより、有限な資源の有効利用を図るとともにユーザに高品質な動画を提供することのできる資源割当制御手法を提案する。また、マルチキャストセッション構成にクラスタリング手法を用い、同様の資源状況にあるクライアントを同じセッションに収容することで、共有資源

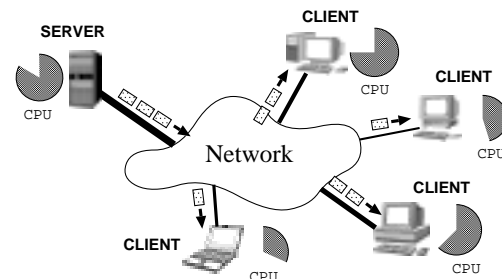


図 1: システムモデル

であるサーバ CPU やリンク帯域の負荷を軽減する。

以下、2 章では本稿で対象とするシステムについて説明し、3 章でマルチキャストにおけるクラスタリング手法およびマルチキャストツリーの生成手法について述べる。4 章ではネットワークおよびエンドシステムで必要となる資源量と動画品質との関係、およびユーザ効用の最大化を実現する資源割当制御手法の概要を述べ、その有効性についての評価を 5 章で行う。最後に 6 章でまとめと今後の課題について述べる。

2 統合化資源割当制御に基づく動画マルチキャスト

本稿では、図 1 に示すような動画マルチキャストシステムにおける効率的な資源割当制御のためのアルゴリズムを提案する。本システムは、それぞれ利用可能な帯域の異なる複数のリンクがマルチキャストルータによって接続されたネットワークと、ある限られた CPU 資源を有する一台の動画サーバ、およびそれぞれ利用可能な CPU 資源に限りのある複数のクライアントから構成されている。なお、ネットワークは ATM, DiffServ, TTCP/ITM [6] など帯域予約が可能なものとし、また、エンドシステムは Real-Time Mach [3], Tactix [6] などのリアルタイム OS によりタスク単位の CPU 資源割当が可能であるものとする。

まずサーバは、提供するサービスの開始時刻、内容をブロードキャストあるいはサービス通知用マルチキャストアドレスを用いてユーザに告知する。サービスを利用したいユーザはクライアントシステムで利用可能な CPU 資源量を調査、確保し、サーバへ通知する。次に、サーバは自身の利用可能な CPU 資源量およびネットワークの各リンク帯域を調査し、収集した情報にもとづいてマルチキャストセッションを設定し、それぞれのクライアントに対する割当資源量と提供する動画品質を決定する。

提案手法では、クライアントを利用可能な CPU 資源量にもとづいてクラスタリングすることにより、マルチキャストセッションを構成する。それぞれのセッションごとにツリーを決定し、共有資源であるサーバ CPU 資源とネットワーク帯域をこれらセッション間で効率的に割り当てることとなる。利得とコストによって表現され

るユーザ効用の総和を最大化する最適化問題として資源割当を定式化し、ヒューリスティックなアルゴリズムでこれを解くことにより、適切な割当資源量を導出する。ただし、利得とコスト、すなわち動画品質と必要となる資源量の関係は、MPEG-2 符号化動画に関するこれまでの研究で得られた変換式によって表される [7]。続いて、サーバは自身の CPU 資源およびマルチキャストセッションへの帯域割当を行うと同時に、各クライアントへ動画受信、再生に必要な CPU 資源量を通知する。クライアントの CPU 資源を割り当てるとともに、サーバは各セッションに対して動画転送を開始する。

