

評価者間類似度計算の改善による 汚染コンテンツダウンロード抑制効果向上

山中 広明^{†1} 岡村 真吾^{†2} 藤原 融^{†1}
吉田 真紀^{†1} 石原 靖哲^{†1} 秋山 豊和^{†3}
加藤 精一^{†4} 下條 真司^{†5}

P2P コンテンツ共有において、汚染コンテンツのダウンロードを抑制するため、評判システムを適用することが考えられている。評判システムでは、コンテンツをダウンロードしたピアがその提供者に評価値をつけ、各ピアの評価値から信頼度値を計算し、それを基に提供ピアを選択する。不正評価者の割合が小さいときは、既存手法の中でも相加重平均等の単純な信頼度値計算法の抑制効果が最も高い。一方、不正評価者の割合が大きいときは、共通の被評価者に対する評価値の類似度（評価者間類似度）による計算法の効果が最も高い。P2P システムでは、ピアの参加が自由で、不正評価者の割合の変動が大きいことがあるため、その予想は困難である。そこで、本論文では、不正評価者の割合にかかわらず高い抑制効果を得る計算法を提案する。提案手法では、まず、共通の被評価者が存在しないピア間についても評価者間類似度を求め、評価者間類似度による信頼度値を計算できる場合を拡大する。それでも計算できないピアの信頼度値は相加重平均で計算する。シミュレーションの結果、不正評価者の割合15%以下では相加重平均と同じ抑制効果が得られ、50%以下では評価者間類似度による計算法より高い効果が得られた。

Refinements of Raters' Similarity Computation for Prevention of Downloading Polluted Contents

HIROAKI YAMANAKA,^{†1} SHINGO OKAMURA,^{†2}
TORU FUJIWARA,^{†1} MAKI YOSHIDA,^{†1}
YASUNORI ISHIHARA,^{†1} TOYOKAZU AKIYAMA,^{†3}
SEIICHI X. KATO^{†4} and SHINJI SHIMOJO^{†5}

In Peer-to-Peer (P2P) contents sharing, reputation system is applied to prevent downloading polluted (inauthentic) contents. In the system, peers rate

each other in respect of providing contents, and their trust values are computed and used to select contents providers. When the ratio of dishonest raters to all the raters is low, a simple trust value computation such as arithmetic average is most effective. On the other hand, when the ratio is high, trust value computations based on raters' similarity perform better. The portion of dishonest raters is unpredictable due to the open and anonymous nature of P2P. In this paper, we propose a method for computing trust values with high performance regardless of the ratio. The proposed method tries to compute similarities between raters even when they have no common rates. When it fails, the arithmetic average is used. By simulations, the proposed method provides the prevention effect as high as the arithmetic average when the ratio is less than 15% and higher than that of raters' similarity-based trust value computation when the ratio is less than 50%.

1. はじめに

近年、ピアどうしてコンテンツ共有を行う P2P コンテンツ共有の研究開発がさかんである。P2P システムでは誰でもピアとしての参加が容易な場合が多く、また、ウィルスが混入されたり、改変されたりしたコンテンツを提供しようとする悪意のあるピアの存在が想定される。このようなコンテンツは汚染コンテンツと呼ばれ、そのダウンロードを回避するため、評判システム (reputation system) を適用することが考えられている^{1)–7)}。評判システムでは、ピアはコンテンツ提供者であると同時に、コンテンツを入手して他の提供者を評価する評価者としての側面も持ち、ダウンロードしたコンテンツが汚染コンテンツか否かに基づき、提供したピアに対する評価を行い (評価値をつけ)、その結果を公表する。以降のコンテンツ授受においては、あるコンテンツをダウンロードしようとするピアが、それを提供できる各ピアについて、そのピアがそれまでに受けた評価値から当該ピアの信頼度値を計算する。そして、それらの信頼度値を基に提供を要求するピアを選択することにより、

^{†1} 大阪大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

^{†2} 奈良工業高等専門学校情報工学科

Information Engineering, Nara National College of Technology

^{†3} 京都産業大学コンピュータ理工学部

Faculty of Computer Science and Engineering, Kyoto Sangyo University

^{†4} 兵庫医療大学

Hyogo University of Health Sciences

^{†5} 情報通信研究機構

National Institute of Information and Communications Technology

汚染コンテンツをダウンロードする可能性を小さくする．

P2P システムではピアとしての参加が容易なため、汚染コンテンツのダウンロード抑制効果を低下させようとするピア（不正評価者）が存在し、虚偽や不公平な評価を行うことでピアの信頼度値の信憑性を低下させることが考えられる．また、不正評価者の全体に占める割合の変動は大きいと考えられる．そのため、不正評価者の割合によらず高い汚染コンテンツダウンロード抑制効果の得られる信頼度値計算法が必要である．

既存手法による汚染コンテンツダウンロード抑制効果を比較すると、不正評価者の割合が小さいときは相加平均等^{3),8)}の単純な信頼度値計算法の効果が高い．逆に、割合が大きいときは自ピアと他ピアとの共通の被評価者に対する評価値の類似度（評価者間類似度）を用いる信頼度値計算法^{1),2)}の効果が高い．不正評価者の割合が大きいときには、相加平均の効果は低下する．一方、評価者間類似度を用いる計算法による信頼度値の信憑性への不正評価者の割合の影響は小さい．しかし、自ピアがシステムに参加した直後などで、他ピアとの共通の被評価者があまり存在しない場合には、評価者間類似度と信頼度値を計算できないので、ピアをランダムに選択せざるをえない．このため、汚染コンテンツダウンロード抑制効果が十分に得られず、不正評価者の割合が小さいときには汚染コンテンツダウンロード抑制効果が相加平均等より劣る．

本論文では、不正評価者の割合にかかわらず高い汚染コンテンツダウンロード抑制効果を得るため、評価者間類似度による信頼度値計算の拡張を提案する．提案手法では、まず、共通の被評価者が存在するピアの連鎖を用い、共通の被評価者が存在しないピア間の評価者間類似度を求め、より多くのピアの信頼度値を計算する．それでも信頼度値を計算できたピアが少なく、正当コンテンツを提供するピアの選択には不十分な場合、計算できていないピアについて、不正評価者と判断できるピアによる評価値を排除したうえで、相加平均により信頼度値を計算する．そして、コンテンツ授受を想定したシミュレーションを行い、不正評価者の割合にかかわらず、提案手法により高い汚染コンテンツダウンロード抑制効果が得られることを確認する．

以下、2章では想定する評判システムを適用した P2P コンテンツ共有システムについて述べる．3章で関連研究についてまとめ、提案手法の設計方針を述べる．次に、4章で提案手法を説明する．5章でシミュレーションによる性能評価を行い、考察を述べる．最後に、6章でまとめと今後の課題を述べる．

表 1 本論文で用いる主な記号

Table 1 Significant symbols in this paper.

P	すべてのピアの集合
C	授受する正当コンテンツの集合
P_c	コンテンツ c の提供候補ピアの集合
rt_{jx}	ピア j による x に対する評価値
tv_{ix}	ピア i が計算したピア x の信頼度値
wt_{ij}	ピア i が信頼度値計算時に用いる rt_{jx} の重み

2. コンテンツ授受の定式化

本章では、評判システムとそれを用いたコンテンツ授受の定式化を行う．なお、本論文で用いる主な記号を表 1 にまとめておく．

すべてのピアの集合を P とし、ピアが授受するすべての正当コンテンツの集合を C とする．一般に、 P や C は時刻とともに変化するが、ここでは簡単のため一定であるものとする． C に属する各コンテンツは P 中の少なくとも 1 つのピアが保持しており、他ピアから提供要求を受けたとき提供するものとする．また、一部のピアは、 C のいくつかのコンテンツに対応する汚染コンテンツ（ウイルスが混入されたり、偽物に差し替えられたりしたコンテンツ）を保持しているものとし、他ピアから提供要求を受けたとき提供するものとする．これらの汚染コンテンツは C に属さない．任意のピアは、自ピアがダウンロードしたコンテンツが C に属するか否か、すなわち正当コンテンツであるか汚染コンテンツであるか、即座に判定できるものとする．

一般に P2P システムで用いられる評判システムは、 P に属するすべてのピアによって構成され、以下のように評価値の管理、公表、および信頼度値計算の機能を持っている．

- 任意の $j, x \in P$ について、ピア j のピア x に対する評価値 rt_{jx} が定義され、 $\{rt_{jx} : j, x \in P\}$ を P に属するピアが分担して管理、公表しているものとする．また、任意のピア j は rt_{jx} を計算するための情報 inf_j を保持しているものとする．保持する情報 inf_j から、 rt_{jx} を計算するための関数 g が定義されており、 $rt_{jx} = g(x, inf_j)$ で計算する．この rt_{jx} は、ピア j が、 rt_{jx} の管理、公表を担当するピアに登録するものであるが、ピア j が不正評価者の場合、定義に従って計算されたものを登録するとは限らない．ただし、登録時には登録者が電子署名を付加しており、評価値の管理、公表は信頼できるものとする．
- 行列 M_{rt} を $M_{rt} = (rt_{jx})$ と定義する． M_{rt} を用いて任意のピア i が他のピア x の信頼

