

市場モデルによるアプリケーション QoS の制御: 実装上のトレード オフ

八 槇 博 史[†] 山 内 裕[†] 石 田 亨[†]

本稿では市場モデルに基づく資源割当て方式をマルチメディア通信に適用する際に問題となる、空間的トレードオフと時間的トレードオフという2つのトレードオフについて議論する。前者は計算コストと通信コストの間のトレードオフであり、各計算要素がどのようにネットワーク中に分散されるかに依存する。また後者は計算結果の精密性と環境への適応性との間のトレードオフであり、環境変化の速度に依存する。デスクトップ会合システムへの実装により、(1) 空間的トレードオフに関しては通信コストの大きい場合には集中的な実装が有利となること、および(2) 時間的トレードオフについては、環境変化が急激な場合には計算を早い時点で打ち切ることにより環境に追従する方が、計算を精密な解が求まるまで行うよりもよいことの2点を示し、また市場モデルに基づく資源割当て方式が、環境変化が特に速い場合においても有効に働くことを示した。

Market-based Application QoS Control: Implementation Tradeoffs

HIROFUMI YAMAKI,[†] YUTAKA YAMAUCHI[†] and TORU ISHIDA[†]

In this paper, we discuss two major tradeoffs, spatial and temporal tradeoffs, that appear when applying market-based computing to multimedia network applications. The former appears between computation and communication cost, depending on how computation elements are distributed over network. The latter appears between reactivity and correctness of result, depending on how the network environment dynamically changes. By implementing a market-based resource allocation mechanism to a desktop conferencing system, we clarified that (1) as for spatial tradeoff, the centralized computation is profitable when the communication cost is extremely large, and that (2) as for temporal tradeoff, the merit to respond quickly to the change of the environment by prematurely terminating the computation supersedes the merit to improve the accuracy of the resource allocation by performing the calculation until the market perfectly clears. It has also been proved that the market-based mechanism can achieve efficient allocation in an actual network environment.

1. はじめに

マルチメディア通信では、1つの通信についてより多くの帯域を投入するほど、そこで提供されるサービスの品質はより高くなる。しかし、利用者間で帯域が共有される、たとえばインターネットといった環境では、利用者の要求は互いに衝突し、したがって、それらの間でなんらかの調停が必要となる。資源割当てのためにはネットワーク層のプロトコルとしていくつかのものが提案されてきてはいるが、実際にどれだけの資源を割り当てていくかといったポリシーに関しては十分に議論されてきているとはいえない。

本研究の目的は、利用者の選好 (preference) に基づいた資源割当て手法の確立にある。我々はこれまでに一般均衡理論における競争価格機構に基づいたアプ

ローチを提案してきた^{11),12)}。そこでは、利用者の選好を消費者エージェントとして、またアプリケーションの特性を生産者エージェントとしてそれぞれモデル化する。各エージェントは市場価格に基づいて入札の更新を行い、価格は需要と供給を均衡させるように調整される。それら相互作用の結果として、パレート最適な割当てが得られることが示されている。また、時間方向での取引きを可能とすることで、利用者の要求の動的変化にも対応した。これらが望ましい挙動を示すことはシミュレーションにより確認されている。

一般均衡に基づいたこれまでの研究においては、その理論的な性質が主に議論されてきたが^{1),3)~5),7),9)}、一方で、それらを実環境に適用する際に問題となる計算や通信といったコスト面での評価は本格的にはなされていない。本稿では、次の2種類のトレードオフという観点からこれらの問題を論じ、本方式の実アプリケーションへ実装を行うことでそれらを評価する。

[†] 京都大学大学院情報学研究所社会情報学専攻

Department of Social Informatics, Kyoto University

- 空間的トレードオフ

価格調整機構は原理的には分散型と集中型いずれの形態でも実装が可能であるが、そのいずれを選ぶかで計算時間と通信時間の間にトレードオフが生ずる。

- 時間的トレードオフ

市場モデルに基づく計算では、一般的には解が収束するまで繰返し計算を行う。通常のマルチメディアアプリケーションではそれぞれの通信に対する要求は刻一刻と変化していくと考えられ、たとえ繰返し計算を長く続けて精密な解を求めたとしても、その間の状況変化によってその解はまったく無用のものになってしまう可能性がある。これは精密性と反応性との間のトレードオフであるといえる。

本研究では、これまで我々が提案してきた市場モデルに基づくアプリケーション QoS の制御機構を、3次元仮想共有空間を用いたデスクトップ会合システム FreeWalk に実装し、上記のトレードオフを実環境において観察した。以下ではこれらのトレードオフを中心に、市場モデルに基づく資源割当て方式の実装時における課題について議論する。

