

Minority Game を利用した輻輳制御手法の評価

田頭 茂明 忽那 寛 藤田 聡

広島大学 大学院工学研究科

本論文では、Minority Game というゲーム理論を転送速度の調節に利用する新しい輻輳制御手法の提案をおこなう。Minority Game は、複雑系などの分野で注目されているゲームのひとつであり、利己的に振舞う参加者間で協調的行動が発現するという特性をもつ。したがって輻輳制御に Minority Game を利用することで、利己的に振舞う送信者間で協調的行動が発現し、効率的なパケット通信が実現されるのではないかと期待される。シミュレーションの結果、提案手法は、従来手法に比べて、公平で高効率な帯域の利用を可能にすることが明らかとなった

Evaluation of a Fair and Efficient Congestion Control Scheme based on Minority Game

SHIGEAKI TAGASHIRA HIROSHI KUTSUNA SATOSHI FUJITA

Graduate School of Engineering, Hiroshima University

In this paper, we propose a new congestion control scheme for high-speed packet communication networks. The basic idea of the scheme is to adopt a game theory called Minority Game (MG) to realize a *selective reduction* of transmission speed of the senders. MG is known to have a remarkable property such that the number of winners converges to a half of the number of players in spite of the selfish behavior of the players. By using such property of MG, we can realize a fair reduction of the transmission speed, which is more efficient than previous schemes in which all senders uniformly reduce their transmission speed. From the result of simulation, we could improve the efficiency of those schemes, especially when the bandwidth of the underlying network is very large.

1 はじめに

近年、インターネット環境における通信回線の整理や高速化が急速に進み、高速な通信回線の帯域をより効率的に利用する通信制御方式の実現が期待されている。しかし、現在 TCP で採用されている輻輳制御手法では、次のような理由でその実現が難しいとされている [1]。まず現在の輻輳制御手法では、ネットワークの混雑時にすべての送信者に対して転送速度を“半減”させることで資源配分の公平性を保とうとしている。具体的には、半減された転送速度は、次に混雑が発生するまでそれぞれの送信者で同じように増加され、半減によって生まれた余剰資源がすべての送信者の間で均等に配分されるような仕掛けが組み込まれている。しかしネットワークの通信帯域が大きいと、半減された転送速度が再び大きくなるまでに多大な時間がかかってしまう。そのため、混雑時にすべての送信者が転送速度を半減させてしまうと、帯域の効率的な利用が難しくなる。

本研究では、従来手法の上述の問題点を解決するため、Minority Game [2, 3] というゲーム理論を輻輳制御問題へ利用することを考えた。後に詳述するように Minority Game は、各プレイヤーが二つのグループのどちらかを選択し、少数に属したプレイヤーが勝利する、という一種の少数派ゲームである。ここで各プレイヤーは、他のプレイヤーがどのような選択をしたかを知ることができず、自分の勝利のためにのみ利己的に行動する。にもかかわらず、適切に設計された Minority Game では、プレイヤー間にあたかも示し合わせたかのような協調的行動が発現することが知られている [2]。Minority Game をネットワーク上の輻輳制御問題に利用することで、利己的に振舞っているはずの送信者間で協調的行動が発現し、効率的なパケット通信が実現できると期待される。本研究では、提案手法の効果をシミュレーションにより評価した。実験の結果、提案手法は公平で高効率な帯域の利用を可能にすることが明らかとなった

2 輻輳制御

2.1 TCP における輻輳制御手法

輻輳とは、ネットワークが持つ処理能力以上の量のパケットが送出されることでネットワークが混雑し、パケットが破棄される状態のことをいう。ネットワークの混雑状況を推測しながら転送速度の増加・減少を調節し、輻輳状態の回避と帯域の効率的な利用を実現する働きのことを一般に輻輳制御と呼び、TCP がもつ重要な働きの一つとされている。輻輳制御には、上述の二つの目的の他に、すべての送信者に対して公平なサービスを提供するというもう一つの側面ももつ。