3 クラスタリングによるマルチキャストセッションの構成

動画マルチキャスト通信に参加するクライアントはそれぞれ利用可能な帯域や CPU 資源量が異なるため、高品質かつ効率のよい動画マルチキャスト通信を実現するためには、個々のクライアントの受信、再生可能な動画品質を考慮してマルチキャストセッションを構成しなければならない。そこで、本稿では、同程度の品質の動画を受け取るクライアントを同じマルチキャストセッションに収容することにより必要となるセッション数を減らして負荷軽減を図ると同時に、それぞれのクライアントに合った動画マルチキャストを実現する。クライアントの受信、再生可能な動画品質は、利用可能な帯域、クライアント CPU 資源量に依存するが、利用可能な帯域はマルチキャストツリー生成後に決まるため、本稿ではクライアントの CPU 資源量にもとづいてクラスタリングを行うことにより、クライアントの属するセッションを決定する。続いて、クラスタごとにマルチキャストツリーを生成し、それぞれのクラスタの利用可能な帯域を導出する。

例えば、図??のようにサーバ S から 5 つのクライアント C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 へのマルチキャストにおいて、クラスタリングによって $\{C_1, C_2\}, \{C_3, C_5\}, \{C_4\}$ の 3 つのクラスタに分割された場合、それぞれのクラスタに対してマルチキャストツリーが生成され、動画が配送されることになる。その結果、クライアント C_1, C_2 に対するボトルネックリンクは l_7 となり、一方で $C_3 \sim C_5$ のボトルネックリンクは l_8 となり、それぞれのリンク帯域を考慮した資源割当が必要となる。ただし、図中ではそれぞれのリンクでの利用可能な帯域を括弧内に示しており、ツリーはできるだけ空き帯域が多く、かつホップ数が少なくなるよう生成される。

3.1 クライアントのクラスタリング

複数の標本値をその類似度からいくつかのグループ(クラスタ)に分類するクラスタリングアルゴリズムとして、種々の手法が提案されている [10]。本稿では、あらかじめ与えられたクラスタ数 k にしたがってユークリッド距

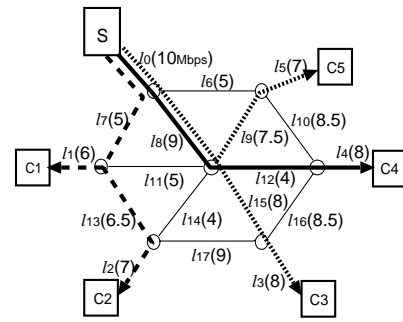


図 2: マルチキャストツリー生成例

離にもとづいたクラスタリングを行う k -平均クラスタリングアルゴリズムを用いて、クライアントの CPU 資源量によるクラスタリングを行う。

3.2 マルチキャストツリーの生成

クラスタリングにより決定されたクラスタは、それぞれ異なる品質の動画を配送するマルチキャストセッションに対応し、クラスタごとにマルチキャストツリーを生成する。高品質な動画を効率よく配送するため、ツリーは利用可能な帯域が大きいリンクを通り、また全体のパス長が短くなるよう設定する。そのため、リンクコストをその利用可能な帯域の逆数で与え、単純なアルゴリズムで Steiner Tree 問題の近似解を得ることができる LMC アルゴリズム [11] を用いてマルチキャストツリーを生成する。

3.3 最適クラスタ数の導出

k -平均クラスタリングでは与えられたクラスタ数 k にもとづいてクラスタリングを行うが、クラスタ数、すなわち、マルチキャストセッション数によって構成されるツリー、資源割当、さらには達成される効用も異なる。したがって、より効果的な資源割当を行うためには、クラスタ数をさまざまに変更してクラスタリングと資源割当を繰り返すことにより、最も高い効用を達成できるクラスタ構成を得る必要がある。

それぞれのクラスタには、クラスタ内の全てのクライアントが受信、再生可能なように、クラスタ内で最も利用可能な資源量の少ないクライアントに合わせた動画が配送される。したがって、例えばクラスタ数が小さい場合には、クラスタあたりクライアント数が多くなるため、多数のクライアントが本来受信、再生可能な品質を大きく下回る動画を配送されることになり、高い効用を得ることができない。一方、クラスタ数が増えると、より多くのマルチキャストセッションを設定しなければならず、クライアントあたりの利用可能な帯域が小さくなるため、高品質な動画を提供することができない。このことから、効用はクラスタ数に対して上に凸な関数になると考えられる。そこで、クラスタ数を 1 から順に最大値、すなわちクライアント数まで増加させ、クラスタリング、資源割当を行い、効用が上がらなくなった時