2. FreeWalk における市場モデルによるアプリケーション QoS 制御

この章では、市場モデルによる資源割当てシステムの一例として、FreeWalk におけるアプリケーション QoS 制御^{11),12)}について説明する。

2.1 FreeWalk 会合環境

仮想3次元共有空間を用いたマルチメディアデスクトップ会合システム FreeWalk⁶⁾ (図1)では、利用者はクライアントプログラムをサーバに接続することにより共有空間に入ることができる。それぞれの利用者は仮想空間内の四角錐として表現され、長方形の面

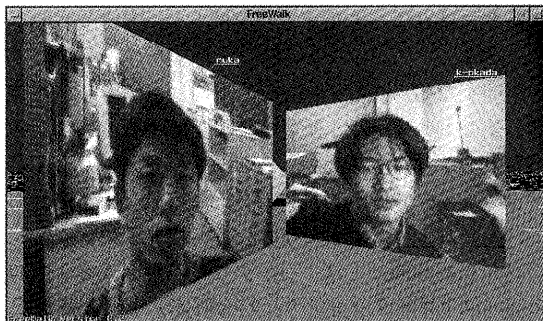


図1 デスクトップ会合システム FreeWalk

Fig. 1 FreeWalk: a multimedia conferencing tool.

には各利用者のカメラ動画像がマップされる。各利用者の視点はこの長方形の面の中心に置かれている。仮想空間の特性上、遠くにいる利用者の動画像は小さく、近くにいる利用者の動画像は大きく表示される。また、一定以上遠くにいる場合には動画像は表示されない。音声についても同様で、距離が遠くなるに従って音量は小さくなる。空間内を移動するための操作はすべてマウスを用いて行う。

このような環境では、利用者間の相対的な位置関係の動的変化にもよって、他の利用者の動画像の大きさは急速に変化する。それに従って、それぞれの動画像に対する利用者の選好もまた変化するものと考えられる。ネットワーク資源の割当てでもまたこれらの変化に応じて変化させなければならず、また変化速度に対応できるように高速に行う必要がある。

2.2 市場モデルによるアプリケーション QoS 制御

各利用者の多様な選好を総合して効率的な資源割当てを得るため、本研究では市場機構の導入というアプローチをとる。以下では、市場モデルによるアプリケーション QoS 制御の基本的枠組みについて説明する。

ここでの市場モデルを構築するための基本的な考え方は以下の2つである。

- (1) 利用者は、帯域などといったネットワーク資源の生の性能指標ではなく、その上で動くアプリケーションプログラムが提供するサービスの品質を直接的には評価するものである。
- (2) 「現在」のネットワークと「未来」のネットワークを区別し、それらの間での使用権のやりとりを可能とすることで、現在資源を必要としない利用者が他のそれを必要としている利用者に資源を譲る動機付けを行う。

図2にアプリケーション QoS 割当てのための市場モデルを示す。四角形は市場内で取引される財を表す。財には帯域 (bandwidth) とサービス品質 (QoS) の2種類があり、それらはさらに現在と未来とに分けられる。CBW と FBW は各々現在と未来との帯域であり、すべての利用者がこれを取引きの対象とする。

利用者 j から利用者 i への通信の現在サービス品質は q_{ij} で表される。 $FQoS_i$ は利用者 i が未来に受けるサービス品質であり、モデルの単純化のため、利用者ごとに1ずつ存在するものとする。

図中の円はエージェントである。左側のものは消費者エージェントであり、それぞれが1人の利用者の選好を代表している。利用者の選好は、割り当てられた財の組合せを引数とし、利用者により好まれる組合せほどその値が大きくなる関数という形でモデル化される。

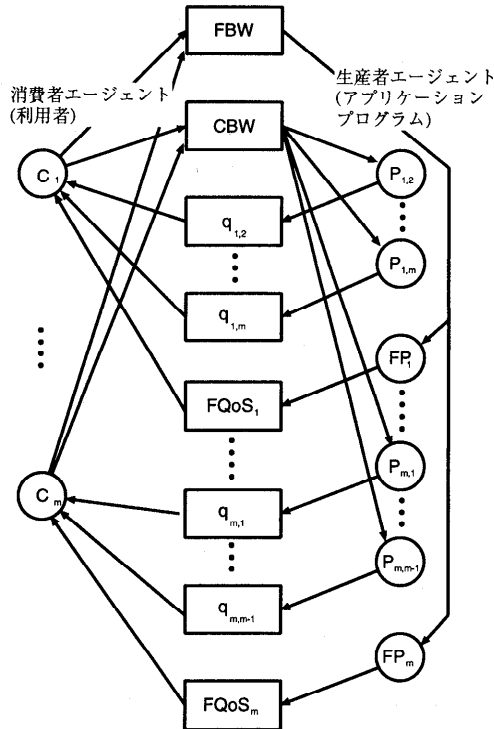


図2 QoS市場モデル
Fig. 2 QoS market model.

