

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500090

研究課題名(和文) ネットワーク上の資源共用における情報の不完全性/非対称性を考慮した需給調整最適化

研究課題名(英文) Optimization of supply and demand coordination based on incomplete and asymmetric information in resource sharing on the network

研究代表者

内田 真人(Uchida, Masato)

千葉工業大学・工学部・准教授

研究者番号：20419617

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：近年、個別の利用者がネットワーク上に提供する資源を不特定多数の利用者間で共用するシステム形態が注目されている。このようなシステム形態の代表例には、P2Pデータストレージシステムやコグニティブ無線ネットワーク等がある。本研究では、このようなシステムにおける特徴である、共用される資源の特性に関する情報の不完全性/非対称性を考慮した現実的で汎用的な需給関係モデルを構築した。さらに、最適化理論に基づいた数理的根拠を備えた資源配分調整手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：In recent years, there has been growing interest in systems for sharing resources, which were originally used for personal purposes by individual users, among many unspecified users via a network. Examples of such a system include P2P data storage system and cognitive radio network, etc. In this research, we built realistic and versatile model of supply and demand for those systems by taking incomplete and asymmetric information regarding characteristics about resources shared over those systems into consideration. In addition, we proposed mathematically-founded methods about supply and demand coordination for those systems based on optimization theory.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学，計算機システム・ネットワーク

キーワード：ネットワーク運用技術 新世代ネットワーク 資源共用

1. 研究開始当初の背景

ネットワークによるサービス提供の新しいパラダイムとして、これまで個別の利用者が所有し占有していた計算資源、記憶資源、通信資源、電力資源等を、ネットワークを介して他の利用者に提供し、不特定多数の利用者間で必要な時に必要な量だけオンデマンドに共用するシステム形態(図1参照)が注目されている。このようなシステム形態の代表例には、ネットワーク上に提供されたコンピュータ資源(計算資源や記憶資源等)を共用するP2Pシステムや、未使用の無線周波数資源を共用するコグニティブ無線、さらには、太陽光発電や自動車に搭載された蓄電池等の電力資源を共用することで一般家庭も電気供給者となり得る次世代送電網(スマートグリッド)等がある。高度で多様化された要求を許容することが求められる新世代ネットワークでは、上記の事例のようにオープン化、双方向化、分散化されたシステム形態による資源の共用が一般的かつ大規模に展開されるものと考えられる。我が国においても、「平成22年版情報通信白書」(2010年7月、総務省)や「我が国の中長期を展望した科学技術の総合戦略に向けてーポスト第3期科学技術基本計画における重要政策ー」(2009年12月、総務省)の中で、従来とは全く異なる形態に基づいた情報通信システムの利活用の促進は、我が国の持続的な経済成長や環境・エネルギー問題等の社会問題の解決という観点から、今後優先的に対応すべき重要な政策課題として位置付けられていた。

このようなシステム形態は、個別の利用者が占有した状態では十分に活用されていなかった資源を複数の利用者間で共用することで、サービスの高機能化、高性能化を目指すものであるが、その一方で、独立した個別

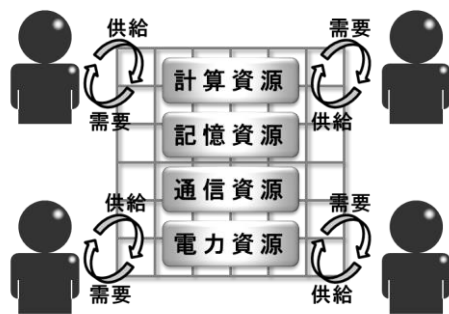


図1: 不特定多数の利用者間での資源共用



図2: 利用者と運用者間の情報分布

の利用者の意向によりネットワーク上に提供される資源の特性が変動するという特徴を持つ。そのため、ネットワークを管理する運用者や、それに参加する全ての利用者が、提供された資源の特性について「同じ」情報を「正しく」共有することが困難な場合がある。すなわち、資源の特性に関する情報には、運用者のみが保有できる情報、利用者のみが保有できる情報、両者とも保有できない情報、などがあり、システム運用上の制約等から、あらゆる情報を両者が把握できるとは限らない。このような情報の不完全性や非対称性(図2参照)は、資源共用における効率性や公平性を実現する上で問題となる。そのため、このようなシステム形態において、ネットワーク上に提供される資源の量や質が変動し、かつ、その情報が不完全/非対称であるという環境においても不特定多数の利用者による資源共用を効率化・公平化することのできる資源配分調整手法は非常に重要であった。