点を最適なクラスタ数とする。

4 システム全体の効用最大化を目的とした資源割当制御

ネットワークレベルの QoS 保証を行う帯域予約型ネットワークと、エンドシステムレベルの QoS 保証を行うリアルタイム OS を組み合わせ、システム全体において効率よく資源を割り当てることで、高品質な動画像の実時間通信が可能になる。そのために、動画像品質によって表現されるユーザの「利得」を資源に対する「コスト」で割ることにより得られる「効用」をクラスタごとに導出し、その総和が最大になるよう割当資源量を決定する。ユーザに提供する動画像品質を高めると同時に資源の利用率を下げることであれば、効率のよい動画像マルチキャストが行えると考えられるため、利得関数を動画像品質に対して単調増加な、またコスト関数を資源量に対して単調増加な関数として定義する。

さらに、アプリケーションレベルの QoS である動画像品質と、システムレベルでの QoS である帯域、CPU 資源量の関係をこれら利得、コスト関数に導入することにより、例えば、エンドシステム資源をより多く費すことにより、動画像品質を下げることなく必要となるネットワーク資源を減らすなど、各資源間の相関にもとづく効率的な割当が可能となる。また、クラスタ間においても、動画像品質が比較的低いときには少しの資源量をクラスタに対して追加配分することにより品質を大きく向上させることができ、逆に品質が高いときには、少し品質を下げるだけで多くの空き資源が生み出せるという関係が生まれる。したがって、高品質な動画像を割り当てられたものが共有資源をゆずって、資源に余裕のないクラスタの動画像品質を高めることで、資源利用率はそのままに利得を高め、全体の効用を上げることができる。

4.1 動画像品質と必要資源量の関係

本節では、MPEG-2 の符号化パラメータと動画像通信に必要な資源量との関係について簡単に述べる [7]。

まず、動画像転送に必要な帯域 BW [Mbps] は、空間解像度 R [ピクセル]、SNR 解像度 Q 、時間解像度 F [fps] および GoP 構成 G を用いて以下の式で表される。

$$BW(R, Q, F, G) \cong 3.1 \log_4 \frac{R}{640 \times 480} \left(\alpha + \frac{\beta}{Q} - \frac{\gamma}{Q^2} \right) \frac{F}{30} BW_{base} \quad (1)$$

ここで、 BW_{base} は解像度および GoP 構成が $(R, Q, F, G) = (640 \times 480, 10, 30, G)$ の動画像の必要帯域に相当し、 α 、 β 、 γ は GoP 構成毎に決定される定数である。

次に、サーバにおいて動画像の実時間符号化に必要な CPU 資源量 S [Mcycle/sec] は、GoP 構成 G にもとづいて決定される定数 S_G より次式で導出可能である。

$$S \cong S_G \frac{R}{640 \times 480} \frac{F}{30} \quad (2)$$

最後に、クライアントにおいて動画像の復号化に必要な CPU 資源量 C [Mcycle/sec] は次式で表される。

$$C \cong BW \times 40 + (870 + \frac{N_p}{N} \delta + \frac{N_b}{N} \varepsilon) \frac{R}{640 \times 480} \frac{F}{30} \quad (3)$$

ここで、 N は GoP を構成するピクチャの枚数、 N_p 、 N_b はそれぞれ GoP 内の P、B ピクチャの枚数である。また δ 、 ε は、それぞれ P、B ピクチャの GoP 構成に占める割合に比例して増加する CPU 資源量を表している。

式 (1)~(3) を用いることにより、動画像の実時間通信を実現するためにネットワークやエンドシステムにおいて必要となる資源量を、MPEG-2 符号化パラメータから予測することが可能となる。

