

平成 30 年 6 月 27 日現在

機関番号：14603

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00126

研究課題名(和文) ゲーム理論的アプローチを用いた制御可能型P2Pコンテンツ配信に関する研究

研究課題名(英文) Study on Controllable P2P Content Distribution Based on Game Theoretic Approach

研究代表者

笹部 昌弘 (SASABE, Masahiro)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：10379109

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：Peer-to-Peer (P2P)コンテンツ配信では、サーバに加えて参加中のユーザ端末(ピア)も受信したコンテンツの断片(ピース)を他のピアに送信することで、サーバの負荷を軽減できる。このとき、ゲーム理論における知見を基に、他のピアからのピース取得には自らのピース提供が必要となる。Tit-for-Tat (TFT)戦略の導入により、ピアにピース送信を促すことができる。本研究では、サーバにおけるピース配送方式とTFT戦略を組み合わせることで、P2Pコンテンツ配信のサーバによる間接的な制御が可能となることを示した。

研究成果の概要(英文)：In peer-to-peer (P2P) content distribution, users' nodes, called peers, send received fragments of the original file, i.e., pieces, to others, which can alleviate the server's load. Tit-for-tat (TFT) strategy in game theory can encourage cooperation among peers, i.e., each peer has to provide fragments of the original file, called pieces, to others so as to retrieve its demanding pieces from them. In this study, we reveal that the server's indirect control of P2P content distribution can be achieved by the combination of server's piece sending strategy and TFT constraint among peers.

研究分野：P2Pネットワーク

キーワード：P2Pコンテンツ配信 Tit-for-Tat戦略 整数線形計画問題 最適なピースフロー 間接的制御

1. 研究開始当初の背景

Linux などフリーOS のインストール用イメージやソフトウェアの更新データといったファイル型コンテンツの配信や YouTube に代表されるストリーミング型コンテンツの配信など、インターネットを利用したコンテンツ配信は我々の生活において重要な存在となっている。このようなコンテンツ配信では、ユーザ端末への大容量または継続的なデータ転送を必要とするため、いずれもユーザ数の増加に対してサーバのアップロード回線容量がボトルネックとなる傾向がある。このような課題に対して、Peer-to-Peer (P2P) 技術を用いることで、配信サービスに参加中のユーザ端末 (ピア) がサーバからピース (ファイルの断片) を受信するだけでなく、受信したピースを他のピアへと送信することにより、サーバにかかる負荷を軽減するとともに、サーバの回線容量を増強することなくピア数に比例した配信能力を備えたコンテンツ配信システムを構築できる。

一方で、各ピアはユーザの操作する端末であり、コンテンツ配信への協力はあくまで各ユーザの意思にゆだねられる。その結果、P2P コンテンツ配信においては、ピアが他のピアからピースを取得するだけで、他のピアへのピースの提供を行わない、ただ乗り行為が起りやすい問題がある。このような問題に対し、P2P ファイル配信方式の一つである BitTorrent では、ゲーム理論における Tit-for-Tat (TFT) 戦略を導入している。TFT 戦略は、他のピアからのピース取得には自らのピース提供が必要となるという仕組みであり、このことにより、ピアの他ピアへの積極的なピース送信が促進される。

このような TFT 型 P2P ファイル配信システムにおいて、ピア間での平均ダウンロード時間を最小化するピースフローの分析が進められていた [MH14]。ここで、ピースフローとは、いつ、どのノード (サーバもしくはピア) からピアへ、どのピースを送信するかを表す情報を指す。[MH14] では、最適なピースフロー決定問題を整数線形計画問題として定式化している。既存のソルバを用いて得られた最適解を分析することで、サーバから低いアップロード容量を持つピア (低速ピア) を経由して高いアップロード容量を持つピア (高速ピア) へと間接的にピースを配送する、回線容量昇順戦略により、効率の良い配信が可能となることを明らかにしていた。

[MH14] M. Hasegawa, M. Sasabe, and T. Takine, "Analysis of Optimal Scheduling in Tit-for-Tat-based P2P File Distribution," IEICE Transactions on Communications, vol.E97-B, no.12, pp.2650-2657, Dec. 2014.

