

振る舞いモデルを用いた P2P システムにおける安定性の評価

M2006MM017 水野 雄輔

指導教員 河野 浩之

1 はじめに

現在、ピアツーピア (P2P) 技術が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、可用性が高いことで注目を浴び、研究が盛んに行われている。P2P モデルは各ピアに明確な区別がされず、自律分散型のネットワークである。そのため、個々のピアが、情報、ディスクスペース、ネットワーク帯域、CPU 時間といった資源を互いに提供しあうことにより、中央のサーバに依存することなく、高いスケラビリティを発揮するシステムとしてさまざまな利用法が期待されている。

しかし中央サーバの存在しないピア型 P2P システムのピアは、自己の目的を達成するために自立して振る舞うと予想される。ただ乗りを行うピアを含む悪意のあるピアが存在し、貢献者の数が減少しシステムの安定性を脅かす可能性がある。

現在、ピアの戦略的な振る舞いをゲーム理論などを用いてモデル化し、システム全体の性能を解析する研究がおこなわれている。合理的なピアは、周囲の環境の変化に敏感に反応し戦略的に振る舞いを変更するピアである。これら戦略的ピアが振る舞いの決定とシステム性能評価を繰り返すことで、貢献者の数が均衡状態に収束しシステム性能が定まる。このゲーム理論を用いて以上の P2P システムをモデル化することにより、システム全体として安定性を保ちながらシステム全体としての望ましい性質を満たすことができるかどうかを理論的に立証できる。

本研究では P2P システムにおけるただ乗りを含む悪意のあるピアの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振る舞いについてピアの参加離脱と各ピアの評判を用いたモデル化を行う。シミュレーション実験によってシステムの匿名性やピアの参加離脱の頻度などを変更しながら、様々な振る舞いを持つピアがシステムに混在した場合の安定性を評価する。

2 ピアの振る舞いに関する関連研究

P2P システムのネットワーク構造では、中央でピアの管理をする機構が存在しないため、すべてのピアは独立し自立して振る舞うことが予想される。現在、ピアをシステムに参加させるための手法として、取引後に他ピア評価しその情報を共有する評判モデルが用いられ、研究が盛んに行われている。Srivatsa ら [1] は、分散評判管理に有害な 3 つの脆弱さを確認し、現在の評判、評判歴史、評判変動に基づくピアの信頼性を測り悪意のあるノードの戦略的な振動に対処するため TrustGuard を提

案した。実験により、TrustGuard フレームワークが戦略的な振動をするふるまいを持つノードに有効に対処できることを示した。

Marti らは、ピアの評判に基づく資源選択技術の長所と不利を提示した。効率上限られた評判情報の共有の影響を評価し、P2P システムの分散に重みを与え、制限された評判共有が、失敗したトランザクションの数を 20 倍減らすことができること、また情報を小さなグループのノードと共有することによって、悪意ノードの悪影響をかなり軽減する単純な投票ベースの評判システムを示した。

伊藤洋輔らは、システム上のピアの各種振る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い、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る舞いを取り入れ、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減少させることを明らかにした。

また、ピアの振る舞いをゲーム理論などを用いて解析し、システムとしてどのような状態に収束するかを調査する研究が行われている。Feldman ら [2] は、P2P システムにおけるただ乗り現象を研究するためのモデルを開発した。合理的なピアのみで形成されるシステムを考慮し、自身の持つ資源をシステムに貢献させたいというユーザの意欲とシステムの現在の貢献コストによって振る舞いを決定させている。低い意欲のユーザを除く、またはサービスの低下とともにただ乗りピアを罰するメカニズムの効果を提示した。

Marti ら [3] は、買い手/売り手戦略に関して、過去の業務履歴についての知識がどのように両方の買い手と売り手戦略に影響を及ぼすかに注目した。協力、または離脱する買い手と売り手と業務の単純なゲームモデルを提案し、全てのピアに対する基本的な戦略に始まり、平衡が達されるまで戦略を改善させた。歴史重み付け計算を使った評判システムは、離脱させないことがより有効であることを示した。