4.2 効用関数の定義

エンドシステム資源とネットワーク資源の相関を考慮し、利得とコストによって表されるクラスタ効用の総和を最大化するよう資源を割り当てる。

クラスタ i の効用 U_i は次式のように利得 $Benefit_i$ のコスト $Cost_i$ に対する比で表される。

$$U_i = Benefit_i / Cost_i \quad (4)$$

クラスタ i の利得 $Benefit_i$ は割り当てられた動画像の品質 $quality_i$ (量子化スケール Q の関数) とクラスタ i のクライアント数 m_i で表される。

$$Benefit_i = quality_i \times m_i \quad (5)$$

コストは割当資源の対価であると考え、利用可能な資源量に対する利用率 [%] を帯域、サーバ CPU、クラスタ CPU 各資源のコストとする。クラスタのコストはこの 3 つのコストの和あるいは積で表され、和をコストとする場合にはそれぞれの資源の利用量の増減が、積の場合には利用率の増減が総コストに大きな影響を与える。本稿では、利用率の変化が同じでも、実際に利用する量が大きく変化した資源ほど全体のコストに与える影響も大きくなると考え、各資源のコストの和をそのクラスタ全体のコストとする。また、利用率が高い資源ほど、その変化の割合がコストに与える影響も大きくなると考えられるため、各資源のコストの二乗和をクラスタ i のコストとする。したがって、コスト関数は式 (6) のように表すことができる。

$$Cost_i = \zeta \{ \text{帯域コスト} \}^2 + \eta \{ \text{サーバ CPU コスト} \}^2 + \theta \{ \text{クラスタ CPU コスト} \}^2 \quad (6)$$

ここで、 ζ 、 η 、 θ は各コストの重要度に応じて決められる値である。いずれかの資源の必要量が利用可能な量を超える場合は、割当不能としてコストを無限大とする。

クラスタ i の帯域のコストは、リンク帯域の利用率の和で表される。

$$\text{帯域コスト} = n_i \times \frac{BW_i}{BW_i^{free}} \times 100 \quad (7)$$

ここで、 BW_i はクラスタ i に割り当てられた動画の転送に必要な帯域、 BW_i^{free} はマルチキャストツリー i で利用可能な帯域を表す。また、 n_i はマルチキャストツリー i の経由するリンク数を表す。

サーバ CPU のコストは、クラスタ i に割り当てられた動画の符号化に必要な CPU 資源量 S_i の、利用可能なサーバ CPU 資源量 S^{free} に対する百分率で表す。

$$\text{サーバ CPU コスト} = \frac{S_i}{S^{free}} \times 100 \quad (8)$$

クラスタ CPU コストは、クラスタ内のクライアントの CPU 利用率の平均で与えられるものとする。

$$\text{クラスタ CPU コスト} = \frac{1}{m_i} \sum_j \frac{C_i}{C_{ij}^{free}} \times 100 \quad (9)$$

ここで、 C_i はクラスタ i に割り当てられた動画の復号化に必要な CPU 資源量、 C_{ij}^{free} はクラスタ i に属するクライアント j の利用可能な CPU 資源量を表す。

4.3 最適化問題

4.2 節で定められた効用関数を最適化問題として定式化し、これを解くことで効率的な資源割当を決定する。

$$\text{maximize } \sum_i^k U_i \quad (10)$$

割当資源量はそれぞれ利用可能な資源量を超えることはできないため、以下のような制約条件を与える。

$$\forall l \sum_i^k BW_i \cdot Z(i, l) \leq BW(l)^{free} \quad (11)$$

$$\forall i \quad BW_i \leq BW_i^{free} \quad (12)$$

$$\sum_i S_i \leq S^{free} \quad (13)$$

$$\forall i, j \quad C_i \leq C_{ij}^{free} \quad (14)$$

ここで、 k はクラスタ数、 $BW(l)^{free}$ はリンク l の空き帯域を表す。 $Z(i, l)$ はクラスタ i がリンク l を通れば 1、そうでなければ 0 の値を取る。

