

市場メカニズムを用いた動的QOS制御

5L-3

青木武司 富川真弓 岩瀬詔子

(株)富士通研究所

1. はじめに

コンピュータのネットワーク環境の発達により、アプリケーションの多様化とユーザ層の拡大が進んでいる。分散コンピュータシステムのネットワーク資源はさまざまなQOS (quality of service)の要求を持つユーザアプリケーションによって共有される。ユーザのQOS要求を満足させるためには、共有資源をユーザ間で効率よく配分制御しなければならない。

本論文では、ネットワーク資源の配分問題に市場原理を導入したマーケットオリエンティッドシステムを提案する。このシステムによりユーザとネットワークの間でQOSの要求が動的に調整され、ユーザのQOS要求を反映したネットワーク資源の配分を柔軟に行うことができることを述べる。

2. QOS制御の必要性

アプリケーションの種類が増えるに従ってユーザのQOS要求は多様化している。インタラクティブなマルチメディアサービスでは、動画像の転送のときは、非常に大きなバンド幅を要求するが、パケットが部分的に廃棄されてもサービス品質には大きな影響がない。しかしコマンドや制御信号ではパケット廃棄のない転送が要求され、インタラクティブなコマンド操作では速いレスポンスタイムが要求される。一方FTPのようなオフラインでデータを転送するサービスでは、ユーザにとってパケットの遅延は問題ではなくトータルのスループットにだけ関心がある。さらに同じアプリケーションでもユーザによってサービス品質の要求は異なる。また同じユーザでも時間や通信相手によって品質の要求が異なるかもしれない。このような多様なQOS要求に応じたネットワーク資源の配分とトラフィックの制御が望まれている。

3. マーケットオリエンティッドシステム

ネットワークの性能はスループットやパケット遅延、パケット廃棄率のような技術的な観点からだけでなく、サービスを利用するユーザの満足度の観点

からも評価しなければならない。パーストラフィックや可変レートのトラフィックを統計多重することによってバンド幅を効率的に利用することは技術的な観点から見たネットワーク性能の効率化である。一方ネットワーク資源をサービスを利用するユーザのQOS要求に見合うように配分することはユーザの観点から見たネットワーク性能の効率化である。

ユーザとネットワークの間に資源調整の交渉の場を提供するマーケットオリエンティッドシステムを考える[1]。ネットワーク資源とサービスを市場に供給するシステムをプロバイダと呼ぶ。プロバイダはQOSの保証に責任を持ち、技術的な観点からのネットワーク性能の効率化を目標とする。市場に供給されたネットワーク資源を消費するユーザアプリケーションをコンシューマと呼ぶ。コンシューマはQOSの調整と交渉に責任を持ち、ユーザのQOSの観点からのネットワーク性能の効率化を目標とする。(以下ではコンシューマとユーザを同一視する。)

プロバイダにとっては、多様なQOS要求を持つユーザにできるだけ幅広くネットワークを利用してもらうことがネットワークの利用効率をあげることにつながる。多様なQOS要求に応えるためには、ネットワークのサービスを遅延時間やパケット廃棄率などのQOS要求の種類とレベルの違いに基づいてサービスクラスを差別化し、ユーザに自分のQOS要求に合ったサービスクラスを選択させることが考えられる。QOS要求の低いユーザにQOSレベルの高いサービスクラスを譲歩させるためには、異なるサービスクラスに差別価格をつけ、経済的なインセンティブのメカニズムを導入することが有効である[2]。プロバイダはマルチサービスクラスを差別価格をつけて提供し、ユーザに予算制約内で適当なサービスクラスを選択させる。プロバイダは輻輳状態によって各サービスクラスへのバンド幅の割当やバッファ長を動的に調整して、ユーザのQOSを保証する。

ネットワークが輻輳した場合、プロバイダの努力ではユーザのQOS要求を保証できなくなることがある。輻輳に応じて上昇するような動的な価格付けがそれぞれのサービスクラスになされるなら、ユーザに価格に応じてバンド幅の要求量を変化させるか(ユーザのバンド幅要求の価格弾力性と呼ぶ)、輻