2. 研究の目的

[MH14] の知見は、TFT 制約を前提にサーバが適切にピースの送信先を決定することにより、最適なコンテンツ配信の実現に向けてサーバがシステム内でのピースの流れを間接的に制御できる可能性を示唆している。そこで本研究では、TFT 型 P2P コンテンツ配信におけるサーバによる間接的な制御の可能性を以下の3点に関する検討を通して解明する。

(1) TFT 型 P2P ファイル配信システムにおけるサーバ・ピアの分散型制御アルゴリズムの確立

[MH14] における最適なピースフロー決定問題は、サーバがすべてのピアを完全に制御できると仮定した場合の集中型制御アルゴリズムとみなすことができる。実システムでは、個々のピアは異なるユーザの保持する端末であることから、サーバがこれらピアの挙動を直接制御することは困難である。そこで本研究では、サーバとピアの分散型制御アルゴリズムを確立する。

(2) ピアの途中離脱・参加に対する TFT 型 P2P ファイル配信システムのロバスト性評価 [MH14] では、ファイル配信に参加するピアは配信開始からダウンロード完了までシステムに滞在し続けることを前提としていた。実システムでは、端末やネットワークの故障・不調、あるいはユーザのサービス品質に対する不満などにより、配信途中にピアがシステムから離脱する可能性がある。また、システムに途中から参加するピアも存在しうる。そこで本研究では、このようなピアの途中離脱・参加 (churn) に対する TFT 型 P2P ファイル配信システムのロバスト性を解明する。

(3) TFT 型 P2P ストリーミング配信における最適なピースフローの分析

コンテンツの種類としては前述のように、ファイル型に加えてストリーミング型が存在する。ファイル型ではユーザにとってのサービス品質はダウンロード時間でモデル化できたが、ストリーミング型では、動画などのコンテンツを取得しながら再生するため、途切れなく再生し続けるために必要となる再生開始遅延がユーザのサービス品質を表すものと考えられる。そこで本研究では、ピア間の平均再生開始遅延を最小化する、最適なピースフローを導出し、それを達成するサーバ・ピアのピース送信・受信戦略を解明する。

3. 研究の方法

(1) TFT 型 P2P ファイル配信システムにおけるサーバ・ピアの分散型制御アルゴリズムの確立

最適な P2P ファイル配信をサーバとピアの自律分散的な振る舞いにより実現することを目指す。一般に、分散制御においてノードの行動順序を制御することは容易ではないことから、ノード間での処理の非同期性を考慮し、

サーバとピアの動作アルゴリズムを設計する。システムを離散時間でモデル化すると、各時点毎に、ランダムな順序でサーバとピアが送信対象のピアとピース、受信対象のピアとピースをそれぞれ選択する。

サーバはシステム全体の利益のため、ピアの平均ダウンロード時間をできる限り短くすることを目標にピースを送信するものとする。平均ダウンロード時間の短縮のためには、サーバだけでなくピアによるピース送信の機会を増やさなければならない。その際、TFT 制約により、ピア間では互いに保持していない異なるピースの交換が求められる。したがって、送信ピースはシステム内で保持するピアが最も少ない、希少ピースとする。また、送信先ピアは[MH14]で得られた知見に基づき、回線容量昇順戦略に従うものとする。

一方、各ピアの目的はサーバとは異なり、自身のダウンロード時間をできる限り短くすることである。そのため、各時点でピアは出来る限り多くのピースの獲得を目指す。ただし、TFT 制約により、他のピアからのピースの受信にはそのピアへのピースの送信が求められることから、他のピアとの間で自身のアップロード回線容量の許す限り、希少ピースの獲得を目指す。

以上のことから、サーバとピアがネットワーク内でのピアのピース保持状況に応じて、送信対象のピアとピース、受信対象のピアとピースをそれぞれ自律分散的に決定可能なアルゴリズムが確立できる。