度値を求める関数が定義されている．この関数を f とするとき， $tv_{ix} = f(i, x, M_{rt})$ が，ピア i にとってのピア x の信頼度値となる．なお，信頼度値は実数値であり， $tv_{ix} < tv_{ix'}$ であるとき，ピア x' の方がピア x より信頼できると考える．

rt_{jx} の例としては，ピア j がピア x からダウンロードしたコンテンツに占める正当コンテンツの割合が考えられる．この場合，ピア j がピア x からダウンロードした総コンテンツ数や正当コンテンツ数が inf_j に含まれる．なお，ピア x からコンテンツをダウンロードしたことがなければ， rt_{jx} はある値 rt_{init} として，管理，公表されるものとする．

さて，このような評判システムを用いたコンテンツ共有システムにおいて，ピア $i \in P$ があるコンテンツ $c \in C$ を入手しようとするとき，以下のように動作する．

- (i) ピア i は，コンテンツ c を提供できるピアを知るための問合せを何らかの方法で行い，その結果として c を提供できると応答したピアを得る．応答したピアから，ピア i が過去にコンテンツ c を要求したときに汚染コンテンツを提供したピアを除外したピアの集合を $P_c (\subseteq P)$ とする．
- (ii) ピア i は，ピア $x \in P_c$ の信頼度値 tv_{ix} を計算し，信頼度値が最大のピア $x_0 \in P_c$ をダウンロード先ピアとして選択する．ただし，信頼度値が最大のピアが複数存在する場合，ランダム選択など適当な方法で 1 つ選択する．そして，選択したピアにコンテンツ提供を要求し，ダウンロードする．
- (iii) ピア i は選択したピア x_0 からダウンロードしたコンテンツが正当コンテンツか否かの判定結果により， inf_i を更新する．また，すべてのピア $x \in P$ について， $rt_{ix} = g(x, inf_i)$ により， rt_{ix} を求め，管理，公表を担当するピアにそれを登録することで，評価値を更新する．

以上の (i)–(iii) を各ピアが繰り返すことで，コンテンツ授受を行う．既存研究^{1)–7)} のいずれもこの定式化に含まれる．なお，(i) のコンテンツ提供ピアの問合せは，実際にはピアによって形成された論理的なネットワークであるオーバーレイネットワーク上で，ブロードキャストによるフラディングや，Chord⁹⁾ をはじめとする DHT (Distributed Hash Table) に基づくアルゴリズムなどにより処理される．これらは，いずれも問合せ元ピアとその他ピアが協調して問合せを処理する．一般には，処理を担当するピアの不正や故障，ネットワーク障害，あるいは問合せ処理自体の問題により， P 中に少なくとも 1 つ存在する正当コンテンツを提供するピアを 1 つも発見できないことがあるが，本論文では簡単のため，そのような状況は扱わない．したがって，(i) で応答するピアのうち，少なくとも 1 つは正当コンテンツ提供ピアとする．

3. コンテンツ共有システムの設計

2 章での定式化に基づけば，コンテンツ共有システムの設計は，関数 f ， g ，および inf_i の設計になる．このうち，特に重要なのが信頼度値計算法 f の設計である．本論文では，前述のように不正評価者の割合に関係なく，高い汚染コンテンツダウンロード抑制効果を得ることを目的として，信頼度値計算法 f を設計することを考える．

3.1 性能評価指標

信頼度値計算法 f を設計するには，P2P コンテンツ共有システムの性能評価指標を定める必要がある．ここでは，汚染コンテンツのダウンロード抑制を目的としているため，その効果を表す指標を考える．たとえば，PeerTrust PSM¹⁾ では，ピアの理想とする信頼度値と計算された信頼度値の誤差による性能評価を行っているが，これでは汚染コンテンツのダウンロード抑制効果が直接は分からない．抑制効果を表している指標としては，全ピアの汚染コンテンツをダウンロードした回数の割合⁴⁾ や，ピアのダウンロードした汚染コンテンツ数³⁾ などがある．なお，文献 4) では，ある程度の回数コンテンツ授受を行い，信頼度値が収束した時点でその割合を計測している．また，文献 3) では，すべてのピアが同じ回数行ったコンテンツ授受での汚染コンテンツダウンロード数を計測している．しかし，P2P コンテンツ共有のアプリケーションが用いられる状況を考えると，通常，それぞれのピアにダウンロードしようとするコンテンツがいくつかあり，それらのコンテンツについてのみダウンロードを試みるのが自然であると考えられる．したがって，ダウンロードしようとするコンテンツ数もピアにより異なりうる．既存研究においてはこの点が考慮されていない．

本論文では，正当なピアは，入手予定としているいくつかの正当コンテンツすべてのダウンロードが完了するまで，コンテンツ授受を繰り返すものとする．そして，各ピアのコンテンツ授受終了時におけるダウンロードした汚染コンテンツ数のダウンロードした正当コンテンツ数 (= 入手予定コンテンツ数) に対する比率を，汚染コンテンツのダウンロード抑制効果の指標として用いる．この比率は，ピアが正当コンテンツ 1 つを入手するのに要する汚染コンテンツの平均的なダウンロード数と考えられるので，汚染コンテンツダウンロード率と呼ぶ．なお，汚染コンテンツダウンロード率はピアごとに計算するが，すべての正当なピアについての平均値により，評判システムの性能評価を行う．この平均値を単純平均汚染コンテンツダウンロード率と呼ぶ．この値が小さいほど，評判システムによる汚染コンテンツダウンロード抑制効果が高いと判断する．

3.2 関連研究における信頼度値計算法の設計方針

既存研究^{1)–8),10)–13)}における信頼度値計算法では、特に評価値の正当性推定に着目し、その推定に基づき評価を重み付けしている。また、特に、文献 1)–7), 10), 11), 13) では、ある確率で、ピアが汚染コンテンツ提供や不正評価を行うことを想定している。ピア i による信頼度値計算における、ピア $j \in P$ による評価値 rt_{jx} ($x \in P$) の重みを wt_{ij} とする。 $|P|$ 次元ベクトル \mathbf{w}_i を

$$\mathbf{w}_i = (wt_{i1}, wt_{i2}, \dots, wt_{i|P|})$$

と定義する。なお、本研究では、既存研究^{1)–8),10),13)}と同様、 tw_{ix} ($x \in P$) 計算時の rt_{jx} ($j, x \in P$) の重みは、信頼度値計算者 i と評価者 j のみに依存して決めるため、 wt_{ij} で表している。しかし、文献 11), 12) のように、両者に加え、信頼度値計算対象者 x に依存する場合がある。

既存研究のうち、文献 1)–8), 10), 12), 13) では、 M_{rt} から \mathbf{w}_i を求める関数 $f'(i, M_{rt}) = \mathbf{w}_i$ が定義されている。そして、 \mathbf{w}_i と M_{rt} から信頼度値を求める関数を $f''(\mathbf{w}_i, M_{rt}) = (tw_{i1}, \dots, tw_{i|P|})$ とする。ただし、実際には $x \in P_c$ についてだけ tw_{ix} を求めれば十分である。 f'' の例としては、加重平均により求める方法^{1),12)} や、重みと評価値の積の最大値を求める方法⁶⁾ など、様々ある。なお、文献 11) では、ピア x の信頼度値計算時、ピア x からコンテンツをダウンロードしたピアが正当コンテンツと判定した回数、および汚染コンテンツと判定した回数の 2 つの値を参照している。この場合、これらの値が inf_j ($j \in P$) に含まれると考え、 inf_j も f'' の入力に含めればよい。

以降では、既存研究において特に f' (重みの決め方) がどのように設計されているか述べる。なお、文献 8) は一般的な P2P リソース共有、文献 10)–13) はマルチエージェントシステムを対象としているが、信頼度値計算法そのものは、P2P コンテンツ共有に容易に適用可能である。

不正評価排除を行わない信頼度値計算法 STEP³⁾ や文献 8) では、ピアの信頼度値を当該ピアに対する評価値の和や相加平均によって計算するため、すべての評価値は平等に扱われる。したがって、任意の要素が 1 である $|P|$ 次元ベクトルが \mathbf{w}_i ($i \in P$) となる。この場合、不正評価への対策は施されておらず、不正評価者の割合が大きい場合、計算される信頼度値の信憑性は著しく低下する。

評価値に対する統計的分析を行う不正評価排除手法 文献 11) では、ピア x に対する評価値の正当性を考える際、ピア x からダウンロードしたコンテンツを正当コンテンツ、汚染コンテンツと判定した両回数をパラメータとするベータ分布の期待値を用いる。両回

数はそれぞれ、ピア x からダウンロードしたすべてのピアが行った判定での合計である。期待値とピア j の x に対する評価値が大きく離れている場合、 j による評価を不正と見なして排除したうえで、信頼度値を計算する。したがって、ピア j の評価が正当と見なされた場合、それに対する重みは 1、そうでない場合は 0 である。また、文献 12) では、ある評価者による評価値と他評価者による評価値のカイ二乗検定によって、信頼度値計算時の当該評価者による評価値の重みを求める。これらの場合、 rt_{jx} の重みは、ピア j を含むピア x の全評価者による評価値の分布に大きく依存し、文献 3), 8) と同様、不正評価者の割合が大きい場合、計算される信頼度値の信憑性は低下する¹⁴⁾。