以下、この関数を効用関数と呼び、効用関数の値を単に効用と呼ぶものとする。消費者エージェントは、この効用を最大化するような入札を行うことで、利用者の選好に応じた資源の割当てを得ようとする。

また右側の円は生産者エージェントであり、アプリケーションプログラムが帯域を利用して利用者に対するサービスを行う場合の帯域からサービス品質へのマッピングを代表している。図中の矢印は市場内の財の流れである。利用者は帯域の使用権を有しており、これをアプリケーションプログラムがサービス品質へと変換する。生産されたサービス品質の価値（価格と量に乗じたもの）と、生産に用いた帯域の価値との差をこのエージェントの利潤と呼ぶ。

図3に市場計算機構の枠組みを示す。図中の円は、生産者や消費者といったエージェントを表し、角を丸めた四角は競売人を表す。上述のように、利用者の選好は消費者が、帯域からサービス品質へのマッピングは生産者が代表する。消費者と生産者は帯域やサービス品質といった市場内の財に対する入札を、各々が持つ効用や利潤の最大化問題を解くことで生成する。競売人は対応する財に対する入札を集め、需要と供給が均衡するように価格を変更する。この価格変更に対してエージェントは入札の再計算を行い、新しい入札を

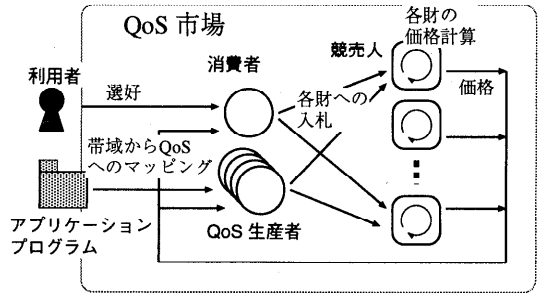


図3 市場モデルによるQoS制御のシステム構成
Fig. 3 System configuration for market-based QoS control.

競売人に送る。これを価格の変更が生じない状態にシステムがなるまで繰り返し、その後で財を実際に取り引きする。こうして得られる財の配分はパレート最適なものとなることが知られている。

以上のモデル化の詳細や、そこで得られる割当ての品質のシミュレーションによる評価などについては、すでに他の論文^{11),12)}で報告済みであり、そちらを参照されたい。

3. 空間的トレードオフと時間的トレードオフ

市場モデルに基づく資源割当ては一般に前節で述べたのと同様の繰返しをともなう計算となり、特に分散環境でメッセージ通信をともなう場合には正確な割当てを得るのに長時間を要する傾向がある。

この種のアлゴリズムを動的変化をともなう環境に実装する際には、このような遅延が致命的となることがある。以下では、割当て機構の有効性を左右する、空間的トレードオフと時間的トレードオフという2つのトレードオフについて議論する。

3.1 空間的トレードオフ

一般均衡に基づく方式においては、消費者や生産者、競売人といった計算要素をネットワーク中に分散して実装することができる。ここではそれぞれの計算要素の配置方法によって生ずる空間的トレードオフについて述べる。

本研究で扱うQoS市場モデルには、消費者、生産者、競売人といった3種類の計算要素がある。ここで、消費者および生産者といったエージェントは各利用者が操作するプログラム中に分散して実装するものとして、競売人をどのように分散して実装するかを考える。これには両極端として、(a)すべての競売人を1プロセス（以下オークションサーバと呼ぶ）中に実装して、エージェントとの通信も一括して行う場合と、(b)競売人を各々1つのオークションサーバとして実装し、

表1 QoS 市場内の計算要素数

Table 1 The number of market elements in QoS market.