TCP の輻輳を検知する方法として、重複 ACK による方法とタイムアウトによる方法が用意されている。これらの方法を用いて輻輳を検知した TCP は、輻輳を回避するために転送速度の調整を行うことになるが、この輻輳回避フェーズでの制御手法として、AIMD (Additive Increase/Multiplicative Decrease) という方式を採用している [4]。AIMD の動きは次の通りである。まず、タイムアウトにより輻輳を検知した送信者は、輻輳検知時の転送速度の $1/2$ を閾値に設定し、転送速度をいったん最小値にまで減少させる (スロースタート)。転送再開後、正しく ACK を受け取るたびに転送速度を“指数関数的”に増加させていく。転送速度が閾値に達したら、その後は加算 (線形) 的な増加に移る。一方、重複 ACK の受信により輻輳を検知した送信者は、タイムアウトによる制御とは異なる方法で輻輳を回避する。具体的には、加算的增加パラメータ α と乗算的減少パラメータ β ($0 < \beta < 1$) が与えられる。輻輳発生を検知した場合は、ネットワークがより混雑することを防ぐために、送信者は転送速度を $(1 - \beta)$ 倍と乗算的に減少させる。転送再開後、輻輳を検知していない場合は、送信者は転送速度を α ずつ加算的に増加させていく。一般に $\alpha = 1$, $\beta = 1/2$ のように設定され、各送信者は、輻輳発生を検知しない場合は転送速度を 1 ずつ増加させ、検知した場合は半減させることになる。また、転送速度の増加率が一律で、減少率を $1/2$ と大きくすることで、新たに送信者がネットワークに参加したときも、他の送信者との転送速度の差を短時間で埋めることが可能となる。その意味で、AIMD は高い公平性を実現しているといえる。

2.2 AIMD の問題点

現在の TCP の輻輳制御手法では、スロースタート後に閾値を超えてからは転送速度が加算的に増加されるので、ネットワークが急激に混雑することは少ない。そのため、送信者が輻輳回避フェーズで転送速度を調節する状況が多くなり、AIMD による制御が支配的であると考えられる。しかし、近年の高速化された通信回線では、各送信者の転送速度が非常に大きいため、AIMD で半減させた

転送速度が増加するのに時間がかかり、帯域を効率的に利用することが難しくなるという問題点が発生する。

AIMD において帯域利用のさらなる効率化を考えると、転送速度の減少率を $1/2$ ではなく、より小さい割合にすることで効率性を向上させることも可能であるが、減少率を小さくすると、新たにネットワークに参加する送信者に不利益が生じるという新たな問題点が発生する。

3 Minority Game

3.1 概要

Minority Game (MG) は、経済学の研究者である W.B.Arthur が考案した El Farol's bar 問題 [5] の影響を受け、D.Challet と Y.-C.Zhang が 1997 年に発表したシミュレーションモデルである。MG の概要は以下の通りである。まず、奇数人のプレイヤーから構成される集団を考える。ゲームにおける各プレイヤーの目的は、次のようにラウンドを繰り返し実行し、できるだけ多くの利益を得ることである。1) 各ラウンドで各プレイヤーは、あらかじめ与えられた二つのグループのうちの一つを選択する。2) より少ないプレイヤーによって選択されたグループを選択したプレイヤーたちがそのラウンドの勝者となり、勝者には一定の利益が与えられる。

3.2 ルール

各プレイヤーによるグループの選択は、勝ちグループの履歴と、ゲーム開始前にプレイヤーごとに用意された戦略テーブル (ST) にしたがっておこなわれる。ST は、各プレイヤーが勝ちパターン履歴を用いて次のラウンドで選択するグループを決定するのに使用される。履歴を参照する長さが 3 のときの ST の具体例を図 1 に示す。一つの ST には、設定した長さのすべての履歴と、その履歴が勝ちグループの履歴として観測されたときに「次の手」として選択すべきグループとが記載される。各ラウンドの終了後に最近の勝ちグループの履歴を参照し、ST からその履歴と一致するエントリを探しだして、そのエントリに書かれた「次の手」を次のラウンドで選択する、という処理を繰り返し実行する。