提供者としての信頼性を評価者としての正当性と見なす手法 EigenTrust⁴⁾ では、評価者としての正当性がコンテンツ提供者としての信頼性と一致することを前提としている。最初は全評価者の評価値を同じ重みで扱い、信頼度値を計算するが、その後の更新においてはその時点の信頼度値が大きいピアによる評価値ほど大きく重み付けされる。文献 5), 6), 10), 13) などにおいても、同様の前提を用いて信頼度値計算を行っている。しかし、評価者としての正当性とコンテンツ提供者としての正当性が一致しない状況も考えられ、この場合、適切な評価値の正当性推定が行えない。たとえば、正当コンテンツを提供しながら不正評価を行うピアが存在した場合、そのピアによる評価値が不正評価であるにもかかわらず、大きく重み付けされるため、信頼度値の信憑性が低下する¹⁴⁾。

評価者間で評価値について評価を行う手法 文献 7) では、コンテンツ提供者に対する評価について、評価者同士で評価 (評価者間評価) を行う。そして、評価者間評価値の和によってピアの評価者としての正当性を示す値が算出される。この場合、 wt_{ij} として、 rt_{jx} に対する評価者間評価値の和が与えられている。しかし、単純な和により重みが計算されるため、評価者間評価における不正評価が考慮されていない。不正評価者が、評価者間評価においても不正評価を行えば、文献 3), 8) 同様、不正評価者の割合が大きい場合、信頼度値の信憑性は低下するものと考えられる。

評価者間類似度を用いる手法 PeerTrust PSM¹⁾ や P2PRep²⁾ では、自ピアを最たる正当評価者として、他評価者の評価値の正当性は自ピアと他評価者の共通の被評価者に対する評価値の類似度 (評価者間類似度) によって推定する。そして、信頼度値計算において、自ピアとある他評価者の評価者間類似度は、その他評価者による評価値の重み付けに用いられる。したがって、ピア i と j の評価者間類似度が wt_{ij} として与えられている。

評価者間類似度を用いる手法^{1),2)}では、自ピアによる評価値を他ピアによる評価値の正当性推定の基準とするので、他ピアが正当コンテンツ提供者であるか否かは無関係である。そのため、提供者としての信頼性と評価者としての正当性が一致することを前提とする手法^{4)-6),10),13)}のように、それらの不一致が原因で性能が低下することはない。また、評価値に対する統計的分析を行う手法^{11),12)}のように、評価値の正当性推定において不正評価者の全体に占める割合に影響を受けない。ただし、ピアがシステムに参加した直後などで他ピアとの共通の被評価者が存在しない場合には、評価者間類似度が計算できず、信頼度値も計算できない。そのような場合には、ダウンロード先ピアをランダムに選択せざるをえなくなる。一方、相加平均等^{3),8)}は、共通の被評価者の有無にかかわらず信頼度値を計算できる。さらに、相加平均のように全評価者を平等に扱う前提の信頼度値計算法は、不正評価者の割合が大きい場合には信頼度値の信憑性が低い、不正評価者の割合が3分の1以下程度では信頼度値の信憑性が高い¹³⁾。したがって、既存手法による汚染コンテンツダウンロード抑制効果を比較した場合、不正評価者の割合が小さければ相加平均等が最も高く、不正評価者の割合が大きければ評価者間類似度による信頼度値計算が最も高い。

なお、評価者間類似度を用いる手法では、信頼度値計算対象のピアに対する評価値以外にも、その評価者と自ピアとの評価者間類似度を求める。そのため、共通の被評価者に対する評価値も入手する必要があり、信頼度値計算を自ピアで行うための通信量は大きくなると考えられる。したがって、ピアが過去に用いた M_{rt} の一部や、評価者間類似度を保持しておく、再利用する¹⁾など、運用には工夫の余地があるが、本論文ではこの問題は扱わない。

3.3 提案手法の設計方針

本論文では既存研究^{1)-7),10),11),13)}同様、ピアの振舞いとして、ある確率で汚染コンテンツ提供や不正評価を行うことを想定する。そこで、信頼度値の計算に用いる評価値 rt_{jx} は、「評価者 j の観測に基づく、被評価者 x が正当コンテンツを提供する確率」となるように、関数 g を定義するのが良い方法の1つと考えられる。

不正評価者の割合にかかわらず高い汚染コンテンツダウンロード抑制効果を得るため、評価値の重みは不正評価者の割合の影響を受けないことが望ましい。したがって、3.2節より、評価者間類似度を用いるのが有効である。また、ある確率で不正評価を行うピアを想定するので、評価者間類似度は、2評価者間の共通の被評価者に対する評価値が一致する確率を近似した値とするのが良いと考えられる。

提案手法では、まず、共通の被評価者が存在しない場合に信頼度値が計算できない問題を改善するため、共通の被評価者が存在するピアの連鎖を用い、共通の被評価者が存在しない

ピア間の評価者間類似度を計算する(4.1節参照)。そして、計算された信頼度値が、正当コンテンツ提供ピアの選択に有効かどうか判定する(4.2節参照)。有効と判定された場合には、信頼度値が最大のピアを選択する。そうでない場合には、不正評価者と判断できるピアによる評価値を排除したうえで、評価者間類似度を用いて信頼度値が計算できなかったピアの信頼度値を相加平均で計算し、それに基づきピアを選択する(4.3節参照)。提案手法ではピアのシステム参加直後、相加平均で計算した信頼度値が、ピアの選択に用いられることがある。不正評価者の割合が3分の1を超えている場合、信頼度値の信憑性が低くなり、汚染コンテンツのダウンロード抑制効果が低下する懸念がある。しかし、間接的評価者間類似度を用いることより、相加平均による信頼度値を用いられる回数はあまり多ならず、提案手法に対する著しい性能低下は回避できるものと考えられる。

以上の方針に基づき、ピアの信頼度値を求め、コンテンツ提供を要求するピアを選択する。

4. 提案手法

4.1 評価者間類似度と信頼度値の計算

ピア i が P_c に属するピア x の信頼度値 tv_{ix} を求める場合、まずピア $j \in P$ による評価値の重み wt_{ij} を演算 f' により計算する。そして、重み wt_{ij} とピア j によるピア x の評価値 rt_{jx} から、信頼度値 tv_{ix} を演算 f'' により計算する。

2章で述べたように、ピア j がピア x の評価値を登録していないとき、評価値 rt_{jx} は、ある値 rt_{init} として管理、公表される。ここでは、 rt_{init} を g の値域外とすることで、 j が x の評価値を登録しているかどうか判定できるものとする。以降、ピア j がピア x の評価値を登録しているとき、 j を x の評価者と呼び、ピア x の評価者集合を $R_x = \{j \in P : rt_{jx} \neq rt_{init}\}$ で表す。また、ピア ij 間の共通の被評価者集合を $CR_{ij} = \{x \in P : i, j \in R_x\}$ とする。ピア ij 間の共通の被評価者に対する評価値を基に計算される、 i と j の評価者間類似度を sim_{ij} とする。以降、共通の被評価者が存在するピア間の評価者間類似度を、特に直接的評価者間類似度と呼ぶ。直接的評価者間類似度 sim_{ij} ($i, j \in P$) は $CR_{ij} \neq \emptyset$ の場合だけ定義され、2評価者の評価値が一致する確率となるように定義されるものとする。もちろん、正確な確率を計算するのは困難であり、 M_{rt} を用いて適当な方法で推定するものとするが、ここでは、直接的評価者間類似度の具体的な定義は与えない。なお、定義の例は、5章において式(6)で示す。

以下では、まず、重み wt_{ij} の求め方を述べ、次に f'' の定義を与える。重みの計算では、パラメータ γ と μ が与えられる。 $\gamma (\geq 1)$ は、直接的評価者間類似度を重みとして用いる

評価値を決めるパラメータである．共通の被評価者数が γ 以上の他ピアによる評価値の重みには，直接的評価者間類似度を用いる． μ (≥ 1) は， γ を満たさなかった他評価者による評価値の重みを求める際に用いる直接的評価者間類似度計算時の，共通の被評価者数の下限を調整するパラメータとする． γ や μ を大きくするほど，正確な値の重みが得られる場合が増すと考えられる．重み wt_{ij} は， $|CR_{ij}| \geq \gamma$ の場合，

$$wt_{ij} = sim_{ij} \quad (|CR_{ij}| \geq \gamma) \quad (1)$$

とする．次に， $|CR_{ij}| < \gamma$ の場合について述べる． $|CR_{ik}| \geq \mu$ かつ $|CR_{kj}| \geq \mu$ を満たすピア k がちょうど 1 つ存在する場合， sim_{ik} と sim_{kj} から wt_{ij} が計算される． sim_{ik} と sim_{kj} は，それぞれ ik 間， kj 間で評価値が一致する確率であり，それらが独立であると考えることができれば， $sim_{ij} \geq sim_{ik} * sim_{kj}$ が成り立つ．そのため， $wt_{ij} = sim_{ik} * sim_{kj}$ とする．ここで，頂点集合が P で， $|CR_{ik}| \geq \mu$ なるピア ik 間に辺が存在するグラフを考える．辺 ik の重みは sim_{ik} とする．上述の場合，ピア ij 間のパス $i \rightarrow k \rightarrow j$ について，パス上の辺の重みの積を求めることで，ピア i と j の評価値が一致する確率の下界を求めている．このパスの距離は 2 であるが，必ずしもピア間に距離が 2 であるパスが存在するとは限らない．そこで，2 以上の距離についても考える必要がある．ただし，距離が大きくなるほど，下界との差が大きくなる．そこで，ピア間の評価者間類似度は，その最短距離が一定以下の場合に，パス上の辺の重みの積により求めればよいと考えられる．また，最短距離のパスが複数存在する場合，求めた積の平均値により計算することにする．以上より，最短距離の上限 d_{\max} に対して， ij 間の最短距離 d_{ij} が d_{\max} 以下のとき， sim'_{ij} を次式により求める．

$$sim'_{ij} = \begin{cases} \frac{\sum_{p \in SP_{ij}} \prod_{e=0}^{d_{ij}-1} sim_{p_e p_{e+1}}}{|SP_{ij}|} & (SP_{ij} \neq \emptyset) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