財の数	現在の帯域	1
	未来の帯域	1
	現在のサービス品質	nk
	未来の QoS	n
エージェント数	消費者	n
	生産者	
	現在のサービス品質	nk
	未来のサービス品質	n
	競売人	$nk + n + 2$

それぞれがエージェントとの通信を行う場合とが考えられる。以下では前者を集中型実装、後者を分散型実装と呼ぶものとし、図2に示した市場モデルの上でそれぞれの得失を計算コストと通信コストの面から評価する。

ネットワーク中に n 人の利用者がいて、各々が k 本の通信リンクを使用しているとする。このときの財の数は、現在および未来の帯域が各1、現在のサービス品質が通信リンクの数だけあって nk 、未来のサービス品質の数が利用者数に等しく n となる。これを表1の上半分を示す。

表の下半分は市場中の生産者、消費者、競売人の数である。消費者数は利用者数と等しく n である。生産者数はサービス品質の数に等しいので、現在の nk と未来の n とをあわせて n となる。競売人は財ごとに存在するので、個数としては $nk + n + 2$ となる。

以上をふまえて、まず集中型実装について計算に要する時間の分析を行う。オークションサーバから各クライアントへ価格を送るのに要する時間を T_{pr} 、各クライアントからオークションサーバへ入札を送るのに要する時間を T_{pm} 、オークションサーバで入札をもとにして1つの財の価格を再計算するのに要する時間を T_c とする。すると、市場計算ですべての財の価格を1回更新するのに要する時間 T_{cent} は次のように求めることができる。オークションサーバからクライアントへの価格の送信に際してはサーバ側がボトルネックとなって nT_{pr} だけの時間がかかる。入札時にもやはりサーバ側にボトルネックがあり、 nT_{pm} の時間がかかる。また、価格の更新は直列に行われるため、 $(nk + n + 2)T_c$ だけの時間を要する。よって、 T_{cent} は以下の式で表すことができる。

$$\begin{aligned} T_{cent} &= nT_{pr} + nT_{pm} + (nk + n + 2)T_c \\ &= (T_{pr} + T_{pm} + (k + 1)T_c)n + 2T_c \quad (1) \end{aligned}$$

次に分散型実装について同様に考える。サーバからクライアントへの価格送信に T'_{pr} 、クライアントからサーバへの入札送信に T'_{pm} 、1つの財の価格再計算に

T_c にかかるものとする。前2者についてはデータ量に差があるため集中型のときは時間が異なってくることに注意されたい。価格および入札の通信におけるボトルネックは、今度はクライアント側にある。1つのクライアントが通信を行う競売人の数は、現在のサービス品質について $n - 1$ 個、および未来のサービス品質、現在および未来の帯域幅について各1個の計 $n + 2$ 個となる。各競売人がプロセッサを1つずつ占有するものとする、価格の計算は並列に行うことができる。これにより、分散型実装においてすべての財の価格を1回更新するのに要する時間 T_{dist} は以下のよう表すことができる。

$$\begin{aligned} T_{dist} &= (n + 2)T'_{pr} + (n + 2)T'_{pm} + T_c \\ &= (T'_{pr} + T'_{pm})n + T_c + 2(T'_{pr} + T'_{pm}) \quad (2) \end{aligned}$$

式(1)および(2)はいずれも利用者数 n に対して線形となっており、横軸を n 、縦軸を価格を1回更新するのに要する時間 T として平面上にプロットすると2つの直線が得られる。ここで、1つの入札メッセージや価格メッセージにのっているデータ量を比較すると、ここで、分散型実装では1つ1つの財に関して別になっているのに対して、集中型実装ではすべての財に関するデータがまとめていることが分かる。このため、一般に両直線の傾きの間には

$$T_{pr} + T_{pm} > T'_{pr} + T'_{pm} \quad (3)$$

という関係が成り立つと考えられる。また、計算時間 T_c が通信時間である T'_{pr} や T'_{pm} よりもかなり小さいことから、式(2)の T 切片は式(1)の T 切片よりも大きくなる。したがって、2直線は交差するはずであり、トレードオフが存在すると結論できる。

上記の2種類の実装のほかに、集中型実装をさらに推し進めて生産者や消費者といったエージェントをも1つのプロセス上に実装してしまう方法がある。この方法の利点としては、通信数を最小限におさえることで特に通信時間が著しく大きい場合に大幅な性能向上を見込めることにある。しかし、この方法では利用者の選好をすべてサーバに送ってしまう必要があることから、利用者の選好は秘密にし入札を通じてのみ表現されるべきという、市場アプローチの前提を崩す危険がある。

1つの解決策として、移動エージェントを用いるという手法がある。もし移動エージェントの内容が第三者によって不法に解読されたりしないような、安全なプラットフォームが将来的に提供されたならば、これを利用することで市場モデルを用いた資源割当て法に生じやすい過重な通信を抑制することが可能となるで