(2) ピアの途中離脱・参加に対する TFT 型 P2P ファイル配信システムのロバスト性評価
ピアの途中離脱は、ピアやネットワークの障害、また、ピアを操作するユーザがサービスからの離脱を選択した場合に生じるものと考えられる。一方、ピアの途中参加は、ユーザがファイルを検索・発見した際に起こりうる。このようなピアの churn を配信サーバが事前に予見することは困難であると考えられることから、このような予見の困難さを考慮した上でのピアの churn に対する TFT 型 P2P ファイル配信のロバスト性を評価する必要がある。

そこで、ピアの churn を連続するピアの途中離脱・途中参加とみなし、ピアの churn 発生前後の 2 段階の状況に着目した。このとき、churn 発生前における最適なファイル配信に関しては、[MH14]における整数線形計画問題と同様の問題に帰着される。一方、churn 発生後に関しては、1 段階目の整数線形計画問題に対し、churn 発生前までの最適なファイル配信が 1 段階目の最適解で与えられ、かつ churn が発生すると仮定した場合として新たに定式化できる。ピアの churn が複数回生じる場合も、同様のアプローチで多段の最適化問題と

して定式化することができる。

このようにして定式化された問題はいずれも整数線形計画問題となるため、既存の線形ソルバである CPLEX により最適解を導出できる。最適解を分析することで、ピアの churn に対するロバスト性を評価することができる。

(3) TFT 型 P2P ストリーミング配信における最適なピースフローの分析

TFT 型 P2P ストリーミング配信における最適なピースフローの決定問題は[MH14]を拡張することで整数線形計画問題として定式化できる。前述のピースフローは、各時点で、各ノードが別のピアに、各ピースを送信するかどうかを示す 0-1 変数として表現できる。このピースフローを用いることで、さらに各ピアが各ピースを取得するまでに要する時間を数式で表現できる。一方、あるピアが時点 0 ですべてのピースを保持しており、1 ピースの再生に 1 時点を要すると仮定した場合、 k 番目のピースの再生開始時点は $k-1$ で与えられる。したがって、ピース k の取得時点と再生開始時点との差がピース k に対する再生開始遅延と定義できる。その結果、最も再生開始遅延が大きくなるピースに対する再生開始遅延だけ最初に待つことで、最初から最後まですべてのピースを途切れなく再生し続けることができる。

このようにして各ピアに対する再生開始遅延を導出できるため、それらの平均の最小化を目的関数として設計できる。一方、整数線形計画問題の制約条件に関しては、基本的な制約式については[MH14]における TFT 型 P2P ファイル配信の場合と同様となる。ただし、ストリーミング配信の場合、ファイル配信とは異なり、コンテンツの種類（蓄積型・ライブ型）と配信形態（オンデマンド型、ライブ型）の組み合わせにより、全部で 4 通りのサービスモデルが考えられるため、この点を考慮した定式化の拡張も必要となる。

定式化された問題はこれまでと同様に既存のソルバ CPLEX により最適解を導出できるため、最適解の分析により、TFT 型 P2P ストリーミング配信における最適なピースフロー、及びそれを生み出す、サーバとピアの戦略を解明できる。

4. 研究成果

各研究課題に対する代表的な研究成果を以下に示す。

(1) TFT 型 P2P ファイル配信システムにおけるサーバ・ピアの分散型制御アルゴリズムの確立

提案アルゴリズムの有効性を、以下のシナリオを用いてシミュレーションにより評価した。1 台のサーバと複数のピアからなる配信システムを想定し、サーバのアップロード容量を 1, アップロード容量が 3, 2, 1 のピアが同数となるようピア数を 3, 30, 300 と変化させた。図にピア数に対する平均ダウンロード時間の推移を示す。なお、すべてのピアに対する結果に加えて、アップロード容量ごとのピアに対する結果を示している。ただし、ピース数はピア数の 2 倍とし、平均ダウンロード時間はそれぞれピース数で正規化している。また、ピア数の規模の増加に対する平均ファイル取得時間の増加度合いを見るために、横軸は対数軸としている。

