

論文の内容の要旨

論文題目 P2P Network Measurement and Management Techniques
(P2P ネットワーク測定技術と制御技術に関する研究)

氏名 吉田 雅裕

現在のインターネットにおけるサービス提供手段の一つとして、P2P 技術を用いたネットワーク構成方式が世界中で広く普及している。この「P2P ネットワーク」は各ユーザの PC を直接的に相互接続することで構築され、各ユーザはサービスを受けると同時に自分自身が保持する資源（ネットワーク回線、CPU、HDD など）を他のユーザに提供する。そのため、従来のクライアント・サーバー型のインターネットサービスと比較して、コスト面に優れ高い拡張性を持つ。この P2P ネットワークを用いたサービスとしては、Skype に代表される VoIP サービス、PeerCast に代表される P2P 動画ストリーミング、BitTorrent に代表される P2P ファイル共有ネットワークなどが普及している。本論文では、「P2P ファイル共有ネットワーク」を対象とした測定技術と制御技術に関する研究成果を述べる。

P2P ファイル共有ネットワークでは、ユーザの PC をピア（クライアント）と呼び、各ピアが保有しているファイルを検索しダウンロードすることができる。あるファイルを検索しているピアが目的のファイルを P2P ファイル共有ネットワーク上で検索できた際は、ファイル検索ピアとファイル保持ピアの 2 点間を直接的に接続しファイル交換が行われる。サイズの大きなファイルは「Chunk」と呼ばれる小さな部分データ単位で分割され交換されるため、複数のピアから Chunk を同時並行的にダウンロードすることが可能である。さらに、ファイル全体のダウンロードが完了しない場合でも、既にダウンロード済みの Chunk は他のピアにアップロードすることが可能である。これらの特徴的なファイル転送プロトコルにより、短時間で多くのピアにサイズの大きなファイルを配布することができ、ファ

イル転送効率に非常に優れるという特徴がある。特に近年では、P2P ファイル共有ネットワークが世界中で広く普及し、頻繁にサイズの大きなファイルの交換に利用されるようになったため、現在のインターネットにおける全体の通信量の大きな割合を占めるなど社会的なインパクトも大きい。

P2P ファイル共有ネットワークの普及に伴い、その研究も盛んに行われるようになった。研究対象の P2P ファイル共有ネットワークとしては、測定方式と制御方式の研究がある。P2P ネットワークの「測定」とは、世界中に分布したピアが持つアプリケーション層の情報を、ある一地点から収集し P2P ネットワーク全体の特性を推定する方式である。しかし、P2P ネットワークの測定には、(課題 1) 測定のために大量の資源が必要であること、(課題 2) 接続拒否端末と呼ばれる測定不可能なピアが多数存在すること、という 2 つの課題がある。また、現在の P2P ファイル共有ネットワークには流通ファイルを「制御」する機能が備わっていないため、様々な課題が P2P ファイル共有ネットワーク上で起こっている。その一つが(課題 3) 非効率な長距離通信の発生である。また、P2P ファイル共有ネットワークでは、(課題 4) 一度流通を始めたファイルをネットワーク上から削除することができず、著作権侵害ファイルや個人情報ファイルなどの流通が問題となっている。本論文では、これらの課題 1 から課題 4 のそれぞれを解決するために、5 種類の提案方式を提案しその性能評価を行った。本論文で取り上げた 4 つの課題を解決するためには技術的なアプローチだけでなく、法律、経済、倫理などの様々な視点が必要となる場合がある。しかし、本論文では技術的な方式の開発のみを研究対象としており、その他のアプローチとの組み合わせなどは本論文の対象外である。