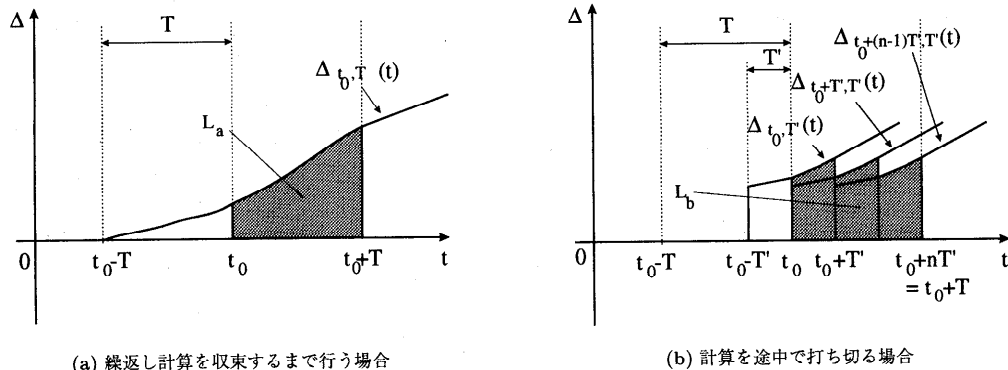


図4 割当てと環境との差によって生ずる損失
Fig. 4 Loss caused by the deviation between allocation and environment.

あろう。

3.2 時間的トレードオフ

一般均衡に基づくアルゴリズムでは、入札と価格更新を市場が競争均衡へと収束するまで行う。しかし、サービス品質への要求が激しく変化している状況で、古いパラメータを用いた計算をいつまでも行うというのは非現実的である。むしろ多少の誤差を残していても早めに計算を打ち切り、環境に適応していく方がよい場合も多いであろう。たとえば、FreeWalk 環境においては数分の1秒単位での環境変化が考えられる。この節では、解自体の精密さと要求変化への追従性との間に生ずる時間的トレードオフについて論ずる。

ここで、(a) 解が収束するまで待つて初めて割当てが決定される場合と、(b) 適当なタイミングで計算を打ち切って割当てを決める場合との2つを考える。なお以下では簡単化のため、収束に要する時間はつねに T であるとして議論を進める。

収束する前の価格をもとに割当てを決定した場合、いくつかの財について需要と供給が均衡していないことになり、したがって、それらに関する総需要（需要と供給との総和）は非零となる。(a) の場合でも、時刻 t_0 において求めた価格はその時点での要求ではなく、実際には計算を開始した時刻 $t_0 - T$ の要求しか反映していないため、やはり真の総需要は非零となる。

ここで、損失をこの総需要の大きさと時間との積と定義すると、価格が一度決定され次の価格が決定されるまで使用される期間 $[t_0, t_0 + T]$ における総損失 L_a は、総需要 $\Delta_{t_0, T}(t)$ の絶対値をこの期間で積分した値となり、次式で表される。

$$L_a = \int_{t_0}^{t_0+T} |\Delta_{t_0, T}(t)| dt \quad (4)$$

図4(a)にこの状況を示す。横軸は時間、縦軸は総需

要、曲線は $\Delta_{t_0, T}(t)$ をプロットしたものである。このとき、 L_a は陰部分の面積に等しくなる。 $\Delta_{t_0, T}(t_0) = 0$ であることから、もし $T = 0$ ならば $L_a = 0$ となることが分かる。

次に(b)の場合を考える。損失は同様にして定義できるが、均衡が求まる前に計算を止めているため、一般には $\Delta_{t_0, T}(t_0) \neq 0$ であることに注意する必要がある。計算を一律 $T' = T/N$ (N は自然数) と仮定すると、期間 $[t_0, t_0 + T]$ における総損失 L_b は図4(b)の陰部分となり、次式で表される。

$$L_b = \sum_{k=1}^n \int_{t_0+(k-1)T'}^{t_0+kT'} |\Delta_{t_0+(k-1)T', T'}(t)| dt \quad (5)$$

もし環境の変化が大きくなると、図中の曲線の傾きはそれだけ急になり、したがって総損失 L_a は大きくなる。(b)の場合も同様に L_b が大きくなるが、早い時点で環境とのずれが矯正されるため、 L_a ほど急激には大きくなると考えられる。このことから、環境変化が緩やかな場合にはできるだけ割当て計算に時間をかけてより精度の高い割当てをする方がよいが、逆に環境変化が急激な場合には早期に計算を打ち切って環境に追従していく方がよいことになる。

4. 実装および実験

4.1 FreeWalk 実装系

2章において説明したQoS制御機構をFreeWalk上を実装し、次の目的で実験を行った。

- 空間的トレードオフを決定する、計算と通信との速度比を実際の環境で測定する。
- FreeWalkという状況変化の速い環境において、時間的トレードオフが生ずる点を調べる。

