

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
研究期間：2006～2008
課題番号：18560377
研究課題名 (和文) 超高速マルチサービス網におけるネットワーク制御法に関する研究
研究課題名 (英文) Studies on Network Control Methods in High-Speed Multiservice Networks
研究代表者 滝根 哲哉 (TAKINE TETSUYA) 大阪大学・大学院工学研究科・教授 研究者番号：00216821

研究成果の概要：通信トラヒック工学に基づいた、ネットワーク制御法を開発した。具体的には、ネットワークの性能を評価する際に必須となる多元トラヒックを収容する待ち行列モデルの解法の開発、ネットワークの性能に多大な影響を与える巨大フローの同定手法、ならびに、フロー単位でのネットワーク制御法の開発を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,100,000	0	1,100,000
2007 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	690,000	4,090,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 通信・ネットワーク工学

キーワード：網制御、遅延、通信トラヒック工学

1. 研究開始当初の背景

過去十数年に渡り、申請者は一貫して通信トラヒック理論に基づく通信網の性能評価手法並びに多元トラヒック制御手法に関する研究開発を行ってきており、多くの成果を得ている。これらの研究成果の中でも、特に、多元マルコフ型到着流を収容する先着順待ち行列モデルの解析手法を確立した。この成果は非常に大きな注目を集めており、既に海外において3回の招待講演を行っている。本研究では、この研究成果を発展させ、ネットワークに収容される様々なトラヒックの遅延特性をも制御可能な、マルチサービス網における包括的なネットワーク制御法の確立を目指す。これには様々な性能指標を考察する必要があるが、本研究では特に遅延性能に

重点を置いて研究を進める。

遅延特性を制御するためには優先制御が欠かせない。申請者は、優先権付き待ち行列モデルに関する研究も継続して進めてきており、最も粒度の細かなパケット単位でトラヒックを扱う場合に利用可能な結果を既に得ている。しかし、この結果は、性能指標が陽には与えられず、一連の数値計算を要する。一方、フローの集約や経路選択の際にはもう少し粒度の荒い、比較的少数のパラメタでトラヒックを記述可能なモデルが必要となる。

2. 研究の目的

光伝送技術の急激な発達や VoIP 技術、CDN の商用化、さらには NGN の標準化に

見られるように、近い将来、超高速マルチサービス網が実用に供されることは必至である。マルチサービス網に收容されるトラヒックはそれぞれ異なる通信サービス品質 (QoS) を要求するだけでなく、そのトラヒック特性も大きく異なる。それゆえマルチサービス網を制御するためには、個々のメディアのトラヒック特性を十分考慮する必要がある。特に、実時間制約をもつメディアに対しては、パケットレベルにおける QoS に加えて、フローレベルにおける QoS も考慮しなければならない。加えて、異なる性質をもつトラヒックが多重化された場合、個々のトラヒック流が受ける QoS は一般に異なるため、個々のトラヒック流の特性が性能指標に対してどのような影響を与えるかということを理解する必要がある。

研究代表者は、既に、多元トラヒックを收容する離散型待ち行列モデルならびに流体待ち行列モデルに関する研究を開始している。離散型待ち行列モデルの特筆すべき点は、連続な通常の待ち行列モデルとは異なり、到着に相関がある場合でも、性能指標の陽な表現式を得られる可能性があることである。背景で述べたように、研究代表者は既に先着順サービス規律の場合に対して、平均遅延に関する陽表現の導出に成功している。この研究成果を元に、本研究課題では優先権付き待ち行列モデルの構築と平均遅延に関する陽表現の導出を目指す。

一方、研究代表者は、最近まで、流体待ち行列モデルに対する研究を行っていなかった。しかし、上記で述べたように、少数のパラメタでシステムを記述できるトラヒックモデルの必要性に迫られたため、流体待ち行列モデルの専門家であるベルギー国ブリュッセル自由大学の Guy Latouche 教授との共同研究を行い、最新の解析技法を取得した。本研究課題では、この成果を基礎として、ネットワーク制御に適した流体待ちモデルの構築とその解析手法の確立を目指す。

また、これと並行して、超高速通信網における、ネットワークの性能に大きな影響を与える高レートフローの検出手法ならびにアクセス網における通信サービス品質の確保を目指したトラヒック制御手法を考案する。