これを以下のヒューリスティックな手法を用いて解く。

1. サーバ CPU 資源を各クラスタに均等に配分する。
2. クラスタごとに、利用可能な資源量の範囲内でクラスタの効用が最大となるような資源割当を決定する。
3. 全てのクラスタにおけるクラスタ内資源割当の結果生じたサーバ CPU 資源と帯域の余剰を、適切なクラスタに必要十分なだけ追加配分する。ただし、ここで適切なクラスタとは余剰資源を追加することによる効用の増分が最も大きいものを指す。
4. どのクラスタの効用も上がらなくなるか、余剰資源が生じなくなるまで 3 の処理を繰り返す。

本手法により、クラスタごとの割当資源量が決定されると同時に、4.1 節に示した関係より配送される動画の品質も定められる。

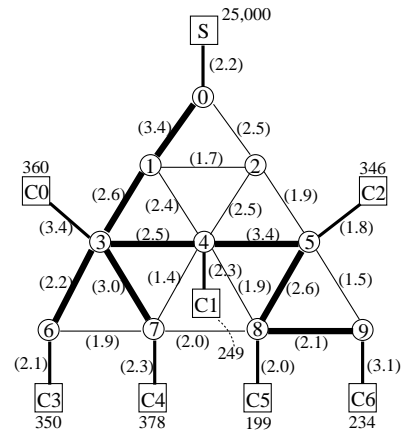


図 3: ネットワークモデル

5 評価

本章では、提案した資源割当制御アルゴリズムをユーザの資源状況がさまざま異なるマルチキャストネットワークモデルに適用し、その有効性について評価を行う。

評価に際しては、図 3 のような 10 個のノードを持つネットワークにサーバ S および 7 台のクライアント ($C_0 \sim C_6$) が接続されたモデルを用いた。各リンクの括弧内の数字は利用可能な帯域 [Mbps] を、サーバおよびクライアントの数値は利用可能な CPU 資源量 [Mcycle/sec] を表している。なお、動画データとしては、空間解像度 320×240 pixels、時間解像度 30 fps の動画シーケンス “Animation” を用い、マルチキャストセッションによらず同じであるものとした。また、コスト関数 (6) における重み ζ, η, θ はいずれも 1.0 としている。

クラスタ数 k について、各マルチキャストセッションの効用とクライアント数、動画品質および効用の総和を表 1 に示す。ただし、動画品質は SNR 解像度 Q で表しており、値が小さいほど画質が高い。

クラスタ数 1 の場合には、一般的なマルチキャストと同様に全てのクライアントが同じセッションに収容され、図 3 中太線で示されたマルチキャストツリーが生成される。それぞれのクライアントで利用可能な資源量に関わらず、全てのクライアント中で最も小さいリンク容量 (クライアント C_2 のアクセスリンク) と最も少ない CPU 資源量 (クライアント C_5) にもとづいて動画が決定されるため利得が低くなり、高い効用が得られない。ただし、提案手法では利用可能な資源の範囲内で行える限り高い品質の動画を得られるよう、資源間の依存関係を考慮した資源割当が行われる。一方、クラスタ数が増えるにしたがい、各クラスタで利用可能な資源に合わせた適切な資源割当、動画配送が行えるようになり、効用も高くなる結果が得られている。しかしながら、クラスタ数が増えすぎると負荷が高くなり、コストが増加する一方でそれぞれのセッションに割り当てられる資源量が少なくなるため、動画品質が低くなり、効用が下

表 1: 各クラスタの効用 ($\times 10^{-4}$) / クライアント数 / 動画像品質

クラスタ No.	クラスタ数 k						
	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$	$k = 5$	$k = 6$	$k = 7$
1	4.36 / 7 / 40	1.83 / 4 / 40	0.87 / 3 / 40	0.51 / 3 / 40	0.22 / 2 / 40	0.16 / 2 / 40	1.14 / 1 / 40
2		3.62 / 3 / 20	3.62 / 3 / 20	2.32 / 2 / 24	1.76 / 2 / 32	0.82 / 1 / 32	0.78 / 1 / 40
3			2.53 / 1 / 28	2.07 / 1 / 32	0.24 / 1 / 40	1.34 / 1 / 24	0.79 / 1 / 40
4				1.17 / 1 / 16	0.93 / 1 / 20	1.89 / 1 / 32	0.10 / 1 / 40
5					2.39 / 1 / 24	0.69 / 1 / 28	0.10 / 1 / 40
6						0.17 / 1 / 40	0.92 / 1 / 32
7							1.12 / 1 / 40
効用の合計	4.36	5.45	7.02	6.07	5.54	5.07	4.95