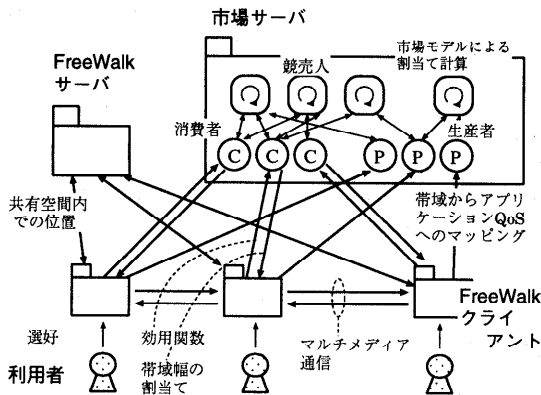


図5 市場モデルによるFreeWalkのQoS制御システム
Fig. 5 Market-based QoS control system for FreeWalk.

図5にFreeWalk実装系の概略を示す。各利用者が操作するFreeWalkクライアントと、仮想空間内の位置関係を管理するFreeWalkサーバ、および市場モデルによるQoS制御を行う市場サーバとからなる。FreeWalkクライアントは利用者からの操作により選好を受け取り、移動情報をFreeWalkサーバに、選好および帯域からサービス品質への変換パラメータを市場サーバ内の対応する消費者、生産者へと送る。すべての消費者、生産者、競売人は市場サーバ上に置かれており、割当て計算は市場サーバ上で集中的に行われ、その結果は消費者から対応するクライアントに送られる。FreeWalkクライアントはFreeWalkサーバから受け取った全体の位置関係をもとに画面を構成し、割り当てられた帯域幅を使ってクライアント間で直接マルチメディア通信を行う。

以下の実験では、FreeWalkクライアントは100Mbpsイーサネットに接続された3台のSGI O2上で実行され、市場サーバはSun Ultra2の上で実行されている。またFreeWalkサーバは上記のO2のうちの1台で実行されている。FreeWalkサーバの負荷は小さいため、FreeWalkのクライアントとサーバを同じワークステーション上で動かしていることによる影響は無視できる。各サーバと各クライアントとの通信はTCP/IPにより、またクライアント間のマルチメディア通信はUDP/IPによって行われている。

4.2 実験の設定

本稿で扱う実験の設定は以下のようなものである。仮想空間内に3つのクライアントA, B, Cを置き、そのうちの1つCを固定する。A, BはつねにCの視界の中にあり、Cに相対する向きを保ったまま、Cの視線方向に前後へ交互に動く。

移動の手順は図に付した番号の順に以下のとおりで

表2 FreeWalkの移動

Table 2 Movement of FreeWalk clients.

周期	10秒
Cの位置	(0,0)
Aの移動範囲	(-1,2)~(-1,8)
Bの移動範囲	(1,2)~(1,8)

表3 FreeWalk実装系における計算および通信の時間

Table 3 Cost for calculation and communication in FreeWalk implementation.

価格決定時間	52マイクロ秒
メッセージあたり通信時間	10.2ミリ秒

ある。(1)両者ともCから最も遠い位置に置く。(2)Bを固定したままAのみをCに接近させる。(3)Aが最も近い位置まで来たら、Aを固定してBのみをCに接近させる。(4)Bが最も近い位置まで来たら、Bを固定してAをCから遠ざける。(5)Aが最も遠い位置まで来たら、Aを固定してBをCから遠ざける。(6)BがCから最も遠い位置まで来たら、Cを止めて(2)以降を繰り返す。

今回の実験での各クライアントの移動範囲および速度は表2に示すとおりである。仮想空間内位置は空間内のx-y座標で表し、単位は仮想空間内での各クライアントの動画像面の横幅を1としている。

4.3 実験結果

空間的トレードオフ

3章で示した3種の実装のどれが適したものであるか調べるため、これを決定する価格計算時間(Tc)とメッセージ通信に要する時間とを測定した。

表3に結果を示す。それぞれの値は実装に大きく依存するものの、値のオーダは明確に異なる。クライアントとサーバとの間で1回のやりとりを行うのに100ミリ秒以上を要するため、生産者や消費者を分散した実装では環境に追従するのに十分な速度を達成できなかった。

このため、FreeWalk実装系においてはすべての市場計算を1つのプロセス内で行う方式をとった。これは本来は移動エージェントを用いるべき実装であるが、今回の実験システムとしては単に各種関数のパラメータのみを送信する実装とした。