3. 研究の方法

(1) 多元トラヒックを收容する待ち行列モデルの解法

離散時間モデルにおける入力トラヒックモデルでは、各トラヒック流を単位時間当たり (例えば 1ms) に到着するバイト数を回線

速度で正規化した量の列で特徴づける。このため、単位時間内の短い時間スケールにおける挙動を無視しており、粒度の荒いモデルとなる。しかし、各到着流における伝送要求単位の到着に相関のある場合においても、離散時間待ち行列モデルでは性能指標の陽表現が得られる可能性がある。これはパケット単位でモデル化を行う連続時間モデルでは期待出来ない大きな利点である。本研究では、優先権付き離散時間待ち行列モデルにおける遅延特性の陽表現の導出に向けて以下の研究を行う。

各クラスのトラヒックフローがマルコフ型離散時間過程に従う場合の優先権付き離散時間待ち行列モデルの解法を開発する。マルコフ型離散時間過程はあらゆる到着過程を任意の精度で近似的に表現できることが知られており、極めて汎用性の高い。この過程を入力とする優先権待ち行列モデルに関する研究は、研究代表者の手による連続時間モデルの論文が発表されたのち、他の研究者によって部分的に試みられているが、十分に一般性をもつモデルの解析手法の開発は依然として未解決問題として残されている。連続時間モデルとの大きな相違は、単位時間内に複数のパケットが到着する可能性がある事であり、この事実がモデルの取り扱いを困難にしている。本研究課題では、申請者が過去に確立した集団到着を許す連続時間モデルに対する解法を離散時間モデルへ拡張することで、この問題の解決を図る。また、これと並行して、より粒度の粗い多元流体待ち行列モデルの解析手法を確立する。

(2) パケットサンプリング情報に基づく巨大フローの同定手法

ネットワークの運営、管理等を行う上で、リンクを流れるトラヒックの情報は不可欠であり、現在多くのルータがトラヒックの測定、監視の機能を備え付けている。従来、トラヒックの情報といえば、測定リンクを流れる全トラヒック量などのマクロな情報が主であった。しかし、ベストエフォート型のネットワークにおいて、使用量に応じた課金や通信サービス品質の管理などを行う際には、個々のフローに関する情報が必要となる。しかし、近年の回線の高速化により、全てのパケットを解析して各フローの統計量を収集することは、処理能力、メモリ、ネットワーク帯域の面で限界があり、スケーラビリティに欠ける。そこで、これらの問題を解決する手法として、パケットサンプリングを採用した手法の開発を行う。

すなわち、各パケットに対してフローの情

報を用いず、独立に一定の確率でサンプリングを行うランダムパケットサンプリングを用いる。これにより処理サイクルを大幅に抑えることができ、バックボーンリンクなどの高速リンクにおいても実装が可能となる。しかし、パケットサンプリングはその性質上情報の欠如をもたらし、特にサンプル率が小さい場合、標本抽出の対象である母集団の統計指標を推定することが困難になる。例えば、一つのパケットもサンプルされないフローに対して、母集団における統計指標を推定することは非常に困難である。よって、サンプリングによって得られた情報を元に母集団の統計指標を如何に推定するかということが問題となる。これに対しては切断パレート分布を用いた最尤推定を行うことで克服する。また、サンプリングされたパケットから構成されるフロー長分布と元のフロー長分布の間に成立するスケールリング則を援用した事前分布の設定手法についても検討を加える。

(3) フロー単位でのネットワーク制御法

流体待ち行列ならびに離散マルコフモデルを応用して、フロー単位でのネットワーク制御法の開発を行う。具体的には伝送を開始するフローを、流体待ち行列モデルを用いて予測される遅延特性に基づき、複数の経路から最も優れた経路を発見する手法を見いだす。また、無線LANにおける上下フローの不公平性の解消を目指し、上下フロー間で自在にスループットの割り当てが可能な制御手法を離散マルコフモデルを用いて開発する。

4. 研究成果

本研究では、研究代表者の過去の研究成果を基礎として、様々なトラヒック特性をもつフローを収容する超高速マルチサービス網の基本的性質と、それを踏まえた包括的なネットワーク制御法の確立を目的とした研究を行った。本研究によって得られた成果は次のようにまとめられる。