また P2P システムの崩壊 (カストロフィ) の関連研究として、Flavio らは、壊滅的な損害を与えるインターネットウィルスを乗り切るために、分散処理システムを設計するための「informed replication」アプローチを提案した。いくつかの特徴がある複製の数と配置を決定するために、発見的教授法を開発、評価し 99 % 以上の確立でウィルスの攻撃に耐えることができることを示した。

3 システムのモデル化

本章では、システム中におけるピアの様々な振舞いに対しパラメータを用いてモデル化する。次に、各ピアの振舞いについての議論を行う。

3.1 ピアの振舞いのモデル化

P2P システムに参加し利益を得るためには、他のピアと接触して取引を行う必要があり、サービスの授受が行われる際にピアは対象が持つコンテンツや評判など様々なことを考慮したうえで取引を行うかを決定すると考えられる。ここで、ピア i がシステムに参加し、システムから利益を得ようと振る舞うことを考える。ピア i は時刻 t までに取引を行い、総取引回数 T_{all} で得た評価 U を管理する。また、戦略的な振る舞いの振動に対応するため、直近 T_{recent} 回の評価 R_{recent} を管理する。これらを踏まえ、3.1 式により、時刻 t におけるピア i の評価 $u_i(t)$ を与える。

$$u_i(t) = \alpha U_i(t) + \beta R_i(t) \quad (3.1)$$

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 はそれぞれ総評価、直近の評価に応じた係数である。なお先行研究では、ふるまいを変える悪意あるピアに対して、ピアの信頼値に現在の評判と過去の評判を考慮しており、本研究における時刻 t におけるピア i の評価 U の導出に取り入れている。

3.2 複数種の振る舞いをするピアを含むシステム

本研究では、様々な振る舞いを持つピアをシステムに混在させ、より現実的な P2P コンテンツ流通システムをシミュレートした上で性能を評価する。

合理的ピア システムに貢献するためのコストを考慮して合理的に振る舞うピアは、システムに貢献する意欲 t_i を持ちながらシステムに参加する。システムに貢献するためのコストはシステムに存在する貢献者の割合の逆数と仮定し、合理的ピアは貢献コストと t_i を比較して振る舞いを決定する。ある合理的ピアの t_i が貢献コストより大きい場合、他ピアにサービスを提供するよう積極的貢献ピアとして振る舞い、取引実績を増やしていく。逆に、ある合理的ピアの t_i が貢献コストより少ない場合、合理的ピアはただ乗りピアとして振る舞い、他ピアが望むサービスを提供しない結果となる。ピアに設定される貢献意欲の最大値を $MAXt_m$ とする。

積極的貢献ピア システムに貢献することにより常にサービスの入手を考え、他ピアの振る舞いに関係なく積極的にサービスを提供。

ただ乗りピア 他ピアからサービスを入手する一方、他ピアに対するサービス提供は行わない。

偽の評価をするピア 取引後、正当な評価をせず最も悪い評価を取引相手に与え、さらにただ乗りピアとして振る舞う。

途中で振る舞いを変更するピア 初期に評判を上昇さ

せ、高い評判を利用したただ乗りを行うことにより、システムへの貢献をできるだけ少なくしてより多くの利益を入手できるよう振る舞う。

4 ピア振舞いモデルを組み込むシステム

本章では、3 章で定義したピアの振舞いモデルを組み込む P2P システムについて述べる。

4.1 システム概要

本研究で提案したピア振舞いモデルを組み込むシステムについて概説する。図 1 において、ピアの取引、新規参入と離脱を含む安定性を保証するための P2P システムの概要を示す。ピアはシステムに参加している間、他ピアと取引を行い、その際、他ピアの評判履歴を見て取引を行うかどうか決定する。取引毎に、システム内のいくらかのピアは参加と脱退を行うものとして、ステータスを初期化させる。システム性能が導出されるまでの手