2. 研究の目的

本研究では、これまで特定の利用者が所有し占有していた計算資源、記憶資源、通信資源、電力資源等を、ネットワークを介して不特定多数の利用者間で共用するという、情報ネットワークにおける新たなパラダイムに基づくシステム形態に着目し、それに内包する共通の問題である、提供・共用される資源の特性に関する情報の不完全性/非対称性を考慮した現実的で汎用的な需給関係モデルを構築することを目的とした。さらに、高度で多様な要求を許容した上で、この資源共用を効率化・公平化するために、数理的根拠を備えた資源配分調整手法を提案し、計算機実験により評価することとした。これにより、新世代ネットワークに対応した新たな制御原理の確立を目指した。

3. 研究の方法

情報の不完全性/非対称性や、取引主体が持つ要求の多様化を考慮したネットワーク上での資源共用の最適化に関する基礎理論を構築するために同時並行的に2つの課題に取り組んだ。課題アでは、いくつかの代表的なシステムに関する実データ等に基づいた現実的な需給関係モデル、及び、それらに共通する特徴を反映した汎用的な需給関係モデルを検討した。課題イでは、課題アで検討した需給関係モデルについて、システム運用者主導型(図3参照)、及び、システム利用者主導型(図4参照)の需給関係調整手法を検討した。

課題ア: 資源取引における情報の不完全性/非対称性を考慮した汎用的な需給関係モデルの検討

- 個別の利用者がネットワーク上に提供する資源を不特定多数の利用者間で共用するという特徴をもった代表的なシ

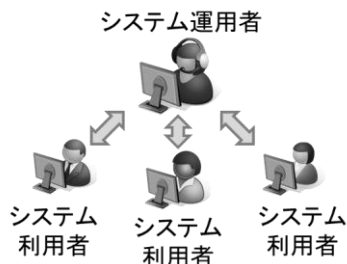


図3:システム運用者主導型

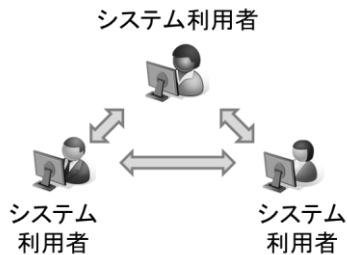


図4:システム利用者主導型

システム (P2P システム, コグニティブ無線ネットワーク等) のいくつかについて、資源取引における情報の不完全性/非対称性を考慮した現実に即した需給関係モデルを構築する。

- 上記の代表的なシステムにおける固有の特徴に依存しない汎用的な需給関係モデルを構築するために、情報の完全性や対称性が保証されないシステム形態における資源共有の特徴を分析し、それらの共通点を抽出する。
- 上記で抽出された共通点を反映した汎用的な需給関係モデルの枠組の構築について検討する。また、この枠組を踏まえ、本研究で対象とするシステム形態による資源配分において、効率性・公平性を考慮したシステム運用方法や、それを実現するために必要となる共有すべき情報の種類や粒度についても検討する。

課題イ：資源の取引主体が持つ要求の多様性を考慮した需給関係の調整手法の検討

- 情報の不完全性/非対称性を考慮した需給関係モデルにおける資源配分の決定問題を、取引主体 (システムの運用者及び利用者) からの多様な要求に対応した複数の目的関数と複数の制約集合からなる最適化問題として定式化し、これを解くためのシステム運用者主導型の需給関係調整手法について検討する。
- 上記で定式化した最適化問題を、システム利用者主導型の需給関係調整手法を実現するために適した形式に再定式化する。
- 上記で再定式化した最適化問題について、システム利用者主導型の需給関係調整手法を実現するための最適化アルゴリズムを提案する。提案アルゴリズムについては、その特性の数理的証明による

解明を目指すと共に、計算機実験による評価を行い、その有用性を検証する。

4. 研究成果

4. 1. P2P データストレージシステムにおける需給関係モデルの構築

4. 1. 1. 各年度の研究成果

不特定多数のユーザが、自身の所有する記憶資源 (ストレージ) の未使用領域の一部を共用するという P2P データストレージシステムを対象として、ストレージ領域の取引に関する需給関係を表現した現実的なユーザ行動モデルについて検討した。