各プレイヤーはゲーム開始前に、ランダムに選択された s 個の ST を用意する。各ラウンドで用いられる ST はそれら s 個の中から後述の戦略にしたがって選択され、上述のような方法で「次の手」の選択がおこなわれる。各ラウンドで使用される ST の選択方法は、以下の通りである。まずプレイヤーが保持する各 ST に対して、ゲームによるプレイヤーの利益とは別に、ST 自身の得点を保持しておくことにする。この得点は、ゲーム開始時は 0 に設定され、1 回のラウンドに勝てば使用した ST に 1 点を加点し、負ければ 1 点減点される。プレイヤーは各ラウンドで、もっとも得点が高い ST を使用してグループの選択をおこなう。

		m				次の手
		0	0	0	0	↓
2	{	0	0	1	1	
		0	1	0	1	
		0	1	1	0	
		1	0	0	0	
		1	0	1	1	
		1	1	0	0	
		1	1	1	0	

図 1: ST($m = 3$) の例.

3.3 ゲームの特徴

MG では各プレイヤーは、均質で簡単なルールにしたがい、他のプレイヤーの動向を知ることができず、しかも自己の利益のみ追求して行動する。それにもかかわらず、ゲームの結果には、プレイヤー間で調整がおこなわれたかのような協調性が見られることが知られている [2]。

一つ目の特徴は、各ラウンドでの少数グループと多数グループの人数の差が、ラウンドを重ねるごとに小さくなることである。この特徴は、ST の選択に用いた前述のルールによってもたらされている。

二つ目の特徴は、プレイヤーが保持する ST の個数 s と勝ちグループの履歴を参照する長さ m が各プレイヤーの勝利数と協調性に大きく影響を与えることである。 s の値が大きい場合は、勝利数が大きいプレイヤーは少なく、ほとんどのプレイヤーの勝利数は小さい値で均衡する。 s の値が大きいときに全体的な結果が悪くなることが知られており、勝利する確率が高い ST をしばらくにくくなるためだと考えられている [2]。 m の値が大きくなると、グループをランダムに選択した場合の結果に近づいていく。 m の値が大きいとランダムな場合の結果に近づいてしまう理由は、同じ種類の履歴を参照する回数が小さくなるためだと考えられている [2]。

4 提案手法

本研究では、前章で説明した MG を利用した新しい輻輳制御手法を提案する。前述のように MG に参加している各プレイヤーは、均質で簡単なルールにしたがい、他のプレイヤーの動向を知ることができず、しかも自己の利益のみ追求して行動するが、この性質はネットワーク通信における送信者の性質と非常によく似ている。したがって、MG をネットワーク上の輻輳制御に利用することで、MG の特性であるプレイヤー (送信者) 間の協調的行動が発現し、効率的なパケット通信が実現できるのではないかと考えられる。

4.1 ゲームのフィールド

提案手法では、送信者を MG のプレイヤー、直前の輻輳から次の輻輳までの期間を MG の一回のラウンドと考え、MG による各ラウンドの勝敗の観察と、勝者に対する利益の享受をおこなうことで輻輳制御を実現する。ここで提案手法における利益とは、輻輳検知後の転送速度の大きさのことであり、輻輳発生後の転送速度の減少率を変えることで、各送信者に対してゲームに対するインセンティブを与えていく。

ネットワーク上で MG をおこなうには、各プレイヤーの選択を監視し勝敗を判定する者が必要になる。しかし一般にネットワーク上の各送信者は、ゲームの参加者数や他のプレイヤーの選択について知ることはできない。そのため提案手法では、MG がネットワークのルータ上でおこなわれるものとした。ルータに送られたパケットは、ルータがもつキューに入れられ、パケットヘッダに記録された情報を読み取られた後で、ルータの経路選択機能を用いて次のルータへと転送される。