替していない他のサービスクラスを選択させることができる。

あるサービスクラスを利用するユーザのバンド幅要求の価格弾力性は次のように扱うことができる。ネットワークを利用するユーザ $i(i=1, \dots, n)$ が要求するネットワークのバンド幅を x_i とする。ユーザはバンド幅と遅延やパケット廃棄に関してQOS要求を持つとする。ネットワークのバンド幅の消費量の総和を $X \equiv \sum_i x_i$ とし、そのときネットワークに生じる遅延やパケット廃棄のような社会的コストをネットワークの輻輳 X についての関数 $c(X)$ で表す。ユーザ i の満足度を、資源の消費による効用 $u_i(x_i)$ から社会的コストを引いた $u_i(x_i) - c(X)$ で評価する。すべてのユーザの満足度を最大化することがユーザの観点からのネットワーク性能の効率化の目標であり、次の集権的最適化問題で表される。

$$\max_{\{x_i, i=1, \dots, n\}} \sum_{i=1}^n (u_i(x_i) - c(X)) \quad (1)$$

この問題の最適解の一階の条件は、すべてのユーザ i について次式を満たすことである。

$$du_i(x_i)/dx_i = n dc(X)/dX \quad (2)$$

市場原理を導入するために、価格パラメータ p を導入して問題(1)を分権化する。個々のユーザ i は価格 p のもとで次の個別の最適化問題を独立に解く。

$$\max_{x_i} [u_i(x_i) - px_i], \quad i=1, \dots, n \quad (3)$$

この問題の最適解の一階の条件は、すべてのユーザ i について次式を満たすことである。

$$du_i(x_i)/dx_i = p \quad (4)$$

(4)式を x_i について解くと、ユーザ i の価格 p での需要量を表す需要関数 $x_i = D_i(p)$ を得る。集権的最適化問題の最適条件(2)式と分権的最適化問題の最適条件(4)式を一致させることにより、次のネットワークの輻輳に応じた動的な価格付けの関数を得る。

$$p = n dc(X)/dX \quad (5)$$

(5)式を X について解くと、プロバイダの価格 p での供給量を表す供給関数 $X = S(p)$ を得る。

価格 p での全ユーザの需要量の総和 $\sum_i D_i(p)$ と供給量 $S(p)$ は一般に一致しないから需給のバランスがとれるまで価格パラメータ p を動的に変化させる。均衡価格に収束する過程で、需要の価格弾力性が異なるユーザ間で資源の配分の調整がなされ、ユーザの満足度の観点から見た効率的なネットワークのバンド幅の配分がなされる。

4. ユーザとネットワークの相互作用

マーケットオリエンティッドシステムの利点は、

QOSの交渉がユーザオリエンティッドであること、個々のユーザが独立に市場とQOSを交渉するので、完全に分権化されており、集中管理を必要としないこと、さらに動的な調整方法であるためアプリケーションのQOSの変化やユーザ数の変化などの状況の変化に適応できることである。またユーザとネットワークの間に興味深い相互作用があることが資源の配分調整を柔軟なものにしている。プロバイダはQOSの保証を行うために、各サービスクラスへのバンド幅の割当を変更したりバッファ長を変更したりする。一方ユーザは輻輳によって価格が上昇したとき、低いQOSレベルのサービスクラスを選択するか、需要に価格弾力性があるときはバンド幅の消費量を調整する。プロバイダとユーザの調整の相互作用によってネットワークの利用状態は様々な状態に収束する。プロバイダがネットワークの輻輳によってすべてのユーザのQOS要求を満たすようなサービスを提供できないとき、ユーザにQOSの価格弾力性やサービスクラスの選択性があれば動的な価格調整によってユーザのQOSが調整され、輻輳が回避され、ユーザの満足できるネットワークの利用状態を実現できる。このような資源配分と輻輳制御の柔軟性は、マーケットオリエンティッドシステムがネットワーク性能をプロバイダとユーザの双方の観点からとらえて効率化していることに起因する。

5. 今後の課題

バンド幅の交渉メカニズムはネットワークサイズによって違いがあるだろう。LANのようにプライベートなネットワーク資源が比較的少数のユーザによって共有されている環境では、輻輳制御を緩やかにしてユーザの資源利用にかなり高い自由度を認めてもよい。ゲーム理論的なアプローチによって競合の解消を図ることも一考に値する。一方WANのように不特定多数のユーザによって限りある資源が共有されている環境では、輻輳制御を厳しくしてユーザの資源利用にかなり厳しい制限をかけるべきであろう。またWANでは交渉のオーバーヘッドが問題になるためユーザ間の複雑な交渉メカニズムを導入することは難しい。本論文で述べたユーザが独立に市場と交渉する分権的なメカニズムが有効であろう。

参考文献

- [1]青木 et al., エコノミックコンピューティング, 情報処理学会コンピュータシンポジウム, 1994.
- [2]H. R. Varian, Pricing information goods, Technical report, University of Michigan, 1995