(1) 多元トラヒックを収容する待ち行列モデルの解法

あらゆる定常過程を任意の精度で近似的に表現できる多元マルコフ型到着流を入力とする待ち行列モデルの解析手法に関する研究を推進した。まず、離散時間多元マルコフ型到着流を収容する優先権付き待ち行列モデルの解法を確立した。従来の研究では、優先権クラスの数に制限があったり、入力トラヒックモデルに制約があるなど、一般的な形で解法を与えたものは存在しない。問題の

複雑さは集団到着が起こることに起因するが、研究代表者の過去の成果を発展させることにより、この問題を解決した。さらに、マルコフ型到着流にある構造を導入することにより、上位クラスのトラヒックの稼働サイクルが再生的になるような工夫を導入することにより、優先権付き待ち行列モデルにおける平均遅延の陽表現を導出した。これにより、各トラヒック流のもつ性質が遅延性能にどのような影響を与えるかが明示的に示された。一般に、バースト的な到着に対しては、バーストの継続時間、その期間における入力トラヒック量、ならびにそれらの相関が平均遅延に大きな影響を与えることを示した。一方、よりマクロな視点からのモデルである多元マルコフ型流体到着過程を収容する待ち行列モデルにおける、各トラヒッククラスの系内仕事量分布の解析法を確立した。通常の単一サーバ待ち行列モデルでは、系内に滞留する仕事量が、経過サービス内に到着するという性質がある。流体待ち行列においても同様の性質が成立することを見だし、それを用いて、系内に滞留している各クラスの仕事量の結合分布を導いた。さらにパケット長が一定であるという仮定の下で、マルコフ型到着流を収容する待ち行列モデルにおける系内客数分布の過渡特性の計算手法を確立した。一般に計算精度と計算量はトレードオフの関係にあるため、必要に応じて計算精度を制御できることが好ましい。この計算手法では、予め与えられる許容計算誤差に対して、適切なパラメタ選択を行う手順を与え、得られる各確率関数ならびに確率関数の総和が含む誤差が許容誤差以内に収まるという特徴をもつ。

(2) パケットサンプリング情報に基づく巨大フローの同定手法

現在のネットワークでは、ごく少数のフローが帯域の半分以上を占めているという報告が多数ある。これらの巨大フローはネットワークの性能に大きな影響を与える。そこで、これらの巨大フローに着目し、超高速通信網でも適用可能なパケットサンプリングによって得られる情報を基に最尤推定を行い、巨大フローを同定する手法の開発した。最尤推定を行うためには事前分布が必要となるが、この研究では切断パレート分布を採用している。フロー長を切断パレート分布でモデル化するには、パレート分布の形状パラメタ以外に切断点と表すパラメタを同定する必要があるが、後者についてもサンプルされたパケットの情報から最尤推定を行っている。また、誤検出確率と検出見逃し確率はトレードオフの関係にあるが、本研究では、検出見逃し確率を予め定められた基準以内に納め

るという条件下で，誤検出確率を最小にするようなパラメタ設定法を与えている．複数の実トレースデータを用いた数値実験を通じて，提案手法を用いれば非常に良い精度で巨大フローを同定できることを示した．なお，この成果に対しては，平成 20 年度（社）電子情報通信学会論文賞の受賞が内定している．

(3) フロー単位でのネットワーク制御法

異なる性質をもつフローを複数の経路のいずれかに割り当てるトラヒック制御に関する研究を行い，流体待ち行列モデルを用いることにより，フロー種別が二つの場合に対して，各フローが被る遅延の最大値が最小となる最適なフロー割り当て手法を与えた．さらに，多数の数値実験を行い，各フローの平均レートのみを用いて，経路割り当てを行う場合と比較して，大幅な性能向上が得られることを示した．また，無線 LAN において，上下フローのスループットを自在に制御する手法を離散マルコフモデルを基に考案し，この手法を応用することにより，上下フロー間の不公平性を解消できることを示した．上下フローの不公平性は IEEE802.11x がノード単位の公平性を達成するように設計されているのに対して，無線 LAN ではアクセスポイントが複数のフローを収容しているという事実起因する．アクセスポイントが他の端末の R 倍のパケットレートを達成するために必要な，アクセスポイントの最小バックオフウィンドを目標値 R の関数として与えることに成功した．これにより，アクセスポイントの最小バックオフウィンドを状況に応じて動的に制御することにより，上下フロー間のスループットの不公平性が解消できることを示した．

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 10 件)

T. Matsuda, T. Noguchi and T. Takine, ``Broadcasting with Randomized Network Coding in Dense Wireless Ad Hoc Networks," IEICE Transactions on Communications, vol.91-B, pp.3216-3225, 2008, 査読あり.