輻輳の原因であるパケットの破棄は、ネットワークが混雑してルータに送られてくるパケット数が増加し、キューから溢れることにより発生する。したがって各ルータは、自身を通過するパケットの情報を管理することで、輻輳の発生を確実に検知することができる。またゲームの勝敗についても、各送信者が選択するグループの情報をパケットにのせて送信し、その情報を適宜管理することで、ルータ上で正しく判定することができる。

4.2 ゲームの実行

パケット通信に MG を実装する具体的な方法は以下の通りである。各送信者に対してそれぞれ s 個の ST をあらかじめ与えておく。ネットワークに参加する際、各送信者は MG のルールにしたがって ST を選択し、選択したグループの情報をパケットにのせて送信する (ただし一度なされたグループの選択は、輻輳を検知するまで変えてはいけない)。その後送信者は、輻輳が発生するまで、転送速度を増加させながらパケットを送出する。送信されたパケットは、受信者へ到達するまでにルータを経由するが、パケットを受け取った各ルータは、そのパケットの送信者がどちらのグループを選択したかを確認・記録し、グループごとに、そのグループを選択した送信者数をカウントする。その後、ネットワークが混雑するなどの理由で、ルータでパケットの破棄が起こったときに、輻輳が発生し勝敗の決定がなされる。ルータは、そのラウンドで自分に送られてきたパケットの送信者たちのうち、より少数の送信者によって選択されたグループの選択者を勝者と判定し、図 2 に示すように、以下のような方法で各送信者たちに勝敗をフィードバックする。

勝者へのフィードバック: 勝ちグループを選択した送信者へのフィードバックは、ルータが、その送信者から送

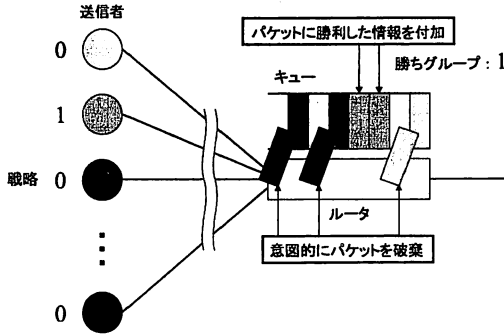


図 2: 勝利によるフィードバック:

られてきたパケットに勝利したことを伝える情報をのせ、パケットの受信者へ向けて転送することでおこなわれる。勝者から送られてきたパケットがキューにない場合は、再び勝者からパケットがルータに送られてくるのを待ち、送られてきたら、そのパケットに勝利したことを伝える情報をのせて受信者に向けて転送する。すでに勝者の送信が終了してしまっている可能性もあるので、ある程度の期間が経過しても送られてくることがなければ、ルータはその勝者の送信が終了したと判断する。この待ち時間は、次に輻輳が発生するまでの期間を考慮してルータごとに設定する。送信者が勝者であることを付記されたパケットを受け取った受信者は、その情報を ACK にのせて送信者へ送り返し、送信者はこの ACK を受け取ることで、輻輳の発生とそのラウンドで勝利したことを知る。

敗者へのフィードバック: 負けグループを選択した送信者へのフィードバックは、その送信者から送られてきたパケットをルータが意図的に“破棄”することでおこなわれる。このような意図的な破棄によって、敗者は重複 ACK から輻輳を検知し、それによってそのラウンドの勝負に負けたことを知る。このとき破棄するパケット数が小さすぎると、すでにルータに向かっているパケットによってキューが埋まり、輻輳が完全に回避されなかったことによって、すべての送信者へのフィードバックが完了する前に次の輻輳が発生する可能性が出てくる。一方で、破棄するパケット数が大きすぎると、通信が途切れてタイムアウトがおきる恐れがある。タイムアウトは送信者をスロースタート状態に引き戻すので、不要なタイムアウトは極力さげなくてはならない。以上のことから、実際のシステムにおいては、破棄するパケット数は環境にあわせて適宜調節する必要がある。