ただし， SP_{ij} は距離 d_{ij} のパス $p = (p_0 = i, \dots, p_{d_{ij}} = j)$ の集合である．そして， $|CR_{ij}| < \gamma$ なるピア i とピア j について，

$$wt_{ij} = sim'_{ij} \quad (|CR_{ij}| < \gamma) \quad (2)$$

とする．以降， sim'_{ij} をピア i とピア j の間接的評価者間類似度と呼ぶ．

本提案手法における演算 f'' では，評価値の加重平均により信頼度値を求める．ピア $x \in P_c$

の信頼度値 tv_{ix} は，評価者 $j \in R_x$ による x の評価値 rt_{jx} とその重み wt_{ij} 用い，次式 (3) のように求める．

$$tv_{ix} = f''(\mathbf{w}_i, M_{rt}) = \begin{cases} \frac{\sum_{j \in R_x} wt_{ij} rt_{jx}}{\sum_{j' \in R_x} wt_{ij'}} & (\sum_{j' \in R_x} wt_{ij'} \neq 0) \\ \text{未定義} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3)$$

なお，これは一般的な計算法の 1 つである．3.3 節で述べた g の設計方針より， rt_{jx} ($j \in R_x$) の加重平均により求めた tv_{ix} は，ピア x が正当コンテンツを提供する確率を反映した値と考えられる．

4.2 信頼度値の有効性判定

式 (3) によって計算された P_c に属するピアの信頼度値が，正当コンテンツを提供するピアを選択するのに有効であるかどうか判定する．信頼度値 tv_{ix} が未定義でない場合，ピア x が正当コンテンツを提供する確率を反映していると考えられる．そのため， P_c 中のピアの信頼度値がいずれも十分に大きくない場合，信頼度値が最大のピアをコンテンツダウンロード先とするのは得策ではない．そこで，閾値 λ に対し， $tv_{ix} > \lambda$ なるピア x が P_c 中に 1 つ以上存在するとき，有効な信頼度値が得られていると判定する．そうでなければ，有効な信頼度値は得られていないと判定する．

4.3 ピアの選択

4.1 節で求めた信頼度値と，4.2 節での有効性判定に基づき，コンテンツ提供を要求するピアを選択する．まず，4.2 節において，有効な信頼度値が得られていると判定された場合， P_c 中で信頼度値が最大の 1 ピアを選択する．

一方，有効な信頼度値が得られていないと判定された場合，別の方法でピアの信頼度値を定めることを考える．4.2 節での有効性判定において， $tv_{ix} \leq \lambda$ なるピア x の信頼度値には，評価者間類似度による情報が含まれており，閾値以下の値なので，ピア x は信頼できないピアと考えられる．そこで，信頼度値が「未定義」のピアから選択することを考える．信頼度値が「未定義」になったピアの集合を \hat{P}_c ($\subseteq P_c$) とする． $\hat{P}_c = \emptyset$ である場合， P_c に属するピアで，信頼度値が最大の 1 ピアを選択する．

以下， $\hat{P}_c \neq \emptyset$ の場合について述べる．まず，各ピア $x \in \hat{P}_c$ の信頼度値を相加重平均により計算する．ただし，ピア x の評価者の中で，評価者間類似度によって不正評価者であると判断できるピアによる評価値を信頼度値計算時に排除する．具体的には， $CR_{ij} \neq \emptyset$ かつ $sim_{ij} = 0$ であれば，ピア j は不正評価者であると判断でき，ピア j による評価値は信頼

度値計算時には用いない．ここで，このような条件にあてはまる評価者を取り除いたピア x の評価者集合を

$$R_x^i = R_x \setminus \{j \in R_x : CR_{ij} \neq \emptyset, sim_{ij} = 0\}$$

とする．そして，ピア x の正当コンテンツを提供する確率を反映した信頼度値を計算するため，ピア x の信頼度値 tv_{ix} を次式 (4) で計算する．

$$tv_{ix} = \begin{cases} \frac{\sum_{j \in R_x^i} rt_{jx}}{|R_x^i|} & (R_x^i \neq \emptyset) \\ \text{未定義} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4)$$

式 (4) の信頼度値により，コンテンツダウンロード先ピアを選択するが，まず，4.2 節での P_c に属するピアの信頼度値に対する有効性判定と同様に閾値 λ を用いて， \hat{P}_c に属するピアの信頼度値の有効性判定を行う．その結果，有効な信頼度値が得られていると判定された場合， \hat{P}_c 中で信頼度値が最大の 1 ピアを選択する．そうでない場合，この時点で信頼度値が「未定義」のピアの中から，ランダムに 1 つ選択する．ただし，「未定義」のピアが存在しない場合， $\hat{P}_c = \emptyset$ のときと同様， P_c 中から信頼度値が最大の 1 ピアを選択する．

5. 性能評価

5.1 シミュレーション設定

3.1 節で述べたように，ピアが入手予定のコンテンツすべてをダウンロードした後の単純平均汚染コンテンツダウンロード率により，コンテンツ共有システムを評価する．提案手法といくつかの既存手法について，この基準での比較をシミュレーションにより行う．

3.2 節で述べたように，不正評価排除を行わない信頼度値計算法^{3),8)}，評価値に対する統計的分析を行う不正評価排除手法^{11),12)}，評価者間で評価について評価を行う手法⁷⁾ は，同程度の性能である．そのため，既存手法として，まず，相加平均による信頼度値計算⁸⁾ を取り上げる．また，評価者間類似度を用いる従来手法^{1),2)} からは，PeerTrust PSM¹⁾ を取り上げる．なお，ピアの正当評価者としての正当性とコンテンツ提供者としての信頼性は必ずしも一致しないことを前提とするため，EigenTrust など^{4)-6),10),13)} は取り上げない．

さらに，提案手法において間接的評価者間類似度の効果を調査するため，比較対象として，提案手法において重みを直接的評価者間類似度に限った計算法，すなわち，

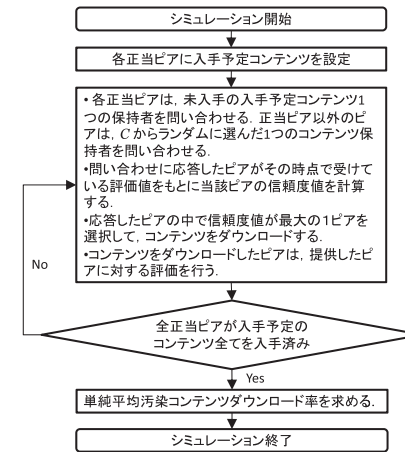


図 1 シミュレーションの流れ
Fig. 1 The process in the simulations.

$$wt_{ij} = \begin{cases} sim_{ij} & (|CR_{ij}| \geq \gamma) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

により重みを求める計算法を取り上げる．また，相加平均による信頼度値計算の効果を計測するため，相加平均による信頼度値で選択する代わりにランダムに選択する計算法も取り上げる．本章では以降，提案手法を計算法 A，重みを直接的評価者間類似度に限った計算法を計算法 A'，相加平均による信頼度値での選択の代わりにランダムに選択する計算法を計算法 A'' と表記する．

シミュレーションでは，図 1 に示すように各ピアに入手予定コンテンツを設定し，それらのコンテンツのダウンロードが完了するまでコンテンツ授受を行い，コンテンツ授受終了時の単純平均汚染コンテンツダウンロード率を計算する．以下，今回のシミュレーションにおける設定を述べる．

5.1.1 想定するピアモデル

表 2 に示すように，正当ピア，悪意ピア，および攪乱ピアを想定する．悪意ピアは，コンテンツ提供や評価を行う際，それぞれある確率 $prate$ ， $drate$ で，汚染コンテンツ提供，不正評価を行う．ピア j は不正評価を行うとき，ダウンロードしたコンテンツに対して，正

表 2 シミュレーションでの想定ピア
Table 2 Models of peers in the simulations.

ピアモデル	提供コンテンツ	他ピアへの評価
正当ピア	つねに正当コンテンツ	つねに正当評価
悪意ピア	ある確率 $prate$ で汚染コンテンツ	ある確率 $drate$ で不正評価
攪乱ピア	つねに正当コンテンツ	つねに不正評価

当コンテンツであれば汚染コンテンツ, 汚染コンテンツであれば正当コンテンツと判定し, その結果を inf_j に登録するものとする. 攪乱ピアは, EigenTrust などコンテンツ提供者としての信頼性を評価者としての正当性と見なす手法に対する既存研究¹⁴⁾ では, コンテンツ提供者としての信頼性を得ることで正当な評価者と見せかけ, 信頼度値計算法を攪乱するピアとして取り上げられている. なお, 攪乱ピアとは逆に, 汚染コンテンツ提供と正当評価を行うピアモデルも考えられる. しかし, このようなピアは, EigenTrust などでは不正評価者で見なされ, そのピアによる評価値は信頼度値計算には影響しない. また, 提案手法を含め, 評価者としての正当性をコンテンツ提供者としての信頼性と見なす手法はないため, このようなピアが正当コンテンツ提供者と見なされることはなく, 信頼度値計算法を攪乱することはない. そのため, 今回のシミュレーションでは, 評価者としての正当性とコンテンツ提供者としての信頼性が一致しないモデルとしては, 攪乱ピアのみ取り上げる.

5.1.2 コンテンツ授受

入手予定コンテンツの設定

授受する正当コンテンツ集合 C に属する各コンテンツには, 固有の人気度順位が与えられているものとする. あるコンテンツ $c \in C$ を入手予定とするピア数が, そのコンテンツの人気度順位の Zipf 分布に従うように, コンテンツ授受開始前に入手予定コンテンツを設定する. これは, 実際の P2P ファイル共有において, 各コンテンツの保持ピア数が Zipf 分布に従っている¹⁵⁾ ことを基にしたモデルである. なお, 正当ピア以外のピアは, C の全コンテンツから毎回ランダムに選んだコンテンツについて保持ピアを問い合わせ, コンテンツダウンロード先ピアをランダムに選びダウンロードするものとする.

コンテンツ提供ピア

シミュレーションでは簡単のため, 各コンテンツ $c \in C$ について, その提供者のうち正当コンテンツ提供者数と汚染コンテンツ提供者数の比率が, 全ピアにおけるその比率と同程度になる状況を想定する. そこで, コンテンツ $c \in C$ に対して, 少なくとも 1 つの正当ピア, もしくは攪乱ピアを含むように, P からランダムに選んだ異なる 20 ピアを, c のコン

テンツ提供者問合せに回答するピアとする. 少なくとも 1 つの正当ピア, もしくは攪乱ピアを含むように選ぶのは, 2 章で述べたように, 回答するピアの少なくとも 1 つを正当コンテンツ提供ピアとするためである.

5.1.3 評価値と直接的評価者間類似度の定義

シミュレーションで用いる評価値, および直接的評価者間類似度の定義について述べる. 評価値の定義

3.3 節で述べたように, ピア j は, ピア x の評価値 rt_{jx} を「ピア j の観測に基づく, ピア x が正当コンテンツを提供する確率」となるように計算する. そこで, rt_{jx} を次式のように定義する.

$$rt_{jx} = \begin{cases} \frac{hd_{jx}}{hd_{jx} + pd_{jx}} & (j \in R_x) \\ rt_{init} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (5)$$

ただし, hd_{jx} は, ピア j がピア x からコンテンツをダウンロードして, 正当コンテンツであると判定した回数, pd_{jx} は汚染コンテンツであると判定した回数とする.

直接的評価者間類似度の定義

$CR_{ij} \neq \emptyset$ であることを満たすピア $i, j \in P$ について, ϵ をパラメータとして, sim_{ij} を次のように定義する.

$$sim_{ij} = \frac{|\{x : |rt_{ix} - rt_{jx}| \leq \epsilon, x \in CR_{ij}\}|}{|CR_{ij}|} \quad (6)$$

ピア i を正当評価者, ピア x を悪意ピアとした場合, ピア x はある確率 $prate$ で汚染コンテンツを提供するので, ピア i が x から十分な回数コンテンツをダウンロードすれば, 式 (5) より rt_{ix} は $prate$ に収束する. ピア j も正当評価者とすれば rt_{jx} は同様に $prate$ に収束する. これより, ϵ は 0 に設定するのが良いと考えられるが, 実際は誤差を考慮して, 正の小さい値を用いるのが適当と考えられる. なお, ピア x を正当コンテンツ提供者とする場合は $prate = 0$ と考えればよく, ϵ として適当な値も同様である.

なお, ϵ を $[0 : 1]$ の範囲のいくつかの値に設定してシミュレーションを行ったが, $\epsilon \in [0 : 1]$ においてはほぼ同じ性能で, $\epsilon = 1$ の場合は $\epsilon \in [0 : 1]$ のときより低い性能になった. 今回のシミュレーションにおいては, ある評価者がある被評価者からコンテンツをダウンロードした回数は, 多くの場合ただか 1 回であることが確かめられており, 式 (5) より rt_{jx} ($j \in R_x$) の値は多くの場合 0 もしくは 1 になる. そのため, $|rt_{ix} - rt_{jx}| \leq \epsilon$ ($x \in CR_{ij}$) の真偽は $\epsilon \in [0 : 1]$ においてほとんど同じであり, 式 (6) より直接的評価者間類似度の値も

表 3 パラメータの既定値
Table 3 Default values of the parameters.

全ピア数	500
$ C $	(正当ピア数) * 10
ϵ	0.1
λ	0.5
d_{\max}	6

同じになるため、同程度の性能になるものと考えられる。一方、 $\epsilon = 1$ の場合、 $0 \leq rt_{jx} \leq 1$ ($j \in R_x$) より、 $|rt_{ix} - rt_{jx}| \leq \epsilon$ ($x \in CR_{ij}$) はつねに真となる。したがって、不正評価者も含め、共通の被評価者が存在するすべての他ピアとの直接的評価者間類似度は 1 になるため、 $\epsilon \in [0 : 1)$ の場合より性能が低下する。5.2 節では $\epsilon = 0.1$ の場合についてのみ結果を示す。

5.1.4 その他設定

シミュレーションにおけるパラメータの既定値を表 3 に示す。正当ピア数にかかわらず入手予定コンテンツ数に関して公平な性能評価を行うため、 $|C|$ は正当ピア数の倍数とする。次節では、パラメータ λ は 0.5 としてシミュレーションを行うが、 λ の選択による性能への影響については 5.3 節で議論する。なお、次節に示す結果はいずれも、同一シミュレーションを 5 回行った平均値である。

5.2 結 果

5.2.1 パラメータ γ , μ の選択による性能への影響

4.1 節で述べたパラメータ γ や μ の値が大きいくほど、正確な値の重みが得られると考えられるが、そのためには、コンテンツ授受が十分な回数行われ、ピア間の共通の被評価者数がパラメータの値以上にならなければならない。したがって、パラメータ γ が大きいほど、計算法 A (提案手法) および計算法 A' では間接的評価者間類似度による信頼度値、計算法 A' では相加平均による信頼度値による選択を行う回数が増える。また、パラメータ μ が大きくなるほど、計算法 A (提案手法) および計算法 A' では相加平均による信頼度値やランダムによる選択が多くなる。したがって、必ずしも γ や μ の値が大きいくほど高い性能が得られるとは限らない。そこで、高い性能が得られる γ , μ の値を探るため、パラメータの複数の値に対する各計算法の性能を調査した。

まず、計算法 A' についてパラメータ γ による性能への影響を調査した。図 2 は、悪意ピア数が 500 ピア中 150 (30%), 攪乱ピア数が 500 ピア中 50 (10%) の状況で、 $\gamma = 1, 2,$

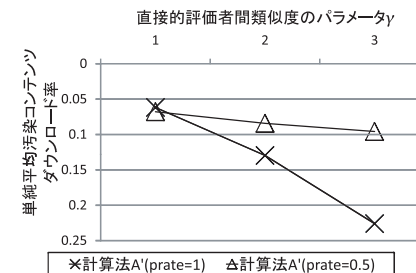


図 2 パラメータ γ に対する計算法 A' の性能
Fig. 2 The performance of the Method A' according to γ .

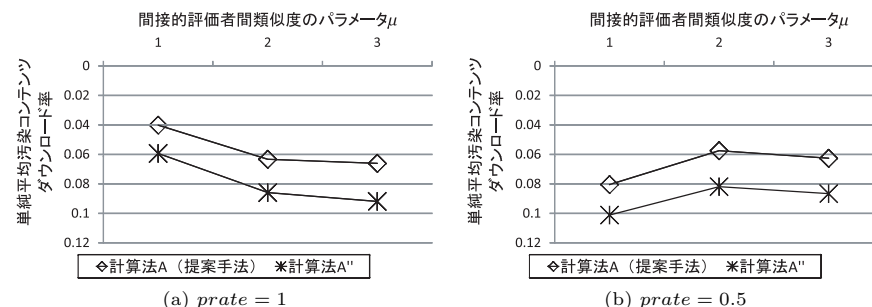


図 3 パラメータ μ に対する性能
Fig. 3 The performance according to μ .

3 として計算法 A' を用いたときの、単純平均汚染コンテンツダウンロード率を示したものである。悪意ピアが汚染コンテンツを提供する確率 $prate$ は、1 と 0.5 のそれぞれの場合について示している。計算法 A' は、 $prate = 1, 0.5$ いずれの場合も γ の増加にともなって性能が低下している。これは、 γ の増加にともない、計算法 A' の性能が相加平均による信頼度値による選択に依存するためである。次節以降、計算法 A' については $\gamma = 1$ の場合の結果のみ示す。

次に、計算法 A (提案手法) と計算法 A' について、パラメータ μ の選択による性能への影響を調査した。図 3 は、いずれも悪意ピア数 150 (30%), 攪乱ピア数 50 (10%), $\gamma = 1$ として、 μ を 1 から 3 まで変化させたときの単純平均汚染コンテンツダウンロード率を示したものである。図 3(a) と図 3(b) では、悪意ピアが汚染コンテンツを提供する確率 $prate$ は、それぞれ 1 と 0.5 である。なお、 $\gamma = 2, 3$ として同様のシミュレーションを行ったが、

それらより $\gamma = 1$ の場合に高い性能が得られたので、 $\gamma = 1$ 以外の場合についての説明は割愛する。

$prate = 1$ の場合 (図 3(a)), 両計算法とも $\mu = 1$ のときの性能が最も高く、 μ の増加にともない性能が低下する。これは、 μ が大きくなるほど両計算法は相加平均による信頼度値やランダムによる選択に性能が依存するためである。なお、 $\gamma = 2, 3$ の場合も同様に $\mu = 1$ のときの性能が最も高かった。

一方、 $prate = 0.5$ の場合 (図 3(b)), 両計算法とも $\mu = 2$ のとき性能が最も高い。1 未満の確率で汚染コンテンツを提供するピアが存在する状況で、1 つの共通の被評価者だけを基にした直接的評価者間類似度の値は不正確である。これにより、間接的評価者間類似度も不正確になることが、 $\mu = 1$ で性能が低い原因と考えられる。 $\mu = 3$ における性能低下は、 $prate = 1$ の場合と同様の理由であると考えられる。

上述以外の悪意ピア数や $prate, drate$ の値でも同様のシミュレーションを行ったが、悪意ピア数にかかわらず $drate$ や $prate$ の値が 1 の場合と 1 未満の場合での性能の違いは同様であった。悪意ピアにとって、 $prate$ や $drate$ の値を 1 未満にすることは容易に実現できると考えられる。この結果と、計算法 A (提案手法) および計算法 A' において、 $(\gamma, \mu) = (1, 2)$ のときに $prate$ や $drate$ の値を 1 から 1 未満にしたときの性能低下が他に比べ比較的小さいことから、 $(\gamma, \mu) = (1, 2)$ とすることが適当であると考えられる。以降、計算法 A (提案手法) および計算法 A' については、特に記述がない限り $(\gamma, \mu) = (1, 2)$ の場合についてのみ結果を示す。

5.2.2 パラメータ d_{max} による性能への影響

4.1 節で述べたパラメータ d_{max} の値を大きくするほど評価値の重みが多く得られ、正当コンテンツを提供するピアの選択に有効な信頼度値も得やすくなると考えられる。そこで、計算法 A' において d_{max} の値を変化させ、4.2 節で述べた有効性判定で有効と判定された正当ピアの割合と単純平均汚染コンテンツダウンロード率の関係を調査した。ただし、有効な信頼度値を得たピアの割合は 20 回目までのコンテンツ授受における平均値、単純平均汚染コンテンツダウンロード率は 20 回目のコンテンツ授受終了時のものである。シミュレーションでは、いずれの d_{max} の値においても、20 回目のコンテンツ授受までに有効な信頼度値を得たピアの割合はほぼ 1 に収束することが確かめられているため、このようにデータをとる。なお、パラメータ γ, μ については $(\gamma, \mu) = (1, 1), (1, 2)$ それぞれの場合で調査した。また、正当ピア数は 300 (60%), 悪意ピア数は 150 (30%), 攪乱ピア数は 50 (10%) である。

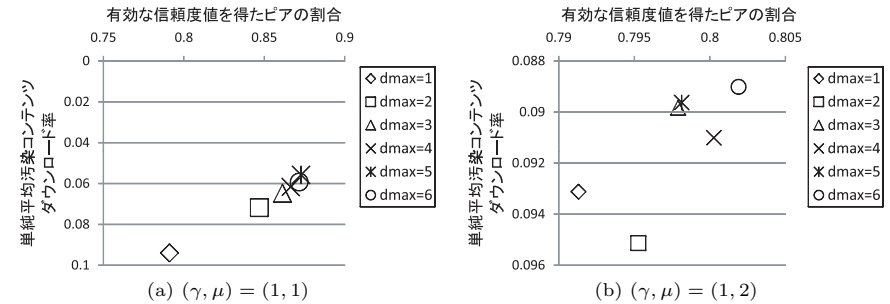


図 4 有効な信頼度値を得たピアの割合と性能の d_{max} による変化
 Fig. 4 The ratio of peers obtaining valid trust values and the performance according to d_{max} .

図 4 はそれぞれ、 $(\gamma, \mu) = (1, 1)$ (図 4(a)) および $(1, 2)$ (図 4(b)) としたとき、各 d_{max} における有効な信頼度値を得たピアの割合と単純平均汚染コンテンツダウンロード率を示したものである。 $(\gamma, \mu) = (1, 1)$ の場合 (図 4(a)) はおおむね、 d_{max} の増加にともない有効な信頼度値を得たピアの割合が増加している。また、有効な信頼度値を得たピアの割合の増加にともない、単純平均汚染コンテンツダウンロード率も小さくなり、性能が向上している。以上より、 d_{max} を増加させることで有効な信頼度値を多く得ることができ、性能向上に有効であることが分かる。 $(\gamma, \mu) = (1, 2)$ の場合 (図 4(b)), $(\gamma, \mu) = (1, 1)$ の場合 (図 4(a)) に比べれば、小さいもの、おおむね、 d_{max} の増加により性能が向上しているといえる。

以上より、 d_{max} の値を大きくするほど有効な信頼度値を多く得ることができ、性能向上に有効であることが分かる。

5.2.3 悪意ピアの割合による性能変化

不正評価者数および汚染コンテンツ提供者数の割合による性能への影響を調査するため、悪意ピア数の割合を変化させた。図 5 は、汚染コンテンツを提供する確率 $prate$, 不正評価を行う確率 $drate$ がそれぞれ 1 である悪意ピア数を 500 ピア中 25 (5%) から 250 (50%) ピアまで増加させたときの、単純平均汚染コンテンツダウンロード率を示したものである。なお、いずれの場合も攪乱ピア数は 50 (10%) である。

悪意ピア数 200 (40%) 以下においては、計算法 A (提案手法) の性能が最も高い。しかし、悪意ピア数が 250 (50%) のとき、計算法 A (提案手法) は計算法 A' や PeerTrust PSM よりも性能が低い。これは、計算法 A (提案手法) は相加平均による信頼度値を用い

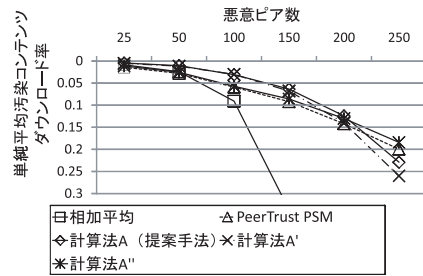
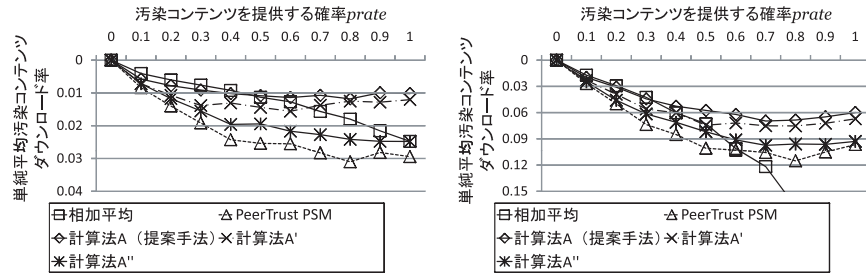


図 5 悪意ピア数に対する性能

Fig. 5 The performance according to the number of Malicious Peers.



(a) 悪意ピア数 : 50

(b) 悪意ピア数 : 150

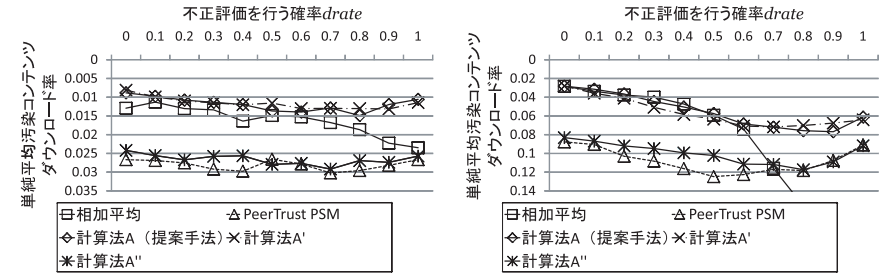
図 6 汚染コンテンツを提供する確率に対する性能

Fig. 6 The performance according to the probability of providing polluted contents.

るため、不正評価者である悪意ピアの割合が大きいことの影響を受けているためであると考えられる。ただし、計算法 A (提案手法) は、同様に相加平均による信頼度値を用いる計算法 A' よりも高い性能を得ているため、間接的評価者間類似度を用いることが性能向上に有効であることが分かる。

5.2.4 汚染コンテンツを提供する確率による性能変化

悪意ピアが汚染コンテンツを提供する確率 $prate$ の性能への影響を調査した。図 6 (a) と図 6 (b) はそれぞれ、悪意ピア数を 500 ピア中 50 (10%) および 150 (30%) に固定し、 $prate$ を 0 から 1 まで 0.1 おきに変化させたときの、単純平均汚染コンテンツダウンロード率を示したものである。ただし、 $drate = 1$ としている。なお、いずれの場合も攪乱ピア数は 50 (10%) である。また、 $prate = 1$ のとき、悪意ピア数 50, 150 はそれぞれ、5.2.3 項における悪意ピア数 50, 150 の場合と同じである。



(a) 悪意ピア数 : 50

(b) 悪意ピア数 : 150

図 7 不正評価を行う確率に対する性能

Fig. 7 The performance according to the probability of rating dishonestly.

悪意ピア数が 50 (10%) の場合 (図 6 (a)), $prate \geq 0.5$ において計算法 A (提案手法) の性能が最も高く、 $prate \leq 0.4$ においては、相加平均に次ぐ性能である。計算法 A' よりも性能が向上しているため、間接的評価者間類似度を用いることが有効であることが分かる。また、相加平均による信頼度値を用いる計算法 A (提案手法) と計算法 A' が、計算法 A'' や PeerTrust PSM よりも性能が向上しているため、相加平均による信頼度値を用いることも有効であると分かる。

悪意ピア数が 150 (30%) の場合 (図 6 (b)), $prate \leq 0.3$ においては相加平均とほぼ同じ性能であり、相加平均を除く他より高い性能である。 $prate \geq 0.4$ においては最も高い性能を得ている。悪意ピア数が 50 (10%) の場合と同様、間接的評価者間類似度および相加平均による信頼度値を用いることが性能向上に有効であることが分かる。

5.2.5 不正評価を行う確率による性能変化

悪意ピアが不正評価を行う確率 $drate$ の性能への影響を調査した。図 7 (a) と図 7 (b) は、それぞれ悪意ピア数を 500 ピア中 50 (10%) および 150 (30%) に固定し、 $drate$ を 0 から 1 まで 0.1 おきに変化させたときの単純平均汚染コンテンツダウンロード率を示したものである。ただし、 $prate = 1$ としている。なお、いずれの場合も攪乱ピア数は 50 (10%) である。また、 $drate = 1$ のとき、悪意ピア数 50, 150 はそれぞれ、5.2.3 項における悪意ピア数 50, 150 の場合と同じである。

悪意ピア数が 50 (10%) の場合 (図 7 (a)), $drate$ の値にかかわらず計算法 A (提案手法) と計算法 A' はほぼ同じ性能で、他より高い性能を得ている。これらは計算法 A'' よりも性能が向上しているため、相加平均による信頼度値を用いることが特に有効であることが

分かる。

悪意ピア数が 150 (30%) の場合 (図 7(b)), $drate \leq 0.5$ においては計算法 A (提案手法) は相加平均とほぼ同じ性能で, 相加平均を除く他より高い性能を得ている。 $drate \geq 0.6$ においては計算法 A' とほぼ同じ性能で, 計算法 A' を除く他より高い性能を得ている。悪意ピア数 50 (10%) の場合と同様, 相加平均による信頼度値を用いることが特に有効であることが分かる。

5.3 パラメータ λ について

提案手法において λ は, 評価者間類似度を重みとして計算した信頼度値, もしくは相加平均により計算した信頼度値に基づき, コンテンツダウンロード先ピアを選択する場合の信頼度値の下限を決めるパラメータである。4.2 節より, 計算されたピアの信頼度値 $tv_i(x)$ が λ を超えていれば「有効」と判定し, そうでない場合「無効」と判定する。そして, 「有効」と判定された信頼度値のうち, それが最大であるピアを選択する。

λ の値と性能の関係は, 4.3 節で述べたピアの選択法より, 計算された信頼度値が最大のピアが正当コンテンツを提供する確率と, 「未定義」のピアが正当コンテンツを提供する確率の平均値のどちらが大きいか依存する。信頼度値が最大のピアが正当コンテンツを提供する確率の方が大きい場合には λ を小さい値に設定し, 信頼度値が最大のピアを「有効」と判定して選択する方が良い。一方, 「未定義」のピアが正当コンテンツを提供する平均確率の方が大きい場合には λ を大きな値に設定し, 信頼度値が最大のピアを「無効」と判定し, 「未定義」のピアからランダムに選択する方が良い。しかし実際には, 信頼度値が最大のピアが正当コンテンツを提供する確率と, 「未定義」のピアが正当コンテンツを提供する平均確率のどちらが大きいか, もしくは同程度なのか, 選択を行うピアには分からない。そこで λ は, 信頼度値のとりうる範囲が $[0:1]$ であることから, その中間の 0.5 程度の値に設定するのが適当であると考えられる。

提案手法について, λ を -1 および $[0:1]$ のいくつかの値に設定し, 5.2.3–5.2.5 項と同様のシミュレーションを行った。 $\lambda = -1 (< 0)$ では, 計算されたすべての信頼度値を「有効」と判定するので, ピアの選択にはほとんどの場合, 評価者間類似度による信頼度値を用いることになる。したがって, 計算法 A'' とほぼ同じ性能になった。 $\lambda = 1$ では, 計算されたすべての信頼度値を「無効」と判定するので, 選択対象ピアすべての信頼度値が計算されている場合以外は, 「未定義」のピアの中からランダムに選択する。性能は $\lambda = 0.5$ の場合と比べ, 不正評価者の割合 50% 以下では低下し, 50% を超えると向上した。不正評価者の割合が小さいと相加平均による信頼度値の信憑性が高いにもかかわらず, $\lambda = 1$ では信頼度

値をピアの選択にあまり用いないため, 性能が低下したと考えられる。一方, 不正評価者の割合が大きい場合は相加平均による信頼度値の信憑性は低いので, 「未定義」のピアからの選択が多い $\lambda = 1$ の性能が高くなったと考えられる。

さらに, λ を $[0:1]$ の範囲のいくつかの値に設定したシミュレーションも行った。その結果, $0 \leq \lambda < 0.8$ においてほぼ同じ性能だった。 $0.8 \leq \lambda < 1$ では特に不正評価者の割合が大きいと性能がわずかに高く, $\lambda = 1$ と同程度になった。これは, $\lambda = 1$ の場合と同様, 信頼度値が「未定義」のピアからの選択が多くなることが原因であると考えられる。 $0 \leq \lambda < 1$ では, 性能の上下が多少あるが, ほぼ同じ性能だったので, 本論文では $\lambda = 0.5$ の場合について結果を示した。

5.4 考察

5.2.3–5.2.5 項におけるシミュレーションより, 計算法 A (提案手法) がおおむね有効であることが分かった。まず, 5.2.3 項におけるシミュレーションでは, $prate = 1, drate = 1$ として, シミュレーションを行った。その結果, 500 ピア中 250 ピアの悪意ピアと 50 ピアの攪乱ピアを合わせて不正評価者が全体の 60% を占める場合, 計算法 A (提案手法) は, 計算法 A'' や PeerTrust PSM よりも性能が低くなった。ただし, 計算法 A'' や PeerTrust PSM は, 悪意ピア数が 200 以下で, 攪乱ピアの 50 ピアを合わせても不正評価者の割合が 50% 以下の場合, 計算法 A (提案手法) より性能が劣ることが図 5 より分かる。不正評価者が全体の 50% 以上を占めることは, あまり現実的ではないと考えられるので, 計算法 A (提案手法) を用いることが有効であるといえる。

また, 5.2.4 項におけるシミュレーションでは, 悪意ピア数が 50 ピア (図 6(a)) のとき, $prate \leq 0.4$ においては, 計算法 A (提案手法) や計算法 A' より相加平均の性能が高かった。これは, 4.2 節で述べた相加平均による信頼度値を用いるための有効性判定に原因があると考えられる。信頼度値の有効性判定を, より多くのピアに相加平均による信頼度値を割り当てられるように変更することで, $prate \leq 0.4$ における計算法 A (提案手法) の性能を向上させることも考えられるが, その場合, 不正評価者が増加した場合の性能低下が懸念される。以上の懸念と, $prate \leq 0.4$ における性能低下が比較的小さいことから, 4.2 節で述べた有効性判定を用いることが有効であると考えられる。

6. おわりに

本論文では, P2P コンテンツ共有において不正評価者の割合にかかわらず高い汚染コンテンツのダウンロード抑制効果を得るため, 評価者間類似度を用いる信頼度値計算法の拡張