P2P データストレージシステムに関する先行研究では、個別のユーザがネットワーク上に提供したストレージ領域を不特定多数のユーザ間で共用することを「仮想的な市場におけるネットワークを介したストレージ領域の取引」に見立て、その取引に関する需給関係を表現したユーザ行動モデルを提案している。ところが、先行研究のモデルでは、取引するストレージ領域に対するユーザの需要関数、及び供給関数を、いずれも仮想的な市場におけるストレージ単価のみにより決定される関数、すなわち、ユーザが所有しているストレージ装置の利用状況には依存しない関数として定義しており現実性を欠いていた。また、この仮想的な市場におけるストレージ単価がどのように決定されるかについての説明もなされていなかった。

そこで本研究では、ユーザが所有しているストレージ装置の利用状態や「現実の」市場におけるストレージ装置の価格体系を勘案した現実的な需要関数、及び供給関数をモデル化すると共に、その平均特性について考察した。その際、情報機器を含む様々なジャンルの商品を比較することのできるサービスを提供している Web サイトである価格.com における商品情報を参考にした。

平成 23 年度は、まず、従来研究において用いられていた需要関数、及び供給関数におけるパラメータ (価格閾値、価格弾力性) を価格.com における公開データに基づき決定する方法について検討した。価格閾値については、価格.com に掲載された商品情報から、ストレージ装置の最小単価と最大単価を調査し、この単価に基づき価格閾値を決定できることを示した。また、ストレージ装置の容量と、そのストレージ装置の現実の市場における単価 (すなわち、ストレージ装置を現実の市場で取得した際の単価) との間にはベキ乗則の関係があることを明らかにし、この関係から価格弾力性を合理的に決定できることを示した。

さらに、ユーザが所有しているストレージ装置の利用状況が、需要関数、及び供給関数に与える影響について検討した。その結果、供給関数における最低価格閾値は、ユーザが所有するストレージ装置の空き容量に依存する関数として定義できることを明らかに

した。また、需要関数における最高価格閾値、及び価格弾力性は、ユーザが自身の所有するストレージ装置に加えて必要とする容量に依存する関数として定義できることを明らかにした。

以上により構築した需給関係モデルは、ユーザが所有しているストレージ装置の利用状況や、現実の市場におけるストレージ装置の価格体系などのように、資源取引の際にユーザが把握している情報を考慮したものであり、従来モデルに比べて、ユーザの需要関数、及び供給関数をより現実的なものに改善することができた。

次に、平成 24 年度は、P2P データストレージシステム上での資源取引におけるマクロ的（平均的）な需給関係を表現できるユーザ行動モデルについて検討した。この結果、平成 23 年度に検討したユーザ単位でのミクロ的な需給関係モデルでは表現できなかったシステム全体における需給関係の挙動を、本研究で対象とするシステム形態に対して広く適用できる汎用的な計算手続によってモデル化するための基本的な枠組を構築することができた。

最後に平成 25 年度は、これまでに検討してきた供給関数、及び需要関数に基づき、P2P データストレージシステムの平均的な挙動を数値評価した。この評価にあたっては、P2P データストレージシステムを維持するためのインセンティブを生み出す方策として従来研究で提案されていた、Symmetric Scheme（以下、SS 法）と、Profit-Oriented Pricing Scheme（以下、PS 法）を比較対象とした。SS 法は、各ユーザに対して、自身が利用するストレージ領域よりも大きい（あるいは、少なくとも同量の）ストレージ領域をシステムに提供することを義務付けるという方策である。また、PS 法は、オペレータが事業として P2P データストレージシステムを独占的に運営・管理し、各ユーザがシステム上のストレージ領域を使用する際に支払う料金の単価と、各ユーザが自身のストレージ領域を提供する際に受取る代価の単価を決定するという方策である。数値評価の結果、SS 法よりも PS 法の方が社会的厚生観点から優れるものの、ユーザの効用が過度に低くなる（オペレータの収益が過度に高くなる）という問題があることが分かった。

4. 1. 2. 全体のまとめと今後の課題

本研究では、P2P データストレージシステムにおける需給関係を表現したユーザ行動モデルについて検討した。具体的には、まず、価格.com に掲載されている商品情報に基づいたストレージ装置の価格体系モデルを構築し、それに基づいた価格閾値、及び価格弾力性の決定方法を提案した。また、先行研究で用いられていた供給関数、及び需要関数について、それぞれ、ユーザが所有するストレージ装置の空きストレージ容量、及び自身の