以上の方法を用いたフィードバックにより勝利を知った送信者は、勝ちグループの履歴を更新し、それを基に次のラウンドで選択するグループを決定する。これを繰り返すことで、送信者は MG をおこなないながらパケット通信をおこなうことになる。

4.3 転送速度の調節

次に、MG の勝敗をどのように輻輳制御に反映させるかについて述べる。MG では各ラウンドの勝者に対して利益が与えられるが、提案手法では前述のように、転送速度の大きさが利益の対象となり、輻輳検知後に減少させる転送速度に差をつけることが勝者への利益供与となる。ここで各ラウンドの勝敗の通知は輻輳の発生を意味しているので、ネットワークの混雑を解消するために、(いずれかの)送信者は転送速度を減少させなくてはならないことに注意しよう。本研究では、そのような利益の与え方として、以下の二通りの方式を提案する。

4.3.1 方式 1: 敗者のみ転送速度を減少

一つ目は、勝者は何もせず、敗者のみが転送速度を減少させる方式である。この方式では、輻輳が発生しない間は AIMD と同様すべての送信者が転送速度を加算的に増加させる。また輻輳発生時には、ラウンドの敗者は重複 ACK を受けて転送速度を減少させるが、勝者は転送速度を減少させることなくそのまま増加させていく。したがってこの方式では、輻輳発生を検知しても転送速度を減少させずにすむことが、勝者にとっての利益となる。

4.3.2 方式 2: 勝利による減少後の初期値を設定

二つ目は、各ラウンドの勝敗により転送速度を異なる値(初期値)に減少させる方式である。この方式では、輻輳が発生していないときの動きは AIMD や方式 1 と同じだが、輻輳が発生したときには、すべての送信者が勝敗に応じた比率で転送速度を減少させる。したがってこの方式では、輻輳検知後に敗者よりも大きな転送速度で転送を再開できることが、勝者にとっての利益となる。初期値の計算は、基準となる値(基準値)を求めた上で、各送信者がその基準値を用いて自律的に初期値の設定をおこなう。

基準値を求めるための具体的な方法は、以下の通りである。基本アイデアは、文献 [6] の公平値の求め方をベースにしており、輻輳直後の(減少させられた)転送速度から次の輻輳が発生する直前の転送速度までの、転送速度の増加量を利用することである。(AIMD と同様)提案手法では、輻輳が発生していないときは、すべての送信者が等しい割合で転送速度を増加させていた。したがって、前回の輻輳後に新規にネットワークに参加した送信者以外は次の輻輳までの転送速度の増加量が等しくなり、この値がすべての送信者たちの間で共有されることになる。転送速度の増加量は、輻輳ウィンドウの大きさをあらわす TCP の内部変数 $cwnd$ の値の変化から知ることができる。具体的には各送信者は、輻輳検知時に更新された直後の $cwnd$ の値と、次の輻輳発生直前の $cwnd$ の値の差か

ら、転送速度の増加量を求めることができる。以下ではこの差を Δ と記すことにする。

提案手法では、二つのパラメータ $\beta, \gamma (\beta \geq \gamma)$ を用いて、転送速度の基準値を以下のように定義する：

$$\text{基準値} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{2\Delta}{\beta + \gamma} \quad (1)$$

またこの値を用いて、勝者と敗者の初期値を以下のように設定する：

- 勝利 … 初期転送速度を (基準値) $\times (1 - \gamma)$ に設定。
 - 敗北 … 初期転送速度を (基準値) $\times (1 - \beta)$ に設定。
- なお第5章の実験では、パラメータ β, γ の値は、それぞれ $\beta = 0.5, \gamma = 0.2$ のように設定される。

5 評価

本章では、提案する輻輳制御手法の効果をシミュレーションにより実験的に評価する。具体的には、提案手法が AIMD の帯域利用の効率性をどの程度改良しているのか、の点について詳細に調べていく。