時間的トレードオフ

時間的トレードオフは需要と供給とのずれと、計算の打切り時刻との関係を測ることにより見ることができる。具体的には以下のようにして行う。

各時刻において、帯域に対する需要の計算に用いられる各種パラメータの値と、その時刻に行われている帯域の割当てで使用された市場価格ベクトルとを記録

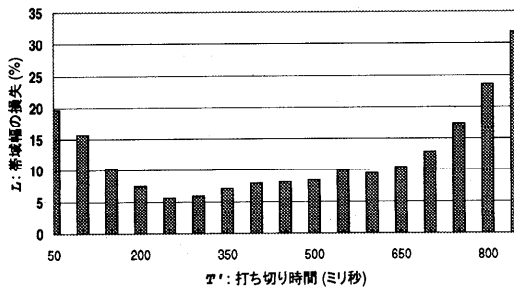


図6 時間的トレードオフ
Fig. 6 Temporal tradeoff.

する。記録終了後、それらのパラメータと価格ベクトルを用いて、各記録時刻における帯域に対する総需要と総供給との差の絶対値を計算する。もし価格がそのパラメータにおいて需給を均衡させるものとなっていればこの値は零となるはずであり、逆に非零であればその大きさは本来あるべき割当てとははずれて送受された（あるいはされなかった）データ量と考えることができる。

図6に本実験における時間的トレードオフの様子を示す。横軸は繰返し計算を打ち切る時間 T' 、縦軸は各 T' に対して、上述の値を時間方向で平均して、全帯域幅に対する百分率で示したものである。

この図では、 $T' = 250$ ミリ秒の周辺で損失が5.7%程度と最も小さくなっている。繰返し計算の時間が250ミリ秒より小さい間は割当てをより正確に行うことによる効果で損失が減るが、それ以降はむしろ環境の変化にともなって損失が増加することが明らかである。

またこの結果から、市場モデルによるQoS割当て機構が、FreeWalkのように環境変化が極度に速い環境においても十分効率的な割当てを行うことができることも分かる。

5. 考察

本稿で述べた2つのトレードオフは、システムの規模や通信に対する要求の変化速度の違いといったものによって現れ方が異なってくる。今回の実験では、FreeWalkという、通信に対する要求の変化がきわめて速い環境において、利用者数3という小規模なシステムを用いたが、実際の環境ではこれよりも変化が緩く逆に規模は大きいといった状況が考えられる。

たとえば、企業のイントラネットにおいて、複数のネットワークセグメントが結ばれ、RSVP¹³⁾などを基本にしたトラフィック制御機構によってネットワーク資源の割当てが可能なる状況を考える。RSVPはイン

ターネット環境における通信のための資源予約のための制御機構であり、今後特にイントラネットでのマルチメディア通信に応用されていくと予想される。

RSVPの想定する環境では、資源の割当てはセッションの単位で行われるために、本稿で扱ったような要求が刻一刻変化していくような環境と比較すると、要求の変化速度ははるかに遅いと考えられる。このため、時間的トレードオフにおいては反応性よりは、むしろアプリケーションの許すかぎり時間をかけて割当てを決定する方が好ましい。

空間的トレードオフの観点からは、要求される計算時間に余裕があること、通信を行うユーザの数 n が多いこと、およびその要求がネットワーク的にも分散することから、本稿での実験では否定的な結論の出た分散実装を考慮する余地がある。

いずれのトレードオフについても、RSVP環境はFreeWalkとは対照的な特徴を持っており、今後この環境についても実装系による評価を進めていく予定である。

6. おわりに

本稿では、利用者の選好に基づいてネットワーク資源の割当てを行うための市場モデルによるアプリケーションのQoS制御について、その実装時における問題点について議論した。一般均衡に基づく市場指向のアルゴリズムでは、計算機構を分散して実装することが可能であるが、すべてを分散して実行することは必ずしも有益ではなく、通信時間と計算時間との間に空間的トレードオフが存在する。また、収束計算を打ち切る時間については、割当てと動的に変化する環境とのずれによる損失の面で時間的トレードオフが存在することも示した。

さらに、FreeWalkへこの機構を実装することによって空間的、時間的トレードオフに関する実験を行い、次のような結論を得た。

- (1) 空間的トレードオフについて、FreeWalkのようにクライアント数が少なく、かつ通信コストが計算コストに比べて著しく大きい場合には計算要素を集中させるほどより有利となる。
- (2) 時間的トレードオフについて、環境変化が速い場合には時間をかけて精密な解を求めるよりも、適当な時間で計算を打ち切り、環境変化に追従していく方が、結果としてより有効な資源の利用につながる。