所有するストレージ装置の容量に加えて必要となる容量を考慮して改良した。さらに、改良された供給関数、及び需要関数を用いて数値評価を行い、P2P データストレージシステムを維持するためのインセンティブを生み出す方策として知られる SS 法と PS 法を社会的厚生の観点から比較した。今後の課題としては、ユーザの効用とオペレータの収益の間の公平性を考慮した方策を提案すること等が挙げられる。

4. 2. 多様な無線通信システム（コグニティブ無線ネットワーク、PLC、無線 LAN）上の資源取引における情報の不完全性／非対称性を考慮した通信制御手法の検討

4. 2. 1. 各年度の研究成果

本研究では、多様な無線通信システムにおける周波数資源、通信特性、及びトラフィック量の不完全性/非対称性を考慮した上で、その違いを活かした通信制御手法について検討を行った。

従来研究では、多数のユーザ通信を提供するために、複数の周波数資源を適切に使い分ける手法は提案されておらず、資源の不完全性や非対称性を考慮した手法はほとんど考慮されていなかった。そこで本研究では、利用する無線周波数資源の通信特性（通信範囲や通信速度）、及び通信方向の違いによるトラフィック量の非対称性を考慮した上で、効率的に資源を有効利用するための通信制御手法について考案し、提案を行った。

平成 23 年度は、自身の所有する周波数資源（チャンネル）の内、プライマリユーザが利用していない、つまりセカンダリユーザが利用可能なチャンネルを複数のノード間で共有するコグニティブ無線ネットワークシステムを対象とし、データ通信用のチャンネルを決定する手法を検討した。本研究で扱うモデルでは、各ノードが移動することを想定するため、利用可能なチャンネルに関する情報がプライマリユーザの時間的・空間的な利用状況に応じて各ユーザ間で変化する。提案手法では、これらの変化を考慮してデータチャンネルを選択するため、従来のチャンネル選択手法に比べて、統計的な利用状況とリアルタイムな利用状況の双方を考慮したチャンネル選択を実現した。

次に、平成 24 年度は個々の利用者が無線周波数資源を不特定多数のプライマリユーザとセカンダリユーザ間で共有するコグニティブ無線ネットワークを対象とし、周波数資源の需給関係を調整するチャンネル選択手法の拡張を行った。この結果、平成 23 年度に検討した限定的なユーザ行動（移動）パターンにおける需給関係の挙動を、汎用的なユーザ行動パターンに対応可能な手法に拡張し、基礎評価を通じて手法の汎用性向上を確認した。加えて、トランスポート層で扱うデータと ACK のトラフィック量、及び要求条件の非対称性に着目し、広帯域 PLC と狭帯域 PLC

の特性を活用する手法を提案し、有効性を明らかにした。

最後に平成 25 年度は、平成 24 年度に着目した、トランスポート層のデータと ACK のトラヒック量、及び要求条件の非対称性に着目し、この需給関係を調整するアクセスネットワーク選択手法の拡張を行った。この結果、平成 24 年度に検討した限定的なネットワーク環境における需給関係の挙動を、PLC と無線 LAN という汎用的なアクセスネットワークに対応可能な手法に拡張し、基礎評価を通じて手法の汎用性向上を確認した。その後、より現実的なネットワーク環境を考慮し、双方向フローの混在や、他のクロストラヒックが混在した際の最適化手法に関する検討を行っており、今後、国際会議において研究成果を報告する予定である。

4. 2. 2. 全体のまとめと今後の課題

本研究では、主に二つの課題に着目した。(1) 将来のコグニティブ無線ネットワークシステムに着目し、無線周波数資源(チャネル)の需給関係を考慮したチャネル選択手法、(2) トランスポート層のデータと ACK のトラヒック量と要求条件の非対称性に着目し、トラヒック量の需給関係を考慮した異種無線ネットワークの活用方法、を提案した。この結果より、多様な無線通信システム上の資源共有のための情報の非対称性、不完全性に着目した需給調整のための最適化手法について検討/提案した。より汎用的な需給関係を考慮した最適化システムの提案については今後の課題とする。