T. N. Trung, H. Kamada, K. Kinoshita, N. Yamai, T. Takine, and K. Murakami, ``An Efficient Agent Control Method for Time-constrained Applications," IEICE Transactions on Communications,

vol.91-B, pp.2972-2979, 2008, 査読あり.

B. A. Hirantha Sithira Abeysekera, T. Matsuda and T. Takine, ``Dynamic Contention Window Control Mechanism to Achieve Fairness between Uplink and Downlink Flows in IEEE 802.11 Wireless LANs," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol.7, pp.3517-3525, 2008, 査読あり.

T. Matsuda and T. Takine, ``(\$p,q\$)-Epidemic Routing for Sparsely Populated Mobile Ad Hoc Networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.26, pp.783-793, 2008, 査読あり.

Y. Kitatsuji, S. Katsuno, M. Tsuru, T. Takine and Y. Oie, ``Flow Assignment Method with Traffic Characteristics over Multiple Paths for Reducing Queuing Delay," Telecommunication Systems, vol.37, pp.97-108, 2008, 査読あり.

T. Mori, T. Takine, J. Pan, R. Kawahara, M. Uchida and S. Goto, ``Identifying Heavy-Hitter Flows From Sampled Flow Statistics," IEICE Transactions on Communications, vol.E90-B, pp.3061-3072, 2007, 査読あり.

H. Hirata, T. Matsuda, H. Nagamochi, and T. Takine, ``Contention-Free λ -Planes in Optically Burst-Switched WDM Networks," IEICE Transactions on Communications, vol.E90-B, pp.2524--2531, 2007, 査読あり.

K. Daikoku, H. Masuyama, T. Takine, and Y. Takahashi, ``Algorithmic Computation of the Transient Queue Length Distribution in the BMAP/D/c Queue," Journal of Operations Research Society of Japan, vol.50, pp.55-72, 2007, 査読あり.

H. Masuyama and T. Takine, ``Multiclass Markovian Fluid Queues," Queueing Systems, vol.56, pp.143--155, 2007, 査読あり.

K. Hirata, T. Matsuda and T. Takine, ``Dynamic Burst Discarding Scheme for

Deflection Routing in Optical Burst Switching Networks," Optical Switching and Networking, vol.4, pp.106-120, 2007, 査読あり.

[学会発表](計8件)

K. Hirata, T. Matsuda and T. Takine, ``Proactive Contention Avoidance Scheme with Dedicated Wavelength Assignment in Optically Burst-Switched WDM Networks," presented at the Fourth IEEE and IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN 2007), July 2007, 査読あり.

Y. Kitatsuji, S. Katsuno, M. Tsuru, T. Takine and Y. Oie, ``Traffic Characteristics-based Flow Assignment Method for Reducing Queuing Delay," presented at The 6th International Conference on Networking (ICN 2007), April 2007, 査読あり.

B. A. Hirantha Sithira Abeysekera, T. Matsuda and T. Takine, ``Dynamic Contention Window Control to Achieve Fairness between Uplink and Downlink Flows in IEEE 802.11 WLANs," presented at 2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2007), March 2007, 査読あり.

K. Hirata, T. Matsuda, H. Nagamochi and T. Takine, ``Contention-Free -Planes in Optically Burst-Switched WDM Networks," presented at IEEE GLOBECOM 2006, November 2006, 査読あり.

6. 研究組織

(1)研究代表者

滝根 哲哉 (TAKINE TETSUYA)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：00216821

(2)研究分担者

松田 崇弘 (MATSUDA TAKAHIRO)
大阪大学・大学院工学研究科・講師
研究者番号：50314381

(3)連携研究者