本稿では、市場モデルに基づく資源割当て機構の実装にあたっては、集中型と分散型のいずれで実装を行

うか、またどの時点で計算を打ち切って次の割当てに計算に入っていくかについての決定が、モデル自体の理論的な解析と同じ程度に重要であることを示した。また、この FreeWalk 実装系では市場モデルに基づく資源割当て機構が、要求変化が極端に速い環境においても十分に対応していけることを示すことができた。

今後の課題としては、今回扱った FreeWalk 環境とは異なる性質を持つ、RSVP に基づくイントラネットのような、より大きなネットワーク環境において同様の実験および解析を行っていくことがあげられる。

参 考 文 献

- 1) Bogan, N.R.: Economic Allocation of Computation Time with Computation Markets, *MIT Laboratory for Computer Science Technical Report 633* (1994).
- 2) Clearwater, S.H. (Ed.): *Market-Based Control: A Paradigm for Distributed Resource Allocation*, World Scientific (1996).
- 3) Kurose, J.F. and Simha, R.: A Microeconomic Approach to Optimal Resource Allocation in Distributed Computer Systems, *IEEE Trans. Comput.*, Vol.38, No.5, pp.705-717 (1989).
- 4) Kuwabara, K., Ishida, T., Nishibe, Y. and Suda, T.: An Equilibratory Market-Based Approach for Distributed Resource Allocation and Its Application to Communication Network Control, in 2).
- 5) Miller, M.S., Krieger, D., Hardy, N., Hibbert, C. and Tribble, E.D.: An Automated Auction in ATM Network Bandwidth, in 2).
- 6) 中西英之, 吉田 力, 西村俊和, 石田 亨: FreeWalk : 3次元仮想空間を用いた非形式的なコミュニケーションの支援, 情報処理学会論文誌, Vol.39, No.5, pp.1356-1364 (1998).
- 7) Sandholm, T. and Ygge, F.: On the Gains and Losses of Speculation in Equilibrium Markets, *Proc. 15th IJCAI 1997*, pp.632-638 (1997).
- 8) Shoven, J.B. and Whalley, J.: *Applying General Equilibrium*, Cambridge University Press (1992).
- 9) Waldspurger, C.A., et al.: Spawn: A Distributed Computational Economy, *IEEE Trans. Softw. Eng.*, Vol.18, pp.103-117 (1992).
- 10) Wellman, M.P.: A Market-Oriented Programming Environment and Its Application to Distributed Multicommodity Flow Problems, *Journal of Artificial Intelligence Research*, Vol.1, pp.1-22 (1993).
- 11) Yamaki, H., Wellman, M.P. and Ishida, T.: A Market-Based Approach for Allocating QoS to Multimedia Applications, *Proc. 2nd ICMAS*

1996, pp.385-392 (1996).

- 12) 八横博史, ウェルマン, M.P., 石田 亨: 市場モデルに基づくアプリケーション QoS の制御, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J81-D-I, No.5, pp.540-547 (1998).
- 13) Braden, R., Zhang, L., Berson, B., Herzog, S. and Jamin, S.: Resource Reservation Protocol (RSVP) - Version 1 Functional Specification, *Internet Request for Comments, RFC2205* (1997).

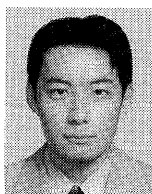
(平成 10 年 5 月 8 日受付)

(平成 10 年 11 月 9 日採録)



八横 博史 (学生会員)

1995 年京都大学工学部情報工学科卒業。1996 年同大学院修士課程修了。同大学院博士後期課程在学中。日本学術振興会特別研究員。マルチエージェント, 市場モデル等社会情報システムに関する研究に従事。電子情報通信学会, 人工知能学会, ACM, IEEE 各会員。



山内 裕

1998 年京都大学工学部情報工学科卒業。1998 年 4 月から, 同大学院情報学研究科社会情報学専攻修士課程在学中。組織論, 特に組織コミュニケーション, 組織知識創造に興味を持つ。



石田 亨 (正会員)

1976 年京都大学工学部情報工学科卒業。1978 年同大学院修士課程修了。同年日本電信電話公社電気通信研究所入所。米国コロンビア大学計算機科学科客員研究員, ミュンヘン工科大学客員教授等。現在, 京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻教授。工学博士。人工知能, コミュニケーション, 社会情報システムに興味を持つ。IEEE PAMI, Autonomous Agents and Multiagent Systems 等数誌の編集に従事。編著書に, 「分散人工知能」(コロナ社), 「Real-time Search for Learning Autonomous Agents」(Kluwer Academic Publishers), 「Community Computing: Collaboration over Global Information Networks」(John Wiley and Sons) 等。