がることが示されている。

以上より、提案した資源割当制御手法を用いることで、各資源の利用可能な量を考慮しつつクライアントを最適なマルチキャストセッションへ収容し、各セッションで利用可能な資源量に合った品質の動画像通信を提供できることが示された。

6 おわりに

本稿では、資源予約型の動画像マルチキャスト通信システムにおいて、ネットワークおよびエンドシステムで利用可能な資源量にもとづいてユーザ全体の効用を最大化する資源割当制御を提案し、その有効性を示した。

ただし、提案手法においては、サーバで全ての処理を行うことを仮定しているため、分散型アルゴリズムを用いるなどの手法について検討したい。また、複数サーバによる負荷分散などについても今後の課題としたい。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業における研究プロジェクト「高度マルチメディア応用システム構築のための先進的ネットワークアーキテクチャの研究」、文部科学省科学研究費補助金奨励研究(A)12750322、文部科学省平成13年度科学技術振興調整費による「高速ネットワーク環境下における高度医療アプリケーションの研究開発」および通信・放送機構「次世代広帯域ネットワーク利用技術の研究開発プロジェクト」によっている。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] K. Lakshman and R. Yavatkar, "Integrated CPU and network-I/O QoS management in an endsystem," *Proceedings of IFIP IWQoS '97*, pp. 167–178, May 1997.
- [2] K. Fukuda, N. Wakamiya, M. Murata, and H. Miyahara, "QoS mapping between user's preference and bandwidth control for video transport," *Proceedings of IFIP IWQoS '97*, pp. 291–302, May 1997.

- [3] H. Tokuda, T. Nakajima, and P. Rao, "Real-Time Mach: Towards a predictable Real-Time system," *Proceedings of USENIX Mach Workshop*, pp. 73–82, October 1990.
- [4] C. W. Mercer, S. Savage, and H. Tokuda, "Processor capacity reserves: Operating system support for multimedia applications," *Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems*, pp. 90–99, May 1994.
- [5] C. Lee, R. Rajkumar, and C. Mercer, "Experiences with processor reservation and dynamic QoS in Real-Time Mach," *Proceedings of Multimedia Japan*, March 1996.
- [6] M. Iwasaki, T. Takeuchi, M. Nakahara, and T. Nakano, "Isochronous scheduling and its application to traffic control," *Proceedings of 19th IEEE Real-Time Systems Symposium '98*, pp. 14–25, December 1998.
- [7] K. Fukuda, N. Wakamiya, M. Murata, and H. Miyahara, "QoS guarantees based on end-to-end resource reservation for real-time video communications," *Proceedings of 16th International Teletraffic Congress*, pp. 857–866, June 1999.
- [8] 福田 健太郎, 若宮 直紀, 村田 正幸, 宮原 秀夫, "ユーザ効用最大化を目的とした動画像通信のための資源割当制御," 電子情報通信学会 技術研究報告 (SSE99-15), pp. 19–24, May 1999.
- [9] K. Fukuda, *Integrated QoS Control Mechanisms for Real-Time Multimedia Systems in Reservation-Based Networks*. Ph. D. thesis, Osaka University, January 2000.
- [10] J. A. Hartigan, *Clustering algorithms*. John Wiley & Sons, 1975.
- [11] A. Shaikh, S. Lu, and K. Shin, "Localized multicast routing," in *Proceedings of IEEE GLOBECOM '95, (Singapore)*, pp. 1352–1356, November 1995.