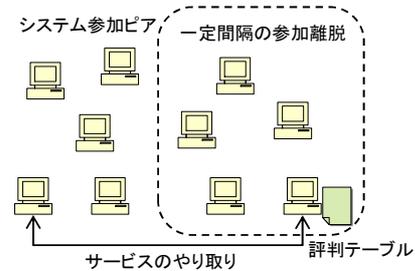


図 1 システム概要

順は以下のとおりである。

- STEP1. システム内のピア数及びピアの貢献意欲などのパラメータ初期設定。
- STEP2. STEP1 で設定されたピア数と合理的ピアの貢献意欲を元に振る舞いの、及び貢献コストの決定。
- STEP3. 2 ピアの取引。
- STEP4. 取引実績に応じたピアの除外。
- STEP5. 回転率に応じたピアのステータス初期化。
- STEP6. ピアの参加離脱とステータスを確認、貢献者割合、貢献コスト、システム性能の決定。指定取引回数まで STEP3~6 の繰り返し。
- STEP7. 終了。

4.2 回転率とアイデンティティ

3 章で、ただ乗りの振る舞いを妨害する評判による除外メカニズムを提案した。P2P システムによっては、匿名性の違いやユーザの参加離脱の頻度が異なる。よって、より動的な環境と動的な環境下における悪意ピアの振る舞いをシミュレートするために、本研究では以下の要素を含めたシミュレーションを行う。

回転率 d システム内のピアの参加離脱の頻度を表す。本研究のシミュレーションにおいては、2 ピアの取引毎に回転率に応じたピアのステータスの初期化が

行われる。

アイデンティティ アイデンティティは P2P システムの匿名性の高さを表す。本研究において、永久的なアイデンティティ (PI : Permanent Identity) の下ではピアが参加離脱を行っても取引履歴は永久的に残り、次のシステムへの参加に引き継がれる。自由なアイデンティティ (FI : Free Identity) の下ではピアが参加離脱の際の取引履歴の初期化は任意である。よって、システムに積極的に貢献するユーザは取引実績を初期化することはない。しかし低い実績を持った悪意のあるピアは参加離脱の旅にステータスを初期化すると予想される。

5 シミュレーション実験

本章では、前章で説明した合理的ピアの振る舞いを踏まえた、ピアの参加離脱を含むダイナミック (動的) なシステムをシミュレートする。取引実績に応じたペナルティメカニズムの適用により、ただ乗りピアをシステムから除外することが可能であることを示す。シミュレーション実験を行うにあたり、表 1 で示すデフォルト設定を用いシステム性能が定常化するまで取引を繰り返すものとする。

表 1 システムに関する設定

$MAXt_m$	貢献意欲の最大値	1~14(1.0 刻み)
	システム利益係数	3
	収穫逓減係数	1
d	回転率	0.01, 0.1, 0.5
	合計参加ピア数	1000

5.1 取引実績に応じたペナルティ

本研究で提案した除外メカニズムを用い、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を実験により確認する。システムには 1000 の合理的ピアを存在させ、各ピアの貢献意欲の最大値は 1~14 まで設定し、除外を適用しない自由市場モデルや様々な匿名性及び回転率のシステム性能をシミュレーションした結果を図 2 で示す。図 2 より永久的なアイデンティティの下で回転率が低い場合、システムは非常によく振る舞う。回転率が非常に低い ($d=0.05$) ので、除外メカニズムがただ乗りの振る舞いを妨害しホワイトウォッシュの影響があまり出ていないことが分かる。よって t_m の最大値 4~14 までシステムは非常によく振る舞う。回転率を上げると、悪意のあるピアは積極的に取引履歴を初期化するのでシステム性能は減少する。逆に、 $MAXt_m$ が低く回転率が高い ($d=0.5$) ならば、満足できる貢献レベルを得られない。自由なアイデンティティの元では、回転率が非常に低い場合多少システム性能は改善されるものの、自由市場モデルとほぼ同等の性能となった。これは新規に参入するピアへのペナルティが課されていないため、