本研究のオリジナリティ (Thesis Statement) は、以下の 2 つである。第一に、本論文の全ての提案方式は、現在の P2P ファイル共有ネットワークのソフトウェアやプロトコルを全く変更せずに適用できるという点である。現在普及している P2P ファイル共有ネットワークはネットワーク管理者が存在せず、プロトコルやソフトウェアの変更も P2P ネットワーク開発者のみにしか権限が無い。そのため、第三者が何らかの機能を P2P ファイル共有ネットワークに追加することは難しく、現在の P2P ファイル共有ネットワークの課題を解決する上で大きな障害であった。しかし、本論文の提案方式は、ソフトウェアやプロトコルに透過的でありそのまま直接的に適用することができるため、実効性や有効性の高い方式となる。第二のオリジナリティは、本論文の全ての提案方式が大規模な資源(ネットワーク回線, CPU, HDD など)を必要とせず、ユーザレベルで用意可能な資源(具体的には 100Mbps の回線, 1 台の PC)で提案方式を適用できる点である。P2P ファイル共有ネットワークには、国や年齢層の異なる様々なユーザが参加しているため、流通ファイルに対してどのような制御を行いたいのかという要望はユーザごとに異なる。さらに、P2P ファイル共有ネットワークを制御する場合は、誰がどのような立場で制御するかという議論もあり、制御方式を実運用する上で問題となりうる。しかし、本論文の提案方式は、ユーザレベルで用意可能な資源のみで適用可能とすることで、各ユーザに P2P ファイル共有ネッ

トワークの自立的な制御を可能とする方式を提供できる。

P2P ファイル共有ネットワークの測定における（課題 1）の解決のために、「RE 方式」と呼ばれる提案方式を開発した。対象の P2P ネットワークは世界で最も普及している P2P ファイル共有ネットワークの 1 つである「BitTorrent」ネットワークを選択した。BitTorrent ネットワークは数百万種類の「Swarm」と呼ばれる小ネットワークに分割され、数百万台のピアが複数の Swarm に同時に参加する形状となっている。そのため、BitTorrent ネットワーク全体を測定するために多くの資源(PC, 回線帯域など)が必要であり、BitTorrent ネットワークの全容もこれまでに十分に明らかにされていなかった。そこで RE 方式では、1 台の PC を利用して効率的に BitTorrent ネットワーク全体を測定可能とする。RE 方式では、BitTorrent ネットワーク上の冗長な情報を取得しないようにすることで、BitTorrent ネットワークの測定でクローラ（測定端末）が消費する資源を節約する。さらに、BitTorrent プロトコルに備わった Scrape-ALL クエリや IOCP ソケットなどの実装方式を有効に利用することで、高速な測定を実現する。最終的に、RE 方式では 430 万種類のユニークな torrent ファイルと 48, 000 種類のユニークなトラッカーアドレスを収集でき、1 日の計測で 24 個のスナップショットと 1, 000 万のユニークピアの測定に成功した。

P2P ファイル共有ネットワークの測定における（課題 2）の解決のために、「BR 方式」と呼ばれる提案方式を開発した。対象の P2P ネットワークは「BitTorrent」ネットワークを選択した。BitTorrent における分割された小ネットワークである Swarm には、多数の到達不可能ピア(NAT ピア, FW ピア, 離脱ピア)が存在する。クローラは各ピアと直接接続し測定する必要があるが、到達不可能ピアとクローラは接続を確立できず測定ができない。この到達不可能ピアの影響により、これまでの BitTorrent 測定ではネットワークの一部に限定した測定が行われており、BitTorrent の全容も十分に明らかできなかった。そこで BR 方式では、測定用クローラのアドレス Tracker サーバを介して到達不可能ピアに送信し、到達不可能ピアから測定用クローラに積極的に接続させることで測定精度を向上させる。評価実験の結果、BR 方式はユニークな接続可能ピアの台数が、従来方式と比較して 126%向上することを示す。さらに、BR 方式は、接続可能ピアのアドレスを積極的に拡散することで、各ピアのダウンロード効率を従来方式と比較して 66%向上できることを示す。

P2P ファイル共有ネットワークの測定における（課題 3）の解決のために、「BPEX 方式」と呼ばれる提案方式を開発した。対象の P2P ネットワークは「BitTorrent」ネットワークを選択した。P2P ネットワークはオーバーレイネットワークと呼ばれ、IP ネットワーク（物理ネットワーク）の上で論理的にネットワーク構造が構築される。しかし、現在の P2P プロトコルは、IP ネットワークにおける通信コスト（通信距離, AS ホップ数）が考慮されておらず、大量の「長距離 AS 間通信」が発生する。その結果、ピアは長距離 AS 間通信に伴うネットワーク遅延により、ファイルダウンロード速度の低下を強いられている。さらに、ISP（ユーザにインターネットサービスを提供する運営会社）では、P2P ファイル共有ネットワークによる長距離 AS 間通信が大きな損失を生み出すため、P2P 通信を規制

するという動きもある。そこでこの問題を解決するために、BitTorrent によって発生する P2P 通信の通信距離を短縮する BPEX 方式を開発した。BPEX 方式では、測定用端末が最適な隣接ピア情報を BitTorrent における「PEX」というプロトコルを利用して各ピアに送信し、P2P 通信の通信距離を短縮する。評価実験の結果、BPEX 方式はダウンロード完了速度を、従来方式と比較して 25%向上することを示す。さらに、BPEX 方式は P2P 通信の通信距離を、従来方式と比較して 12%短縮できることを示す。

P2P ファイル共有ネットワークの測定における（課題 4）の解決のために、「IP 方式」と呼ばれる提案方式を開発した。対象の P2P ネットワークは国内で最も普及している P2P ファイル共有ネットワークの 1 つである「Winny」ネットワークを選択した。現在の P2P ファイル共有ネットワークにはファイル流通制御機能が実装されておらず、著作権侵害ファイルやマルウェアなどの流通が問題である。そこで IP 方式では、インデックスポイズニングという手法を Winny ネットワークのファイル流通制御方式として応用しその性能評価を行った。IP 方式では、Winny ネットワークの本質であるファイル流通技術としての側面を否定することなく、なおかつ、著作権侵害ファイルの流通などの反社会的な利用のみを技術的に制限することを目標とする。キーと呼ばれる、ファイルのメタデータを利用する Winny のファイル流通プロトコルに着目し、ファイルのダウンロードに必要な特定のキーを、インデックスポイズニングを用いてネットワーク上から消去することによりファイル流通制御を実現した。評価実験の結果、IP 方式を Winny ネットワークに適用した場合は、Winny ピアが特定のファイルのキーを入手できる確率が、適用しない場合の 0.005%まで低下することを示す。

P2P ファイル共有ネットワークの測定における（課題 4）の解決のために、「CP 方式」と呼ばれる提案方式を開発した。対象の P2P ネットワークは国内で最も普及している P2P ファイル共有ネットワークの 1 つである「Share」ネットワークを選択した。Share ネットワークにおいても、他の P2P ファイル共有ネットワークと同様に著作権侵害ファイルやマルウェアなどの流通が問題となっている。そこで CP 方式では、コンテンツポイズニングと呼ばれる手法を Share ネットワークのファイル流通制御方式として応用しその性能評価を行った。CP 方式は、一つのファイルを複数のブロックに分割して転送する Share ネットワークに対して、ファイル転送中に偽装ブロックを混ぜて転送することでダウンロードしたファイルを不完全なものにする制御方式である。しかしながら、コンテンツポイズニングの従来の適用方式では、制御によって P2P トラフィックが著しく増加してしまうなど四つの解決すべき課題が存在する。そこで CP 方式は、これら四つの課題を解決したコンテンツポイズニングの改良方式として開発した。評価実験の結果、CP 方式を Share ネットワークに適用した場合は、Share ピアが特定のファイルを入手できる確率が、適用しない場合と比較して 5%まで低下することを示す。また、CP 方式は P2P トラフィックの増加を、従来方式と比較して 4%まで抑えられることを示す。