5.1 シミュレーションモデル

本論文では、図3のネットワークを対象としたシミュレーションをおこなう。本来であれば、複数のルータが連鎖するような、より複雑なネットワーク上で提案手法の評価をおこなうべきであろうが、提案手法の効果をより正確に理解するため、ここではもっとも単純な構造のネットワークに絞って評価することにした。なお、このような単純なネットワークでも、輻輳の発生とその制御という意味では、必要最低限の要件を満たしていることに注意されたい。実験では、送信ノード数と受信ノード数を $2^k + 1 (1 \leq k \leq 6)$ 個とした。

以下では、帯域の利用率を、一定時間以内に受信ノードによって受け取られたパケット数の総和をその帯域で通すことのできる最大パケット数で割った値によって評価する。帯域の利用率は送信ノードや受信ノード全体で評価され、その値によりボトルネックリンクの帯域をどれだけ利用できているか評価する。

また、一定時間以内に受信ノードによって受け取られたパケット数の総和を送信ノードから送出されたパケット数の総和で割った値をパケットの到達率とする。到達率は送信ノードや受信ノードごとに評価され、その到達率のばらつきによって、輻輳制御手法の公平性を評価する。なお本論文では公平性をはかる指標として、Fairness Metric[7]を用いることにした。この指標は次の式で与えられる：

$$F = \frac{\sum x_i^2}{N(\sum x_i^2)}$$

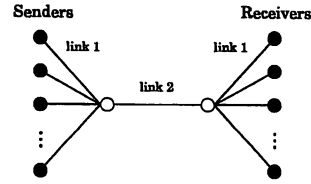


図3: セットアップ。

ここで x_i は受信ノード i によって受け取られたパケット数 (到達率) であり、 N は送信者数をあらわす。 F は0から1までの値をとり、1に近いほど公平性が高いことをあらわす。

シミュレーションは、NS2(Network Simulator)[8]上でおこなった。シミュレータで設定したネットワーク上の各リンクに関するパラメータは以下の通りである：

- リンク1： 帯域が1Gbps, 伝播遅延が2ms
- リンク2： 帯域が100Mbps, 伝播遅延が10ms

なお提案手法では、MGに関するパラメータも設定する必要があるが、第3章の考察から、ここでは送信者が保持するSTの個数 s と参照する履歴の長さ m をいずれも3とした。シミュレーションでは、1ラウンド60秒の実験を固定されたパラメータ設定のもとで100回ずつおこない、その平均をとって、帯域の利用率と公平性の評価をおこなった。

5.2 結果

本節では、提案手法を用いた場合に、どの程度の公平性を保ちつつ帯域利用の効率性の向上が図れるのかを実験的に評価する。図4に結果を示す。この図は、全体の送信者数ごとの帯域の利用率を示すグラフである。“AIMD-1/2”が従来のAIMDの結果、“AIMD-1/3”が減少率を1/3に設定したAIMDの結果、“Loser”が方式1の結果、“IniVal”が方式2の結果をあらわす。一方の公平性に関する結果は図5に示す通りである。この図は、 $N = 65$ のときの各受信者への到達パケット数を降順に並べ替えたグラフである。

図4のグラフより、方式1を用いることで、AIMD(1/2)より最大約18%、AIMD(1/3)より最大約16%帯域の利用率が向上していることがわかる。

一方の公平性に関する評価結果は、図5に示されている通りである。方式1ではAIMDの結果を下回る送信者はほとんどいないが、AIMDのグラフがほぼ横ばいで公平性が保証されているのに対し、方式1ではグラフの傾きが急であり、しかもFairness Metricの値が $F = 0.990$ とAIMDの $F = 0.999$ より小さくなっていることから、従来手法ほどの公平性が維持できていないことがわかる。

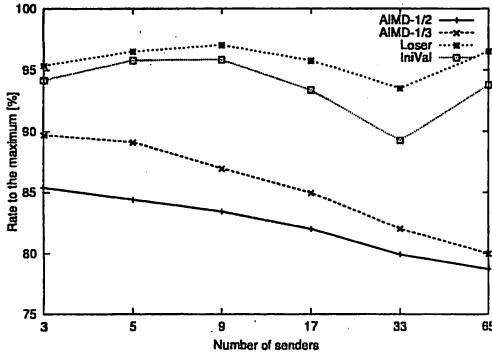


図 4: AIMD と方式 1, 方式 2 における各送信者数での帯域の利用率.

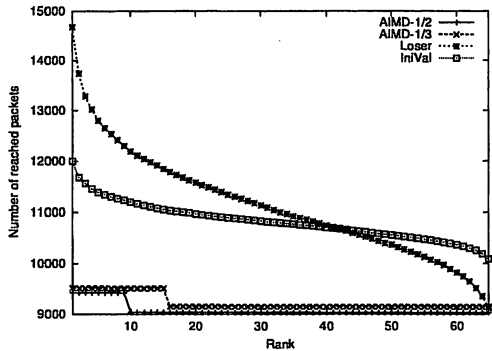


図 5: 各受信者への到達パケット数 ($N = 65$).

これは、方法 1 のような方法では、輻輳検知時の転送速度の大きさや連勝の発生の割合が影響し、“勝利数”を均等化させることが直接的にパケットの送信効率の均等化にはつながりにくいためだと考えられる。

図 4 のグラフより、方式 2 を用いることで、方式 2 は方式 1 と比較して帯域の利用率が全体的に低くなるが、AIMD(1/2) より最大約 15%、AIMD(1/3) より最大約 14% 帯域の利用率が向上している。

一方の公平性は、図 5 のグラフより、方式 2 ではグラフの傾きがなだらかで AIMD の傾きに近づき、さらに Fairness Metric の値も $F = 0.998$ と高い値となった。このことから、方式 2 は方式 1 に比べると十分高い公平性を維持しており、すなわち、提案する初期転送速度の計算方法は、方式 1 のように MG での連勝などに影響されにくく、MG によって実現される勝利数の均衡を、送信者間の転送速度の均衡にうまく結び付けていることになる。

6 おわりに

本論文では、提案手法の効果をシミュレーションにより実験的に評価した。実験の結果、帯域の利用率が従来手法と比較して約 15% 向上することが明らかとなった。また公平性に関しても、従来手法と同程度に保たれることがわかった。

今後の課題として次のことが挙げられる。一つ目は、Minority Game における勝敗の境界の設定方法を考えることである。二つ目は、Minority Game 以外の方法(ゲーム理論)について考えることである。三つ目は、状況に応じたパラメータの再設定方法を考えることである。

参考文献

- [1] S. Floyd. HighSpeed TCP for Large Congestion Windows. *Internet Draft <draft-floyd-tcp-highspeed-01.txt>*, work in progress, August 2002.
- [2] D. Challet and Y.-C. Zhang. Emergence of Cooperation and Organization in an Evolutionary Game. *Physica A*, 246-407, 1997.
- [3] E. Moro. The Minority Game: an introductory guide. E. Korutcheva and R. Cuerno (Eds.), *Advances in condensed matter and statistical physics*. Nova Science Publishers, New York, 2003.
- [4] D. Chiu and R. Jain. Analysis of the Increase and Decrease Algorithms for Congestion Avoidance in Computer Networks. *Journal of Computer Networks and ISDN*, 17(1):1-14, June 1989.
- [5] W. B. Arthur. Inductive Reasoning and Bounded Rationality (The El Farol Problem). *Proceedings of American Economic Review*, 84:406-411, 1994.
- [6] P. C. Attie, A. Lahanas and V. Tsaoussidis. Bimodal Congestion Avoidance and Control. *Proceedings of IEEE/ACM Transactions on Networking*, November 2002.
- [7] R. Jain, Dah Ming Chiu and H. Hawe. A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Systems. DEC Research Report TR-301, September 1984.
- [8] The Network Simulator - NS-2. Tech. Rep. Web Page: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.