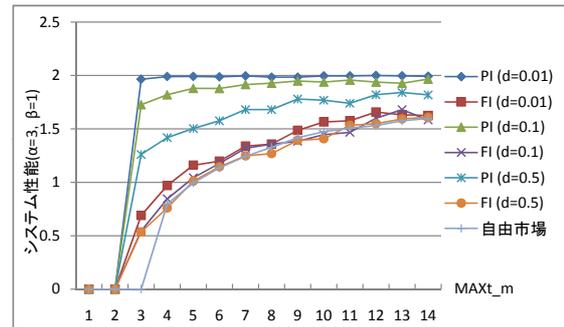


図 2 システム性能比較 (自由市場と除外メカニズム)

ただ乗りピアが積極的に参加離脱を繰り返した結果と考えられる。

5.2 合理的ピアと各種振る舞いピアが混在する場合

デフォルトで与えた設定を利用して実験を行う。前節では合理的ピアのみが存在するシステム性能を評価したが、本節では各種振る舞いピアをシステムに 30% 混在させた場合の性能をシミュレートする。ただ乗りピアを混在させたシステム性能を図 3、偽評価ピアを混在させたシステム性能を図 4 で示す。図 3 及び図 4 より、永

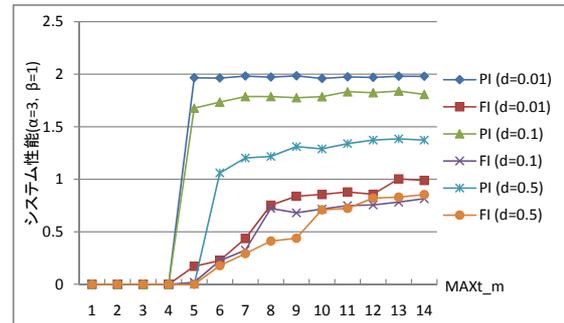


図 3 ただ乗りピアがシステムに与える影響

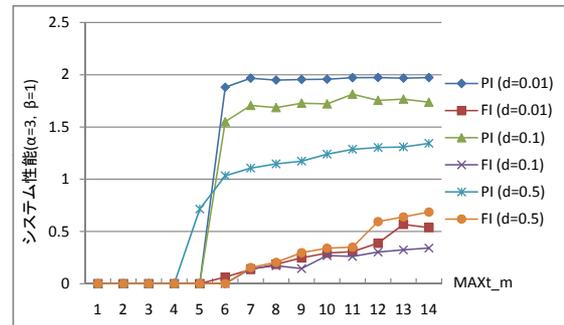


図 4 偽評価ピアがシステムに与える影響

久的なアイデンティティの下では偽評価ピアやただ乗りピアに対して除外が適用されシステム性能は高い水準を保っている。図 4 より偽評価ピアが存在するシステムにおいて、自由なアイデンティティの下では偽の評価により貢献を選択した合理的ピアが除外され、図 3 の実験結

果結果と比較し性能は大幅に減少する．前節の実験結果と比較すると，システムが安定するには $MAXt_m$ が 4 以上でなければならない．しかし， $MAXt_m$ が高ければ貢献者割合は低いもののシステム崩壊を回避できる．

5.3 複数のピアが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，システムに貢献するほど高い信頼値を維持することが可能となっている．そのため，初期に貢献し信頼値を上昇させ，高い実績を利用したただ乗りを行うことにより，サービス提供量をできるだけ少なくしてより多くのサービスを手に入れる可能性が考えられる．そこで，今までに得た実績を基に，途中で振る舞いを変更することによる影響を調査する．1000 の合理的ピアがデフォルトで与えた設定を用いて取引を行うものとする．そのうち，500 のピアはシステム内の合計取引回数が 20000 回から 40000 回の間にただ乗りを行うものとした際，貢献者割合に応じたシステム性能の変動は図 5 で示すグラフとなった．結果として図 5 よ

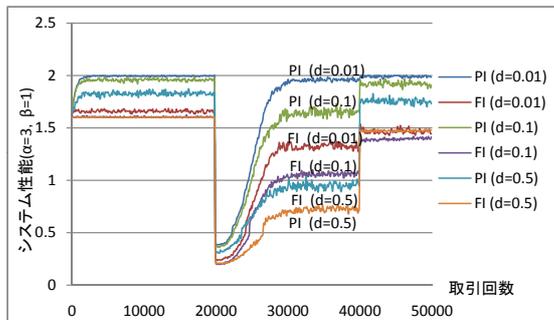


図 5 振舞い変更時のシステム性能の変化 ($MAXt_m=14$)