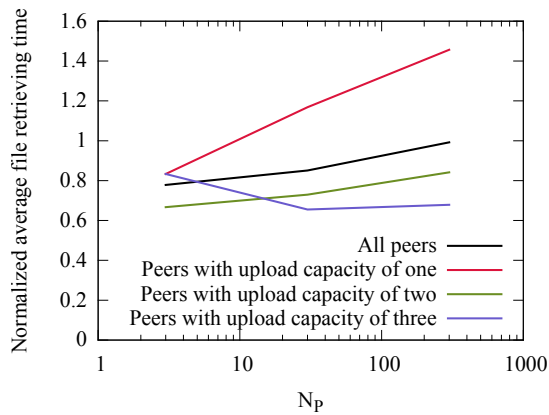


図 1 ピア数と平均ダウンロード時間

ピア全体に対する平均ファイル取得時間の推移に着目すると、ピア数の増加割合に比べて平均ファイル取得時間の増加度合いが小さいことから、ピア数に対してスケラブルな配信を実現できていることがわかる。

以上の成果は、学会発表④、⑤及びその他②において対外的に公開している。

(2) ピアの途中離脱・参加に対する TFT 型 P2P ファイル配信システムのロバスト性評価
1 台のサーバと複数のピアからなる配信システムを想定し、サーバのアップロード容量を 2, アップロード容量が 3, 2, 1 のピアが 2 台ずつ、ピース数 12 の小規模なシステムに対する数値実験を行った。なお、ピアの churn は同一時点に一定数のピアが途中離脱した後、同数のピアが途中参加するものとした。

数値評価により、まず、1 台のピアの途中離脱、churn に着目した分析により、途中離脱や churn がシステム全体の性能に与える影響は限定的であることを示した。一方で、途中離脱ピアと途中参加ピアに着目した分析では、途中離脱ピアの保持するピースの希少性と残存ピアのシステム性能との間には強い正の相関があること、途中参加ピアは既存ピアと比較して有利にファイル取得を進められることを明らかにした。

次に、churn の規模を変更した場合の分析を行った。図 2 は churn の規模 (台数) と発生時点に対する平均ダウンロード時間の推移を示している。churn の規模と発生時点に応じて、サーバがファイル配信を行う期間は増加するものの、図より、平均ダウンロード取得時間の観点では churn が生じない場合よりも僅かに低くなることわかる。このことは、ピアの churn に対して TFT 型 P2P ファイル配信がロバスト性を有することを示している。

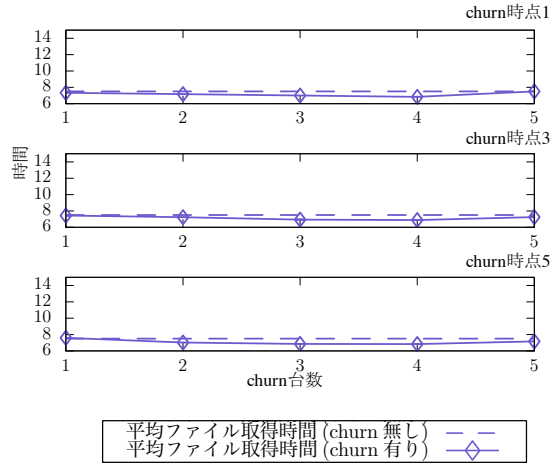


図 2 churn の規模と平均ダウンロード時間

以上の成果は、学会発表①-③及びその他①において対外的に公開している。

(3) TFT 型 P2P ストリーミング配信における最適なピースフローの分析

1 台のサーバと複数のピアからなる配信システムを想定し、サーバのアップロード容量を 2, アップロード容量が 3, 2, 1 のピアが 2 台ずつ、ピース数 10 の小規模なシステムに対する数値実験を行った。なお、ピアの ID はアップロード容量の降順に A, B, C, D, E, F とする。図 3 は最適なピースフローを示している。(t, k)セルには、時点 t でピース k を取得したピア i の情報を記載している。なお、ストリーミング配信では、TFT 制約の観点では希少ピースの取得が重要となる反面、連続的な再生の観点では再生順に従うピースの取得が重要となる。図では、サーバからピースを受信した際に、希少ピース送信戦略が優先された場合には青色、再生順ピース送信戦略が優先された場合には赤色、両戦略が同程度の価値を有した際は灰色となるよう設定することで、希少ピース取得と再生順ピース取得の最適なバランスの分析を可能としている。