4. 3. 資源の取引主体が持つ要求の多様性を考慮した需給関係の調整手法の検討

4. 3. 1. 各年度の研究成果

本研究では、情報の不完全性/非対称性を考慮した需給関係モデルにおける資源配分の決定問題を、システム運用者及び利用者からの多様な要求に対応した複数の目的関数と複数の制約集合からなる最適化問題として定式化し、これを解くための需給関係調整手法について検討を行った。

平成 23 年度では、システム運用上、必ず満たさなければならない制約集合に属し、かつ、システム利用者からの多様な要求を満たす多くの候補解の中で、システム利用者がシステムを利用することで得ることのできる総満足度を最大化できる(一意な)最適解を見つけるための、システム運用者主導型の制御手法を考案した。また、本手法が最適解へ収束することを保証するための条件を理論的に与えた。システム運用者は、この収束条件を満たすように制御手法を容易に実装することができ、その結果、システム運用者は、最適解を見つけることが可能となる。

平成 24 年度では、平成 23 年度に検討した最適化問題が、各システム利用者のもつ目的関数と制約集合から成る部分最適化問題の

合成として表現できることを明らかにした。この結果により、平成 23 年度で得られたシステム運用者主導型の制御手法をシステム利用者主導型の制御手法へ発展させるための検討を行うことが可能となった。

平成 25 年度では、平成 24 年度で定式化した最適化問題について、システム利用者主導型の需給関係調整手法を実現するための最適化アルゴリズムを提案した。また、提案アルゴリズムが、ある条件の下で最適解に収束することを数理的に証明した。システム利用者は、アルゴリズム実装前に、この収束条件を満たす状況を容易に準備することができる。具体的に、情報の不完全性/非対称性を考慮した需給関係モデルにおける帯域幅資源配分の決定問題を考察し、提案アルゴリズムの計算機実験による評価を行った。この実験により、提案アルゴリズムの安定性と高速収束性を示すことができた。

4. 3. 2. 全体のまとめと今後の課題

本研究では、情報の不完全性/非対称性を考慮した需給関係モデルにおける資源配分最適化問題を考察し、その問題を解くためのシステム運用者主導型の需給関係調整手法及びシステム利用者主導型の需給関係調整手法を考案した。本提案手法は、ある条件の下で最適解に収束することが数理的に保証されている。今後は、本手法を計算資源、記憶資源、通信資源、電力資源といった資源配分問題に適用し、より高速に最適解を近似することができる最適化アルゴリズムの開発を行う必要がある。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① H. Iiduka, "Distributed Iterative Methods for Solving Nonmonotone Variational Inequality over the Intersection of Fixed Point Sets of Nonexpansive Mappings," Pacific Journal of Optimization, to appear. (査読有)
- ② H. Iiduka, "Fixed Point Optimization Algorithms for Distributed Optimization in Networked Systems," SIAM Journal on Optimization, Vol. 23, No. 1, pp. 1-26, January 2013. (査読有)
- ③ H. Iiduka, "Multicast Decentralized Optimization Algorithm for Network Resource Allocation Problems," Journal of Nonlinear and Convex Analysis, Vol. 14, No. 4, pp. 817-839, October 2013. (査読有)
- ④ J. Shimada, H. Tamura, M. Uchida, and Y. Oie, "Node Degree Based Routing Metric for Traffic Load Distribution in the Internet," IEICE Transactions on Information and Systems, Vol. E96-D,

No. 2, pp.202-212, February 2013. (査読有)

- ⑤ M. Takaoka, M. Uchida, K. Ohnishi, and Y. Oie, "A generalized diffusion-based file replication scheme for load balancing in P2P file-sharing networks," International Journal of Grid and Utility Computing, Vol.3, No.4, pp.242-252, 2012. (査読有)
- ⑥ H. Iiduka, "Iterative Algorithm for Triple-Hierarchical Constrained Nonconvex Optimization Problem and Its Application to Network Bandwidth Allocation," SIAM Journal on Optimization, Vol. 22, No. 3, pp. 862-878, July 2012. (査読有)

[学会発表] (計5件)

- ① 内田 真人, 飯塚 秀明, 杉野 勲, "P2P データストレージシステムにおける需給関係の平均モデル," 電子情報通信学会 コミュニケーションクオリティ研究会, 信学技報 Vol.113, No.293, pp.19-24(CQ2013-54), 2013年11月14-15日(福江文化会館, 長崎県五島市).
- ② A. