

P2P 環境下の評判モデルによる公平性保証

伊藤 洋輔[†] 河野 浩之^{††}

[†] 南山大学大学院数理情報研究科 〒489-0863 愛知県瀬戸市せいれい町 27

^{††} 南山大学数理情報学部 〒489-0863 愛知県瀬戸市せいれい町 27

E-mail: [†]m05mm010@msie.nanzan-u.ac.jp, ^{††}kawano@it.nanzan-u.ac.jp

あらまし 本研究では、自律分散型ネットワークである P2P におけるただ乗り問題を解決するために必要とされる、システム上のピアの各種振舞いについてシステムに提供したサービス量と各ピアの評判を用いたモデル化を行う。その上で、システム貢献量にしたがう格差サービスを実現した P2P コンテンツ流通システム上でのピアの振舞いを考える。数学的モデルにより、提供したピアのサービス量にしたがう格差サービスを実現可能であることを示した。また、より動的な環境を考慮したシミュレーション実験を行った結果、偽物のコンテンツ提供を企てる悪意ピアとの取引をも減少させることを明らかにした。さらに、ピアから提供されるサービス量の動的な変化に対し、供給するサービス量を柔軟に対応させることが可能であることを示した。

キーワード ピアツーピア, ただ乗り, 格差サービス, 評判

Fairness guarantee applying reputation model in P2P environment

Yosuke ITO[†] and Hiroyuki KAWANO^{††}

[†] Graduate School of Mathematical Sciences and Information Engineering, Nanzan University Seirei-cho 27, Seto-shi, Aichi, 489-0863 Japan

^{††} Faculty of Mathematical Sciences and Information Engineering, Nanzan University Seirei-cho 27, Seto-shi, Aichi, 489-0863 Japan

E-mail: [†]m05mm010@msie.nanzan-u.ac.jp, ^{††}kawano@it.nanzan-u.ac.jp

Abstract In this paper, we proposed the behavior model of various players based on the amount of service previously provided by requesting peer and the reputation value in P2P system. We focus on the behavior of peers on the P2P contents distribution system that achieves the differential-based service following amount of contribution. By using mathematical model and simulation, we make clear that peers who contribute system to provide high service rate can obtain many services, so freeriders are removed by applying proposed model. We explain that proposed reputation mechanism is able to ostracize malicious peer who attempts sending wrong information to mislead service rate or to offer malicious contents. Furthermore, the system can respond to offering rate flexibly from dynamic alteration of service rate.

Key words Peer-to-Peer, free-rider, differential-based service, reputation

1. ま え が き

現在、既存のクライアント/サーバ型のモデルと比較して頑健性、拡張性、可用性等の面からピアツーピア (P2P) 技術が注目を浴び、精力的に研究が進められている [14]。P2P 型のシステムは自己組織化された分散資源共有ネットワークの形態をとり、各ピアは明確な区別がされない。そのため、各ピアは互いにサービスを提供しあうことにより柔軟なネットワークを形成することが可能となる。これら P2P の技術は、現在のところファイル共有システムに脚光を浴びているが、今後は分散コン

ピューティングや分散ストレージ、ファイル検索、P2P マルチキャストなどさまざまな利用法が期待されている。

しかしながら、ピュアな P2P システムでは中央で個々のピアを管理する機構が存在しない。そのため、各ピアは自己の目的を達成するために自律して振舞うことが予想される。結果として、システムから資源共有サービス入手する一方、自身はシステムに対して資源共有サービスを提供しないただ乗り (*free-rider*) 問題が発生する。実際、P2P ファイル共有システムである Gnutella では全接続ピア数の 70% がコンテンツを共有していないという調査結果 [1] が存在する。

そこで本研究では、P2P システムにおける資源供給を協調させるため、バンド幅などの提供サービス量や評判等によるインセンティブを考慮した各ピアの戦略的振舞いをモデル化する。また、振舞いモデルに対する適用例として我々が過去に提案した P2P コンテンツ流通システム [7] を用いる。さらに、数学的なモデル化やシミュレーション実験を通じ、様々なピアの存在によりシステムに与える影響について考察する。

2 章では、P2P システムにおける公平性の保証に関する関連研究を概説する。3 章では、本論文で提案するインセンティブを踏まえたシステムでのピアの振舞いをモデル化する。4 章においては、本論文で提案したピア振舞いモデルを適用するシステム例である信頼の連鎖機能を用いたコンテンツ流通システムについて説明する。5 章で、適用したシステム上での振舞いの数学的モデル、より動的な環境での振舞いを考察するためにシミュレーション実験を行い、最後に 6 章でまとめる。

2. ピアの公平性に関する関連研究

ピアの利己的な振舞いを抑制させシステムの協調参加へと導く先行研究を表 1 にまとめる。金銭支払いスキーマでは、サービスの提供により現実の通貨、あるいは架空通貨を得ることがインセンティブとして作用する。Gells ら [5] は、経済的アプローチからレプリカ管理に対する配置場所、配置数を考慮したシステム構築手法を考察した。しかし、P2P 型のシステムにおける金銭支払いスキーマの導入には架空通貨の導入や行われたサービスの追跡方法、支払いシステムの実現が必要不可欠であり、これら仕組みは実装困難である。そのため、インセンティブを与える要因として格差サービスを利用する [3]。

格差サービスではバンド幅やディスク容量、ファイル数など自身が提供した資源によりシステムから入手する資源に格差を生じさせる方法である。さらに、格差サービスによるシステム性能を考察するため、P2P システム上における各ピアの自律した振舞いに対してゲーム理論を適用する研究が行われている。Buragohain ら [3] は、合理的ピアにおけるやり取りをゲーム理論を用いて解析し、同種な環境におけるナッシュ均衡解の存在、異種な環境におけるシステム離脱や均一的振舞いピアに対する影響を示した。さらに、システム性能を改善するための格差サービスの必要性について議論を行った。このほか、Ma ら [11] はファイル転送サービスに焦点をあて、ゲーム理論を用いたモデル化を行った。その際、各ピアに割り当てるバンド幅

表 1 システムへの協調参加を促す手法

Table 1 Encouraging cooperation techniques

金銭支払いスキーマ [5]	サービス入手分だけ金銭を支払い、それをサービス提供ピアに還元
格差サービス [3]	自身がシステムに貢献した量にしたがい、受け取るサービス量に格差
	貢献要因
	ファイル転送サービスのバンド幅割り当て [11]
	アップリンクバンド幅による評判調整 [6] [12]
	ピア間におけるサービス提供率の割合 [4]
	マルチエージェントを用いた供給資源量調査 [2]

に関して彼らが提案したインセンティブと効用特性を踏まえた資源入札メカニズムを適用した。その結果、パレート最適なバンド幅割り当ての保証、各競合ノードにおけるナッシュ均衡解にしたがった振舞いを示した。Mortazavi ら [12] が行った研究では、アップリンクバンド幅による評判の調整をベースに格差サービスを行う手法を提案し、ゲーム理論を適用してモデル化した。結果、アップリンクバンド幅の増加により評判の改善、ダウンロード性能の改善をもたらすことを示した。Gupta ら [6] も評判をサービス提供のためのインセンティブとした。ノードからのサービス提供確率を現在の評判によって求め、他ピアへのサービス提供のみが評判を上昇させる要因とし、各ピアの振舞いについてのゲーム理論を用いたモデル化を行った。その他、Feldman ら [4] は P2P 環境における一般化された囚人のジレンマを用いてモデル化し、格差サービスを実現する方法として自身のサービス提供率と相手のサービス提供率から導出される返礼決定関数を提案した。Ranganathan ら [13] は多数提案されているインセンティブモデルについて、多人数の囚人のジレンマモデルをベースにインセンティブスキーマを定義することにより、異なったスキーマの効果を検証する研究を行った。結果、単純なインセンティブスキーマを適用するだけでもユーザの利己的振舞いを制約することが可能であることを示した。

3. 評判情報を考慮した振舞いのモデル化

本章では、様々な評判モデルに関する研究を説明すると共に、システム中における様々なピアの基本的振舞いのモデル化を示す。

3.1 評判モデル

現在、eBay におけるオンライン取引が Web 上で成功した評判モデルの例として考えられるが、この仕組みは Web 上で実現しているものであり、P2P 上で応用するためには工夫を要する。そこで、表 2 で示すようにピア間における評判情報を利用した信頼性の向上を目的とする研究が広く行われている [8]。評判に基づくピアの信頼性を評価する手法として、評判による評価値を単純に平均したものや、ベイズの理論を応用した手法、信頼の輪に基づく評価、システム構造に基づく信頼性の推定的な計算方法などが提案されている。

Banerjee ら [2] が行った研究では、マルチエージェントをベースにした互惠メカニズムを利用することにより、ピアのただ乗り問題に対処した。さらに、ただ乗りピア間の共謀、コストなし ID 生成問題に対応するため、ピアが提供した評判情報を判定する手段としてベイズの定理を利用し、確率的に評判を更新する手法を提案した。Kamvar ら [9] は、過去の履歴によるロー

表 2 評判モデルの手法

Table 2 Trust evaluation methods

手法	方法
単純平均	ピアの過去の振舞いに対する評価値の単純平均
確率モデル	ベイズの理論を用いた確率的な構造の利用 [2]
信頼の輪	信頼できるピアホストの連鎖を利用 [7]
フローモデル	システム全体における評判を推定的に評価 [9]

カルな信頼値とシステム中の他ピアの評判の構造を利用し、各ピアのローカルな信頼値を基にした固有値の計算を行うことによりグローバルな信頼値を求める手法を提案し、シミュレーション実験によって悪意のあるピアの様々な振舞いに対して頑健なシステムを実現することが可能であることを示した。

この他、Xiong ら [16] はピアに対する評判の要因として取引の成功・失敗以外の複数のものを着目した。そして、フィードバックの結果、トランザクション量、フィードバックの信頼性、トランザクションの背景、コミュニティの背景の 5 種に基づいた信頼性評価を提案した。Liang ら [10] による研究では、評判を評価する際、長期間のピアの振舞いを累積的に査定したものとリスクと呼ばれる直近のピアの振舞いの両方を踏まえて計算を行うことを提案した。その際、他ピアからの推薦情報も利用する。シミュレーションの結果、推薦情報よりもリスク部分の重みを大きくとることにより、非協調的なピアや悪意のある推薦が行われる P2P コミュニティにおいても頑健なシステムを形成することが可能であることを示した。

3.2 ピアの振舞いモデル

本研究を進めるにあたり、ゲーム理論を用いてピアの戦略的振舞いを考察している過去の研究では、すべてのピアが合理的に振舞うことを前提としており、ピアの様々な振舞いについて考察されていない。また、評判を用いたピアの信頼性評価を行う過去の研究ではシステムへの公平な参加を保証するための議論がなされていない。そのため、本研究では Tamilmani ら [15] が行ったシステム中に存在する様々な種類のピアにおける振舞いモデルを基にする。まず、文献 [15] ではダウンロードバイト数のみを考慮している。しかし、本研究では各ピアが保持する他ピアに対する評判も導入し、システム中のピアの種類や時間的な影響に応じてサービス量をより柔軟に変更することが可能となるよう拡張する。また、インセンティブとして評判も組込むことによるシステム中での振舞いの影響について、我々が過去に行った研究である信頼の連鎖機能を用いたコンテンツ流通システム [7] 上において数学的なモデル化、実験を行い考察する。

一般に、ピア間でサービスの授受が行われる際、サービスを提供するピアでは今までに対象から入手したサービス量や対象の評判、サービスを追加提供することによる将来的なサービス量の増加など、様々なことを考慮したうえでサービス提供量を決定すると考えられる。

ここで、ピア i からピア j に対するサービス提供を考える。ピア i は時刻 t までにピア j と取引を行い、サービスを手続した量 $d_{ij}(t)$ を管理しているものとし、 $d_{ij}(t)$ に対してある一定割合 α の報酬を返す。さらに、ピア i は周囲に対する評判をより高めるとともに将来的なサービス供給量を増加させるため、自身の限界サービス提供容量 U_{max} に対する一定割合 β の無償提供をする。また、ピア i はピア j に対する時刻 t における評判 $R_{ij}(t)$ を保持しており、取引対象の評判により求めたサービス量における一定割合 γ の提供を行う。

これらの事を踏まえ、(1) 式により時刻 t におけるピア i のピア j に対する最大サービス提供容量 $u_{ij}(t)$ とする。

表 3 様々なピアの種類におけるパラメータの違い
Table 3 Parameter variation between peer types

基本的振舞いの種類 T	α	β	γ
T_{free}	0	0	0
T_{rec}	$0 < \alpha \leq 1$	0	0
T_{rep}	$0 < \alpha \leq 1$	0	$0 < \gamma \leq 1$
T_{pos}	$0 < \alpha \leq 1$	$0 < \beta \leq 1$	$0 < \gamma \leq 1$
T_{cont}	-	1	-
T_{mal}	-	1	-

$$u_{ij}(t) = \alpha d_{ij}(t)^+ + \beta U_{max} + \gamma f(R_{ij}(t)) \quad (1)$$

ここで、時刻 t はすべてのピアにおいて統一した時間である。また α, β, γ はそれぞれ報酬割合、無償提供割合、評判割合に応じた係数である。さらに、評判に関する関数 f は $R_{ij}(t) = 0$ のとき 0、 $R_{ij}(t) = 1$ のとき U_{max} をとる単調非減少な関数である。ただし、最大サービス提供容量を求める際、報酬割合 $d_{ij}(t)$ については非負の値のみを考慮するものとする。

以降は表 3 で示す 6 種類のピアの基本的振舞いにおける α, β, γ のパラメータの違いを説明する。なお、システム中の各ピアは実際、取引を行う対象の性質や現時点でのピアを取り巻く状況など様々な要因に応じてこれら基本的振舞いを混合させ、各種パラメータを変更しながら滞在するものと考えられる。

1) ただ乗りピア (T_{free})

ただ乗りを行うことを考えているピアは、他ピアからサービスを手続する一方、他ピアに対するサービス提供は決して行わない。そのため、(1) 式で与えたすべてのパラメータの値を 0 に設定する。

2) 受けたサービスにのみ返すピア (T_{rec})

自身が入手したサービスにしたがってサービスを提供するピアは、自身から積極的にサービスを提供することは行わない。そのため、リスクを冒し将来のサービス増加を目的とするパラメータ β 、相手の評判に基づいてサービス提供量を調整するパラメータ γ は 0 とする。一方、自身が入手したサービス量に基づき、 α を 0 から 1 の間に設定することでサービスを提供する。

3) 評判を考慮するピア (T_{rep})

未知のピアとも積極的に取引を行うために相手の評判を考慮した取引を行うピアは、 α だけでなく評判割合パラメータ γ も 0 から 1 の範囲で考慮する。しかし、リスクをとった積極的貢献によるサービス入手量の増加は考えないため、 β の値を 0 と設定する。

4) 積極的貢献ピア (T_{pos})

システムに積極的に貢献することによりシステムからの入手サービス量の増加を考えるピアは、システム内での評判をより高めるため、リスクを伴うものの周囲に対して積極的にサービスを提供する。そのため α, β, γ すべてのパラメータを考慮する。

5) 貢献者 (T_{cont})

貢献者は、システムに貢献することのみを考え、自身はシス

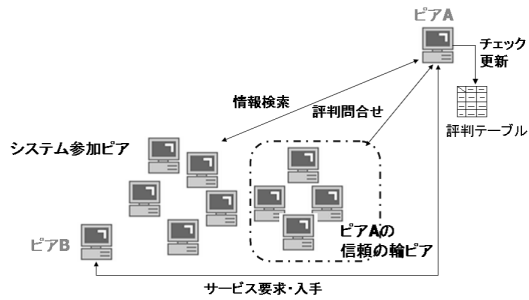


図 1 信頼の連鎖機能を用いたコンテンツ流通システム
Fig. 1 Contents distribution system with trust chain

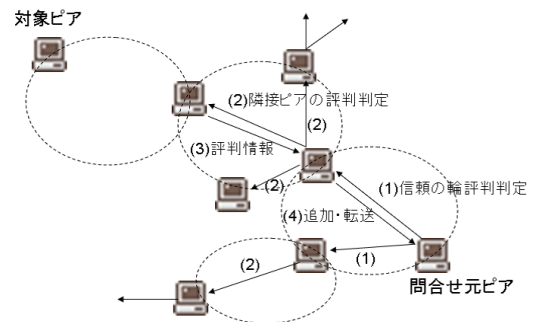


図 2 信頼の連鎖を用いた評判導出例
Fig. 2 Example of finding trust chain

テムからのサービス入手を求めないピアである．そのため， α ， γ に対する値は考慮する必要はなく， β の値を 1 に設定することにより，自身のすべての資源を貢献する．

6) 悪意のある振舞いを行うピア (T_{mal})

システム中には，上記の振舞いを行うピア以外に偽物のサービス提供を考える悪意ピアが存在すると考えられる．彼らはサービスの入手に興味はなく，悪意のある振舞いを行うことのみ考える．そのため，彼らは貢献者と同じ振舞いをするものとしてモデル化する．

4. ピア振舞いモデルを適用するシステム

本章では，性能評価で使用する信頼の連鎖機能を用いたコンテンツ流通システムについて概説する．

4.1 システム概要と連鎖を用いた評判値導出方法 [7]

はじめに，信頼の連鎖機能を用いたコンテンツ流通システムの概要を図 1 で示す．サービス要求ピア A，サービス提供ピア B 間における一連の取引の流れを示す．ピア A は，システムに参加しているピアに対し，目的サービスを提供するピア情報について問合せを行う．応答を得ると，情報からピア B を取引対象として決定し，サービス要求を行う．ピア B は，過去にピア A から提供されたサービス量情報や既に自身が保持しているピア A に対する評判情報，後述する信頼の連鎖構造を用いて求めた評判を利用し，ピア A に対するサービス提供量を決定し，サービスを提供する．ピア B からサービスを手したピア A は，今回のサービス情報を以降サービス提供のために記録し，サービス結果からピア B に対する評判を更新する．

次に，信頼の連鎖機能を用いた評判値導出方法を示す．図 2 は，あるピアが未知のピアと取引を行うために用いる評判の導出例であり，以下の説明の番号は図 2 に対応する．問合せ元のピアは，対象ピアに至る信頼の連鎖構造を検証するために，(1) 自身が直接信頼する全ピアに対し，対象ピアの評判問合せを行う．評判問合せメッセージを受け取ったピアは，(2) 自身の信頼するピア中に対象ピアが存在しなければ自身が信頼する全ピアに対して再帰的に評判問合せを行う．(3)(4) 存在していれば対象の評判値情報，経由したピアの評判値情報を追加しながら問合せメッセージ転送ピアへと返送する．

以上の処理を繰り返し行うことで，問合せピアは対象ピアに至る複数の信頼の連鎖構造情報を入手できる．その後，応答

メッセージを受信したピアは，あらかじめ保持している評判値，入手した信頼の連鎖情報に基づいて対象ピアの評判値を求める．(2) 式により，ピア i からピア j に対する評判値を与える．

$$R_{ij} = \max(m * R_{ik} * chainR_{kj}, R_{ij}) \quad (2)$$

ここで，ピア i が保持していたピア j に対する評判値を R_{ij} ，評判問合せにより求めたピア i のピア j に対する評判値を $chainR_{ij}$ ，信頼の連鎖数に応じた係数を m とする．信頼の連鎖情報を用い，ピア j の直前ピア k に対する評判値，ピア k のピア j に対する評判値，自身からの信頼の連鎖数に応じた係数の積をとる．なお，ピア i からピア j に対する評判値を既に保持する場合，大きい値を新たな評判値とする．上記式を再帰的に適用し，自身から対象ピアまでの信頼の連鎖構造を利用した評判値計算を実行する．複数の信頼の連鎖が存在する場合，対象ピアに至る評判値の最大値に基づいて求める．

4.2 サービス入手ピアの選択

サービスを手するピアの選択戦略について，過去の対象へのサービス量と，対象の評判を考慮し，これらから確率的に選択する．ピア i がピア j を取引相手として選択する確率 P_{ij} を求めるための (3) 式を与える．

$$S_{ij}(t) = k * \frac{u_{ij}(t)}{\max(u_j(t))} + (1 - k) * R_{ij}(t)$$

$$P_{ij}(t) = \frac{S_{ij}(t)}{\sum_j S_{ij}(t)} \quad (3)$$

なお， k は過去の取引量と取引相手の評判における重み付けを決定する変数であり， $0 \leq k \leq 1$ である．また， $\max(u_j(t))$ はサービス要求に対して応答をしてきたピアにおける $u_{ij}(t)$ の最大値であり， $\sum_j S_{ij}(t)$ は要求に応答したピアにおける $S_{ij}(t)$ の和である．(3) 式を用いることにより，入手先のピアを確率的に選択することとなる．結果として，特定のピアからのみサービスを入手することがなくなり，広範囲のピアと取引を行う機会が与えられる．

4.3 評判値更新

過去の履歴を反映し，次回のサービス提供につなげるため，サービスの授受を行ったピアはサービス結果にともない対象ピ

表 4 評判値を更新する際の判断基準

Table 4 Criteria for reconfiguring reputation value

ピア \ 更新	増加	変化なし	減少
要求ピア i	$d_{ij}(t) > u_{ij}(t)$ $d_{ij}(t) = D_{max}$	$d_{ij}(t) = u_{ij}(t)$ $d_{ij}(t) = U_{max}$	$d_{ij}(t) < u_{ij}(t)$ 偽サービス
提供ピア j	-	-	$d_{ji}(t) < 0$

アの評判値を更新する．評判値更新の判断基準を表 4 にまとめる．以降は、これらの判断基準を決定する上で、評判値の増減を行うそれぞれの視点から述べる．評判値の増加に関して、サービス要求ピアでは今回の入手サービス量 $d_{ij}(t)$ が現在まで自身が対象ピアに提供したサービス量 $u_{ij}(t)$ より少しでも多い場合とする．また、自身の限界サービス入手容量 D_{max} のサービスを入手できた場合も増加させる．一方、サービス提供ピアではサービス提供によって対象ピアの評判が上昇することはない．次に、サービス要求ピアにおける評判値を下落させる要因として偽サービスの入手が挙げられる．また、過去に自身が提供したサービス量よりも少ない量が提供された際、相手の限界サービス提供容量 U_{max} でない場合についても同様に評判値を減少させる．サービス提供ピアについては、サービスを入手することが困難なピアから何度もサービス要求が行われる場合に減少させる．最後に、サービス要求ピアでは自身が提供したサービス量と同量のサービスを入手したとしても、自身が提供した量は返してくるのが当然であるため、評判値は変化させないものとする．

また、ピア i のピア j に対する評判値を更新する (4) 式を与える．

$$R_{ij} \leftarrow R_{ij} \pm Ma^x \quad (4)$$

ここで、 a はサービス結果に伴い評判値更新率を決める任意の値であり、 M は評判値を $[0,1]$ で正規化するためのパラメータである．また、 x は直前において望まないサービスが提供された連続回数である．評判は直近の振舞いを反映することの必要性により、連続履歴に基づき更新する一方、ピアに対する評判は徐々に確立する必要があると考え、取引成功時に評判値を一定量増加する．また、取引失敗によるサービス入手者のコストを考慮し、評判値は取引成功時の上昇値に比べ取引失敗時の減少値を大きくとることでペナルティを与える．

5. 振舞いモデルを適用したコンテンツ流通システムの性能評価

本章では、本研究で提案したピアの振舞いモデルを適用することによって、ピアタイプの違いによりシステムから得られるサービス量について数学的モデルを考える．また、現実的な P2P 環境におけるシステムの振舞いを考察するためシミュレーションによる実験を行う．

5.1 ピアの振舞いのモデル化

N ピアがサービスの授受を行うシステムを考える．また、すべてのピアは均質であり、全サービスにおける容量や人気はすべて等しく、要求はすべてのピアに対して等しい確率で到達す

ると仮定する．さらに、各ピアにおいては $U_{max} = D_{max} = C$ であるような限界サービス容量をもち、必ず正しいサービスを提供するものと仮定する．

ただ乗りピアと積極的貢献ピア間の取引

最初に、 T_{free} と T_{pos} が参加している場合における各ピアのサービス入手量について考察する．システム中の T_{pos} の割合が σ であり、残り $1 - \sigma$ のピアが T_{free} であるとする．また、ピアは参加している全ピアにサービス要求を行うことが可能であるが、 T_{free} は要求に対しサービス量 0 で応答するものと仮定する．

T_{free} の各ピアにおいては、サービス提供を行うことがないため (1) 式における報酬割合、評判により得られるサービス量が 0 となる．結果、システム中のある T_{free} がシステム全体から得られるサービス量は、 σN の T_{pos} が提供するリスク部分のみであり、 $\sigma N \beta C$ となる．つまり、任意のピアに対してサービスを要求した際、得られるサービス量は平均 $\beta \sigma C$ となる．

一方、 T_{pos} な振舞いを行うあるピアでは T_{free} から得られるサービス量は 0 であるものの、 T_{pos} から得られるサービス量は限界サービス容量 C まで可能である．結果、システム全体から得られるサービス量は $\sigma N C$ となり、任意のピアに対してサービスを要求した際のサービス量は平均 σC となる．

これらより、 T_{free} は T_{pos} の β 倍しかサービスを入手することができず、 β を小さくすることによって、 T_{free} が得られるサービス量を任意に小さくすることが可能となる．

受けたサービスのみ返すピアと積極的貢献ピア間の取引

次に、 T_{rec} と T_{pos} が存在する場合におけるサービス量について考察する．システム中の T_{pos} の割合を σ 、 T_{rec} の割合を $1 - \sigma$ とする．また、 T_{rec} は T_{rec} 間における取引の際にサービス量 0 でサービス提供を行うものと仮定する．さらに、全ピア間における初期評判値を $r_s (< 1)$ と設定し、このとき $f(r_s)$ を $r (< C)$ とする．

表 4 で示したように、入手サービスに返す行動を行う限り評判が上昇・下落することはないものの、積極的に貢献し続けることにより評判を上昇させることができる．結果、 T_{pos} 間における評判は 1 となる一方で T_{pos} における T_{rec} に対する評判は r_s のままとなる．このことより T_{rec} は、 T_{pos} との取引によって初期値である $\beta C + \gamma r$ のサービスのみを供給し続けられることになる．つまり、 σN の T_{pos} によって合計 $\sigma N (\beta C + \gamma r)$ のサービス量が提供される．それゆえ、ある T_{rec} が任意のピアに対してサービスを要求した際、平均 $\sigma (\beta C + \gamma r)$ のサービス量を入手する．

一方 T_{pos} の場合、 T_{rec} からは $\beta C + \gamma r$ のサービス、 T_{pos} からは C のサービスが供給されることとなる．結果、ある T_{pos} はシステム全体から $(\sigma C + (1 - \sigma)(\beta C + \gamma r))N$ のサービスを入手することとなり、任意のピアに対してサービスを要求した際の平均サービス量は $\sigma C + (1 - \sigma)(\beta C + \gamma r)$ となる．つまり、積極的に貢献することでより多くのピアからより多くのサービスを入手することが可能となる．

5.2 シミュレーション実験

前節では数学的モデルにより対象の P2P システムの性能を

表 5 シミュレーションで用いるデフォルト設定値

Table 5 Default settings

信頼の連鎖機能を用いたコンテンツ流通システムに関する設定		
合計参加ピア数		1,000
最大信頼連鎖数		6
評判問合せの下限評判値		0.97
信頼の連鎖数に応じた係数 m		0.9^x (x :信頼連鎖数)
取引量と評判の重み係数 k		0.9
悪意ピアの偽サービス提供確率		1
残りのピアの偽サービス提供確率		0.05
評判値更新	上昇	$R + 0.02$
	下落 (要求ピア)	$R - 0.01 * 10^x$ (x :連続回数)
	(提供ピア)	$R - 0.05$
ピア振舞いパラメータの設定		
α		1
β		0.05
γ		0.5
評判に関する関数 f		$U_{max} * R^2$
限界サービス提供容量 U_{max}		100

考察した。結果、積極的にシステム貢献を行うことがシステムからの入手サービス量の増加につながることを示した。つまり、対象システムではサービス提供量と評判をインセンティブとして利用することにより、格差サービスを実現することが可能であった。

しかし、数学的モデル化には均質なピアの種類やファイルの要求頻度など、様々な制限が存在する。そこで、動的なピアの振舞い変化などより現実的な P2P 環境におけるシステムの振舞いを考慮し、公平性・信頼性の保証が可能であるかを考察する。ここでは、ピアが行う基本的振舞いの違いによる入手サービス量の差、悪意ピアに対する取引回数、各ピアが設定するパラメータの違いによる影響、途中で振舞いを変更することによる影響の 4 種についてシミュレーション実験を行う。

[セットアップ]

シミュレーション実験を行うにあたり、各実験で使用するデフォルト設定を表 5 で示す。なお、これら信頼の連鎖に関するパラメータ値は我々が過去に行った研究 [7] を基に設定した。

各実験毎に参加しているピアの種類や数は違うものの、合計参加ピア数は 1,000 ピアとする。信頼の連鎖を用いた評判問合せを行ううえで、ランダムなピア間に初期信頼ネットワークを与え、信頼の連鎖数を 6、評判値 0.98 以上のピアに対して問合せを行う。連鎖数、問合せを行うしきい値についてはデフォルト値で設定しておくことにより、P2P システムの現実的なピア参加率においても任意ピアの評判値を計算することが可能となる。ただし、評判問合せに対する応答を大量に入手してしまう場合は最大連鎖数の減少やしきい値の引き上げなどを行うことで、メッセージ数を減らす必要がある。次に、悪意ピアは必ず偽サービスを提供するものの、それ以外のピアにおける偽サービス提供確率を、誤って提供してしまう偽サービスなどの可能性を考慮し 0.05 とする。なお、サービス提供ピアについて 90% 程度の取引成功率になってしまうと、ピア間の評判値が 0 にな

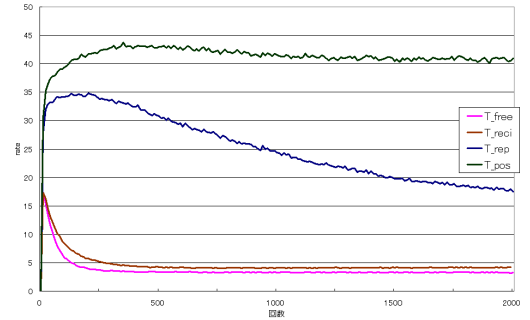


図 3 様々な種類のピアが得られるサービス量

Fig. 3 Obtaining service rate for various peer type

ることが頻繁に発生し、ブラックリストに登録されるなど以降の取引に影響が発生する可能性が考えられる。そのため、本実験では悪意ピア以外のピアにおける偽サービス提供確率を 0.05 と設定した。評判値更新については上昇時に $R + 0.02$ 、下落時は要求ピアでは $R - 0.01 * 10^x$ 、提供ピアでは $R - 0.05$ とする。このとき、 x は対象から評判値が減少するサービスを手続した連続回数である。これら評判値更新に関しては、取引成功時の上昇幅に対し、失敗時の減少幅を大きくとり、失敗時における直近の振舞いも反映する必要性により決定した。

この他、ピア振舞いパラメータについて α を 1、 β を 0.05、 γ を 0.5 と設定する。また、評判によるサービス量を求める関数 f として評判値の 2 乗を用い、各ピアにおける限界サービス容量を 100 と設定する。

I. 様々な種類のピアの振舞い

本研究の目的として、システムにサービスを提供しないピアに対するサービス量の制限により、これらピアをシステムから排除し、システムへの公平な参加を実現することが挙げられる。そこでまず、ただ乗りピアをシステムから排除することが可能であるか実験により確認する。また、システムへのサービス提供度合いにしたがい格差サービスを実現することが可能であり、システムへの積極的参加がサービス入手量の増加につながることを確認する。

デフォルトで与えた設定を利用して実験を行う。システム中のピアの種類については T_{free} 、 T_{rec} 、 T_{rep} 、 T_{pos} それぞれが同じ割合で参加しているものとする。また、サービス要求メッセージを受信したとき T_{free} はすべての要求に応答せず、 T_{rec} は要求者が過去にサービス入手を行った相手以外の場合について応答しないものとする。このとき、システム内の任意のピアが別の任意のピアに対して取引を行うことを 2,000,000 回繰り返した際、各種ピアが得られたサービス量平均を図 3 で示す。

最初に T_{free} 、 T_{rec} について考察する。図 3 より、初期段階ではいくらかのサービスを手入手可能であるが、取引が進むにつれ入手サービス量が減少する。これは初期状態時、信頼の連鎖構造をランダムに構成したことによる T_{free} 、 T_{rec} への評判の存在にともなうサービス量の加算が原因であると考えられる。しかし、 T_{free} はサービスを提供しないためサービス提供ピアにおける評判値が減少し、最終的には 0 となる。同様に、 T_{rec} はサービスを提供するものの今までに入手したサービス量しか

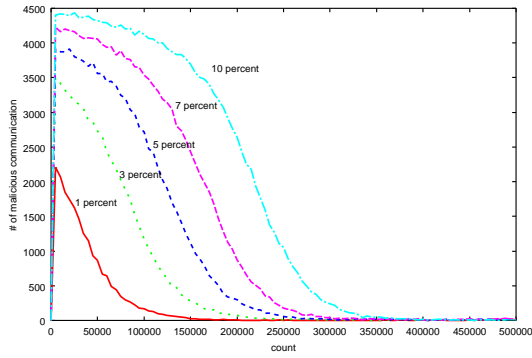


図 4 悪意のあるピアとの取引回数の変化
Fig. 4 Transaction times from malicious peer

返すことを行わないため、評判値を上昇させることができない。その一方、まれに行ってしまう偽物のサービス提供や同一ピアからの頻繁なサービス入手により評判が減少する。結果、最終的に T_{free} , T_{rec} の入手サービス量はリスク部分のみとなる。ここで、 T_{pos} がリスク β を小さく設定することにより T_{free} に無償で与えてしまうサービス量をより減らすことが可能である。また、各ピアでブラックリストを用い、ただ乗りの振舞いをしていると考えられるピアを登録し、以降の取引を制限する仕組みを導入することにより、リスク部分を大きくとったとしても T_{free} を無視することが可能となる。

T_{rep} について、初期段階では多くのサービスを入手することが可能であったが、取引が進むにしたがい入手サービス量が減少する。これは、評判が高くなるにしたがって入手サービス量が増加するものの、偽サービスの提供を行う可能性により評判を維持し続けることが不可能となり、最終的な入手サービス量の減少につながると考えられる。

最後に、 T_{pos} では他種のピアと比較して多くのサービスを入手し続けることが可能であった。これは積極的に貢献し続けることにより、偽サービスの提供による評判減少を抑制することができたためと考えられる。つまり、システムから入手するサービス量の増加・維持には、常に積極的に貢献し続ける必要がある。

II. 悪意あるピアとの取引回数の推移

次に、本研究で提案した信頼の連鎖構造を用いた評判問合せにより、悪意のあるピアに対する取引を抑制することが可能であることを調査する。

デフォルトで与えた設定を利用して実験を行う。システムに参加しているピアの種類を T_{pos} , T_{mal} とする。その際、初期信頼ネットワークをランダムに与えるものの、全 T_{mal} における T_{pos} 間の評判値を 0, T_{mal} 間の評判値を 1 と設定する。また、 T_{pos} は自身が提供可能であるコンテンツの種類に制限があるものの、 T_{mal} は全コンテンツに対して提供を試みるものとする。このとき、システム中の T_{mal} の割合を 1% から 10% まで様々に変更し、 T_{pos} がコンテンツ要求を行うことを 500,000 回繰り返した際、 T_{pos} と T_{mal} 間における 5,000 回毎の取引回数を図 4 で示す。

図 4 より、初期状態では任意ピア間にランダムな信頼ネット

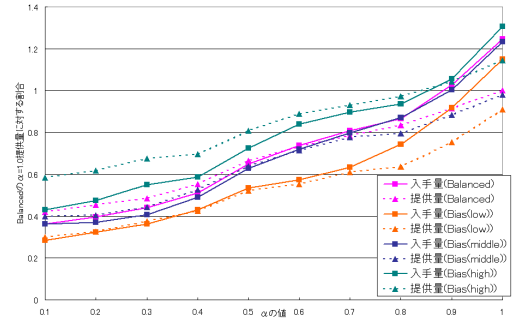


図 5 均等時における $\alpha=1$ 提供サービス量を基準とした 1 回あたりの入手・提供サービス量
Fig. 5 Obtaining/providing rate around once service based $\alpha=1$ providing rate (Baranced)

ワークを与えたため、全 T_{pos} は T_{mal} を認識することが不可能となる。そのため、 T_{mal} 間との取引回数が増加する。しかし、 T_{mal} がどれだけ存在したとしても、信頼の連鎖構造が徐々に確立されるにしたがい、 T_{mal} との取引回数は減少する。最終的に信頼の連鎖構造が完成すると、全 T_{pos} は T_{mal} 間との連鎖構造を持たないため、 T_{mal} との取引を行うことがなくなる。結果として、 T_{mal} をネットワークから締め出すことが可能となり、信頼の連鎖構造を用いた評判問合せは有効に動作することがわかる。

III. ピア振舞いパラメータの変更

次に、各ピアが設定するパラメータを変更し、同一タイプのピアが一律に振舞わない状況を考察する。ここで前節の実験を考慮し、ピアの種類を T_{pos} に限定して実験を行う。また、ピアの振舞いパラメータとして α , β , γ の 3 種が存在するが、ここではサービス提供量への大きな要因となる α に注目する。

(1) 式で与えた α 以外のパラメータにおいて、デフォルトで与えた設定を利用する。このとき、 α を設定するピアについて 0.1 から 1.0 まで 0.1 刻みに与え、均等に存在した場合や存在比率が偏っていた場合を考慮する。任意ピア間における 2,000,000 回の取引を行ったとき、均等時における $\alpha=1$ と設定したピアの提供サービス量を基準とした、 α の違いによる最終的な 1 回あたりの入手・提供サービス量比率を図 5 で示す。

図 5 より、システム中に存在する α の値を高く設定したピアの割合にしたがい、入手・提供サービス量ともに増加する。しかし、いずれの場合においても α の値を小さくするほど提供サービス量は減少する一方、同時に入手サービス量も減少する。また、 α のパラメータを大きくとるほど 1 回あたりの提供サービス量に対する入手サービス量の比率が大きくなる。つまり、振舞いパラメータの設定変更により提供サービス量を減少させ、より少ないサービス提供でより多くのサービス入手を試みたとしても、入手量が減少してしまい実現不可能となる。それゆえ、自身がシステムに貢献した量にしたがって入手できるサービス量に格差が生じることとなり、格差サービスが実現可能であるといえる。

IV. 途中で振舞いを変更した場合

本研究で提案した手法では、評判が高いピアほどサービスを

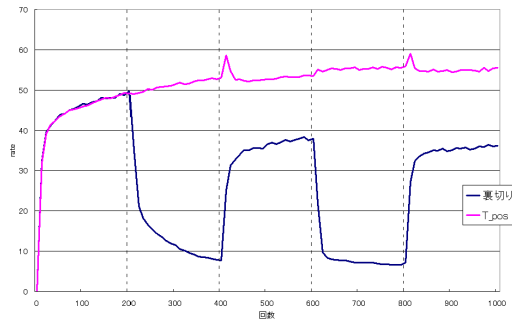


図 6 途中でただ乗りを行った際のサービス入手率
Fig. 6 Obtaining rate in process of changing freerider

多く入手可能となる。そのため、初期に評判を上昇させた高い評判を利用するただ乗りを行うことにより、より少ないサービス提供量でより多くのサービス入手を狙う可能性が考えられる。そこで、今までに手に入れた評判を基に途中で振舞いを変更する裏切り行為による影響を調査する。

T_{pos} な振舞いを行う 1,000 のピアがデフォルトで与えた設定を用いて取引を行う。そのうち、200 ピアはそれぞれの取引回数 200 回から 400 回、600 回から 800 回の間にただ乗りを行うものとする。このとき、 T_{pos} 、途中で振舞いを変更するピアそれぞれについて各種ピアの平均入手サービス量を図 6 で示す。

図 6 より、ただ乗りを行い始めた瞬間から対象ピアの入手サービス量は一気に減少する。また、サービス提供を再開することにより再び入手サービス量を増加することが可能となる。この結果は、ただ乗りを行うことにより対象ピアへの評判が一気に減少するものの、サービスを提供しだすことにより徐々に評判を回復していることが原因であると考えられる。つまり、より多くのサービスを入手し続けるためには、常に多くのサービスを提供し続ける必要があるということがわかる。

6. む す び

本研究では、P2P ネットワーク環境下における情報資源流通を行う上で重要な課題となるシステムに対する公平性、信頼性に焦点を当てた。これらシステムを考察する上で必要となるピアの振舞いモデルを提案し、システム中の振舞いに応じて得られるサービス量が変化する格差サービスを実現するため、システム提供サービス量、ピア間の多重の信頼構造を利用した評判に着目するシステム上に適用した。

そして、システム中における様々な振舞いを行うピアの存在によりシステムがどのように影響されるのか数学的モデル化、実験を行った。結果、ただ乗りピアは積極的にサービスを提供するピアがとるリスク部分しか得られず、ただ乗りピアをシステムから排除することが可能であった。また、悪意のあるピアとの取引は信頼の連鎖構造が確立されるにつれ減少することを明らかとした。さらに、システム中で積極的に貢献することのみがシステムからより多くのサービスを入手することを可能とし、格差サービスを実現することが可能であること、ピアが途中で振舞いを変更したとしても、そのピアに対する提供サービス量を高速、柔軟に調整することが可能であることを示した。

今後、さらなる動的なピアの振舞いを考慮することができるようモデルの拡張を必要とする。また、本研究で適用したコンテンツ流通システム以外においても提案した振舞いモデルによる性能評価が可能であるかを考察する必要がある。

文 献

- [1] E. Adar, and B. Huberman, "Free Riding on Gnutella," *First Monday*, vol. 5, no. 10, Oct. 2000.
- [2] D. Banerjee, S. Saha, S. Sen, and P. Dasgupta, "Reciprocal Resource Sharing in P2P Environments," *Proc. of the 4th Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, pp. 853-859, 2005.
- [3] C. Buragohain, D. Agrawal, and S. Suri, "A Game Theoretic Framework for Incentives in P2P Systems," *Proc. of the 3rd Int. IEEE Conf. on Peer-to-Peer Computing*, pp. 48-56, 2003.
- [4] M. Feldman, K. Lai, I. Stoica, and J. Chuang, "Robust Incentive Techniques for Peer-to-Peer Networks," *Proc. of the 5th ACM Conf. on Electronic Commerce*, pp. 102-111, 2004.
- [5] D. Geels, and J. Kubiawicz, "Replica Management Should Be A Game," *Proc. of the 10th Workshop on ACM SIGOPS European Workshop*, pp. 235-238, 2002.
- [6] R. Gupta, and A. Somani, "Game Theory As A Tool To Strategize As Well As Predict Node's Behavior In Peer-to-Peer Networks," *11th Int. Conf. on Parallel and Distributed Systems*, pp. 244-249, 2005.
- [7] 伊藤洋輔, 河野浩之, "信頼の連鎖機能を用いたピアコンテンツ流通システム," データベースと Web 情報システムに関するシンポジウム, pp. 133-140, 2005.
- [8] A. Josang, R. Ismail, and C. Boyd, "A Survey of Trust and Reputation Systems for Online Service Provision," *Decision Support Systems*, vol. 43, issue 2, pp. 618-644, Mar. 2007.
- [9] S. Kamvar, M. Schlosser, and H. Garcia-Molina, "The EigenTrust Algorithm for Reputation Management in P2P Networks," *Proc. of the 12th Int. Conf. on World Wide Web*, pp. 640-651, 2003.
- [10] Z. Liang, and W. Shi, "PET: A Personalized Trust Model with Reputation and Risk Evaluation for P2P Resource Sharing," *Proc. of the 38th Annual Hawaii Int. Conf. on System Sciences*, track 7, p. 201b, 2005.
- [11] R. Ma, S. Lee, J. Lui, and D. Yau, "A game theoretic approach to provide incentive and service differentiation in P2P networks," *Proc. of the Joint Int. Conf. on Measurement and Modeling of Computer Systems*, pp. 189-198, 2004.
- [12] B. Mortazavi, and G. Kesidis, "Model and simulation study of a peer-to-peer game with a reputation-based incentive mechanism," *Information Theory and Applications Workshop*, 2006.
- [13] K. Ranganathan, M. Ripeanu, A. Sarin, and I. Foster, "To Share or not to Share: An Analysis of Incentives to Contribute in Collaborative File Sharing Environments," *Int. Workshop on Economics of Peer-to-Peer Systems*, 2003.
- [14] J. Risson and T. Moors, "Survey of Research towards Robust Peer-to-Peer Networks: Search Methods," *Technical Report UNSW-EE-P2P-1-1*, University of New South Wales, Sydney, Australia, Sep. 2004.
- [15] K. Tamilmani, V. Pai, and A. Mohr, "SWIFT: A system with incentives for trading," *Proc. of the 2nd Workshop of Economics in Peer-to-Peer Systems*, 2004.
- [16] L. Xiong, and L. Liu, "PeerTrust: Supporting Reputation-Based Trust for Peer-to-Peer Electronic Communities," *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 16, no. 7, pp. 843-857, 2004.