t, k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	A ₀ ¹	B ₀ ²								
2	B ₀ ²	A ₀ ¹	E ₀ ³	D ₀ ⁴						
3	C ₀ ³ E ₀ ³	A ₀ ¹	A ₀ ¹	C ₀ ³						
4		C ₀ ³ D ₀ ⁴ E ₀ ³	B ₀ ² C ₀ ³	B ₀ ²	A ₀ ¹ B ₀ ²	E ₀ ³	D ₀ ⁴			
5			E ₀ ³	E ₀ ³	A ₀ ¹	C ₀ ³		E ₀ ³	D ₀ ⁴	
6				C ₀ ³	D ₀ ⁴	A ₀ ¹	B ₀ ² E ₀ ³	C ₀ ³	A ₀ ¹	B ₀ ²
7					E ₀ ³	B ₀ ² C ₀ ³	A ₀ ¹	A ₀ ¹ B ₀ ²	B ₀ ² C ₀ ³ E ₀ ³	A ₀ ¹ C ₀ ³ D ₀ ⁴
8						D ₀ ⁴		D ₀ ⁴		E ₀ ³
9										
10										
11										
12										
13										

図 3 最適なピースフローの例

図より、サーバのピース送信戦略としては、基本的には希少ピースの中で再生順が早いピースを選択することが望ましい一方、ピースの取得が遅れているピアに対しては必要に応じて再生順ピース送信戦略を適用する必要があることがわかる。また、サーバのピース送信対象として選ばれるピアの観点では、回線容量の降順に送信対象を選択する傾向が見られる。以上の特性は、TFT型P2Pストリーミング配信における、最適なピースフローの実現を可能とするサーバとピアの自律分散型制御方式の確立に利用できる。

以上の成果は、雑誌論文①において対外的に公開している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Masahiro Sasabe, “Analysis of Optimal Piece Flow in Tit-for-Tat-Based P2P Streaming,” *Computer Networks*, vol.139, pp.60-69, 2018, 査読有, DOI:10.1016/j.comnet.2018.04.004.

[学会発表] (計 5 件)

- ① 香山 侑槻, 笹部 昌弘, 笠原 正治, “Tit-for-Tat 型 P2P ファイル配信におけるピアの churn が平均ファイル取得時間に与える影響,” 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, 2018 年.
- ② 香山 侑槻, 笹部 昌弘, 笠原 正治, “Tit-for-Tat 型 P2P ファイル配信におけるピアの途中離脱が平均ファイル取得時間に与える影響の分析,” インターネット技術 163 委員会新世代ネットワーク構築のための基盤技術研究分科会ワークショップ, 2017 年.
- ③ 香山 侑槻, 笹部 昌弘, 笠原 正治, “Tit-for-Tat 型 P2P ファイル配信におけるピアの途中離脱が平均ファイル取得時間に与える影響に関する一検討,” 電子情報通信学会総合大会, 2017 年.
- ④ 小川 夏輝, 笹部 昌弘, 笠原 正治, “通信負荷の軽減を考慮した制御可能型 P2P ファイル配信方式に関する一検討,” インターネット技術 163 委員会新世代ネットワーク構築のための基盤技術研究分科会ワークショップ, 2015 年.
- ⑤ 小川 夏輝, 笹部 昌弘, 笠原 正治, “制御可能型 P2P ファイル配信方式に関する一検討,” 電子情報通信学会コミュニケーションオリティ研究会, 2015 年.

[その他]

- ① 香山 侑槻, “ピアの churn に対する Tit-

for-Tat 型 P2P ファイル配信のロバスト性評価,” 奈良先端科学技術大学院大学修士論文, 2018 年.

- ② 小川 夏輝, “Tit-for-Tat 型 P2P ファイル配信の間接的制御方式,” 奈良先端科学技術大学院大学 修士論文, 2016 年.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笹部 昌弘 (SASABE, Masahiro)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：10379109