り，振る舞い変更初期の状態では振る舞い変更ピアに加え，合理的ピアのただ乗りによってシステム性能は大きく下がる．しかし，振る舞い変更ピアがただ乗りを行うにつれ，評判は大きく下がり結果としてシステムから除外される．永久的なアイデンティティの下で回転率が非常に低い場合，振る舞い変更ピアをほぼ除外し，システムは非常によく振舞う．今までの実験結果から，永久的なアイデンティティのシステム性能がすべての回転率において自由なアイデンティティのシステムを上回っていたが，図 5 では永久的なアイデンティティの下であっても回転率が高い場合，自由なアイデンティティの下で回転率が低い場合よりも性能が劣る結果となった．よって，複数ピアの共謀による振る舞い変更に対して高いシステム性能を維持し続けるためには，ピアの参加離脱が少ないシステムが有効といえる．

次に，異なるアイデンティティ間の回転率に応じたシステム性能を調査する．振る舞い変更ピアがただ乗りを行った後，取引回数 30000 ~ 40000 回のシステム性能の平均をとったグラフを図 6 で示す．図 6 より，極端に低い回転率では ID の有無にかかわらず同等のシステム性能を得られる．回転率が増すと自由なアイデンティティの下での性能は大きく下がり，永久的なアイデンティ

ティのシステム性能との差が開く結果となった．さらに回転率を上げると両者のシステム性能は低下し，異なるアイデンティティ間のシステム性能が近付いた．振る舞いを変更するピアがシステムに複数存在する場合，ピアの参加離脱が少ないほどアイデンティティの有無による性能差が大きくなることが確認された．

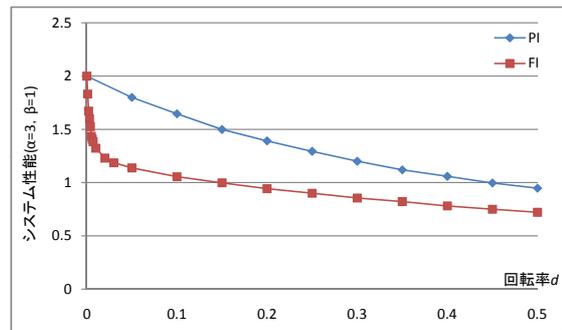


図 6 振る舞い変更対処時の回転率及び匿名性に応じた性能

6 むすび

本研究では，様々な目的をもったピアが混在する P2P コンテンツ共有システムの貢献者数と安定性に焦点を当てた．そして，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，個々のピアの振舞いに応じて，システムから悪意のあるピアと判断されたピアをシステムから除外するため取引実績に着目した．

シミュレーション実験により，ピアの参加離脱の頻度やシステムの匿名性など様々な環境のシステムを想定し，各種振る舞いピアが混在した場合の性能を示した．結果，永久的なアイデンティティのシステムにおいて悪意のあるピアを効率的に除外できることを示した．また，システムに振る舞いを変えるピアが複数存在した場合，ピアの回転率が低いほどシステム性能を迅速に回復できることを示した．

参考文献

- [1] Mudhakar Srivatsa, Li Xiong, Ling Liu : “Trust-Guard: Countering Vulnerabilities in Reputation Management for Decentralized Overlay Networks”, Proc. of the 14th International Conference on World Wide Web, New York, pp. 422-431, 2005.
- [2] Michal Feldman, Christos Papadimitriou, John Chuang, Ion Stoica : “Free-Riding and Whitewashing in Peer-to-Peer Systems”, Proc. of ACM SIGCOMM Workshop on Practice and Theory of Incentives in Networked Systems, pp. 228-236, 2004.
- [3] Sergio Marti, Hector Garcia-Molina : “Quantifying Agent Strategies Under Reputation”, Proc. of the Fifth IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing, pp. 97-105, 2005.