を提案した．具体的には，まず，より多くの他ピアについて信頼度値を求めるため，共通の被評価者を基に計算したピア間の評価者間類似度を用いて，共通の被評価者が存在しないピア間の評価者間類似度を間接的評価者間類似度として計算した．そして，間接的評価者間類似度を用いても有効な信頼度値が得られないとき，信頼度値が計算できなかったピアの信頼度値を相加平均により計算して，それに基づきピアを選択する手法を提案した．

コンテンツ授受を想定したシミュレーションにより，汚染コンテンツ提供や不正評価を行う確率，そのようなピア数の全体に占める割合について前提を置くことが困難な P2P システムでは，提案手法を用いることが従来手法に比べ汚染コンテンツのダウンロード抑制のために有効であることを確認した．

間接的評価者間類似度の計算には，従来手法とは異なり，共通の被評価者が存在しないピアによる評価値も入手する必要がある，また，自ピアとの評価者間類似度の計算対象となる他ピアも多くなるため，計算量，通信量ともに大きくなる．本論文では，間接的評価者間類似度の P2P システム上での計算法について扱わなかったが，今後はピア間の通信量やピアにおけるメモリ量，計算量などの効率が良い間接的評価者間類似度の計算法も検討する必要がある．また，提案手法では，ある確率で不正評価や汚染コンテンツ提供を行うピアを想定したが，これ以外にも時間により振舞いを変化させるピアにも対応できるように提案手法を拡張する必要がある．さらに，シミュレーションでは，各コンテンツについて，提供者内での正当コンテンツ提供ピア数と汚染コンテンツ提供ピア数の比率が同程度である状況を想定して提案手法の評価を行ったが，これ以外の状況についても，さらに評価する必要がある．

謝辞 本研究の一部は科学研究費補助金 (18049050) の助成を受けたものである．ここに記して深謝する．

参 考 文 献

- 1) Xiong, L. and Liu, L.: PeerTrust: Supporting Reputation-Based Trust for Peer-to-Peer Electronic Communities, *IEEE Trans. Knowledge and Data Engineering*, Vol.16, No.7, pp.843–857 (2004).
- 2) Damiani, E., di Vimercati, S.D.C., Paraboschi, S. and Samarati, P.: Managing and Sharing Servants' Reputations in P2P Systems, *IEEE Trans. Knowledge and Data Engineering*, Vol.15, No.4, pp.840–854 (2003).
- 3) Martinovic, I., Leng, C., Zdarsky, F.A., Mauthe, A., Steinmetz, R. and Schmitt, J.B.: Self-protection in P2P Networks: Choosing the Right Neighbourhood, *Proc. 1st International Workshop on Self-Organizing Systems (IWSOS 2006)*, LNCS 4124, pp.23–33 (2006).

- 4) Kamvar, S.D., Schlosser, M.T. and Garcia-Molina, H.: The EigenTrust Algorithm for Reputation Management in P2P Networks, *Proc. 12th International Conference on World Wide Web (WWW 2003)*, pp.640–651 (2003).
- 5) Zhou, R. and Hwang, K.: PowerTrust: A Robust and Scalable Reputation System for Trusted Peer-to-Peer Computing, *IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems*, Vol.18, No.4, pp.460–473 (2007).
- 6) 伊藤洋輔，河野浩之：信頼連鎖による P2P コンテンツ流通システムの提案と評価，*DBSJ Letters*, Vol.6, No.1, pp.21–24 (2007).
- 7) Swamynathan, G., Zhao, B.Y., Almeroth, K.C. and Zheng, H.: Globally Decoupled Reputations for Large Distributed Networks, *Advances in Multimedia*, Vol.2007, Article ID 92485 (2007).
- 8) Liang, Z. and Shi, W.: PET: A Personalized Trust Model with Reputation and Risk Evaluation for P2P Resource Sharing, *Proc. 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2005 (HICSS '05)* (2005).
- 9) Stoica, I., Morris, R., Liben-Nowell, D., Karger, D., Kaashoek, M., Dabek, F. and Balakrishnan, H.: Chord: A Scalable Peer-to-Peer Lookup Protocol for Internet Applications, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.11, No.1, pp.17–32 (2003).
- 10) Jøsang, A. and Ismail, R.: The Beta Reputation System, *Proc. 15th Bled Electronic Commerce Conference*, pp.324–337 (2002).
- 11) Whitby, A., Jøsang, A. and Indulska, J.: Filtering Out Unfair Ratings in Bayesian Reputation Systems, *Proc. 7th International Workshop on Trust in Agent Societies at the 3rd International Joint Conference on Autonomous Agents & Multi Agent Systems (AAMAS 2004)*, pp.106–117 (2004).
- 12) Jurca, R. and Faltings, B.: Using CHI-scores to Reward Honest Feedback from Repeated Interactions, *Proc. 5th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2006)*, pp.1233–1240 (2006).
- 13) 酒井隆道，寺田賢二，櫛 肅之：確率的近似法を用いた頑強なオンライン評判メカニズム，*電子情報通信学会論文誌 D*，Vol.J88-D1, No.5, pp.958–968 (2005).
- 14) Liang, Z. and Shi, W.: Analysis of ratings on trust inference in open environments, *Performance Evaluation*, Vol.65, No.2, pp.99–128 (2008).
- 15) Liang, J., Kumar, R., Xi, Y. and Ross, K.W.: Pollution in P2P File Sharing System, *Proc. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2005)*, pp.1174–1185 (2005).

(平成 21 年 9 月 18 日受付)

(平成 22 年 5 月 6 日採録)



山中 広明 (学生会員)

昭和 59 年生。平成 18 年 3 月高知大学理学部数理情報科学科卒業，平成 20 年 3 月大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻博士前期課程修了。現在，同博士後期課程在学中。P2P ネットワークにおけるセキュリティに関心を持つ。



岡村 真吾 (正会員)

平成 17 年 3 月大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻博士後期課程修了，博士 (情報科学)。平成 17 年 4 月同大学サイバーメディアセンター特任助手，平成 19 年 4 月同特任助教，平成 20 年 4 月同大学院情報科学研究科特任助教，平成 20 年 10 月より奈良工業高等専門学校情報工学科助教。情報セキュリティ分野，特に暗号プロトコルや認証技術に関する研究を行う。電子情報通信学会，電気学会，ACM，IEEE 各会員。



藤原 融 (正会員)

昭和 56 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業，昭和 61 年同大学院基礎工学研究科博士後期課程修了，工学博士。平成 9 年同大学院基礎工学研究科教授。平成 10~12 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授 (併任)，平成 16 年大阪大学大学院情報科学研究科教授。符号理論，情報セキュリティに関する研究に従事。電子情報通信学会フェロー，IEEE，ACM 各会員。



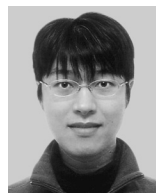
吉田 真紀

平成 13 年大阪大学大学院博士後期課程修了。博士 (工学)。同年同大学助手。現在，同大学院情報科学研究科助教。情報セキュリティに関心を持つ。電子透かし，暗号プロトコル，安全性の形式的検証の研究に従事。



石原 靖哲 (正会員)

昭和 43 年生。平成 2 年大阪大学基礎工学部情報科学科卒業。平成 6 年同大学院博士後期課程退学。奈良先端大助手等を経て，現在，大阪大学大学院情報科学研究科准教授。博士 (工学)。XML データベースやデータベースセキュリティに関心を持つ。ACM，IEEE，電子情報通信学会各会員。



秋山 豊和 (正会員)

平成 11 年大阪大学大学院工学研究科修士課程修了。平成 12 年同大学院博士課程中退後，同大学サイバーメディアセンター助手，平成 17 年 1 月同センター講師。平成 20 年 4 月より京都産業大学コンピュータ理工学部講師。現在に至る。分散システムの研究開発に従事。博士 (工学) (平成 15 年 9 月，大阪大学)。電子情報通信学会，IEEE CS 各会員。



加藤 精一 (正会員)

昭和 48 年静岡県御殿場市生まれ。平成 14 年東京大学大学院理学研究科天文学専攻博士課程修了，博士 (理学)。大阪大学サイバーメディアセンター助手を経て，現在，兵庫医療大学共通教育センター准教授。センサネットワークを用いたアプリケーションに関する研究等に従事。日本天文学会会員。



下條 真司 (正会員)

昭和 33 年 4 月 7 日生。昭和 61 年 3 月大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了，工学博士。同年同大学助手。平成元年同大学大型計算機センター講師。平成 3 年 4 月同センター助教授，平成 10 年 4 月同センター教授，平成 12 年 4 月同大学サイバーメディアセンター副センター長，平成 17 年 8 月同センター長，平成 19 年 8 月同副センター長，平成 20 年 4 月情報通信研究機構大手町ネットワーク研究統括センター/上席研究員。現在に至る。マルチメディア情報システムのアーキテクチャの研究に従事。データベースとネットワークに関連したマルチメディア応用システムに興味を持つ。オブジェクト指向データベースを応用したマルチメディアプレゼンテーションシステム Harmony，News On Demand システム，QoS に対応した仮想現実共有システム C3，P2P エージェントプラットフォーム PIAX 等の実装を通じてアーキテクチャを研究するというスタイルをとる。平成 17 年第 23 回大阪科学賞を受賞。電子情報通信学会，IEEE CS 各会員。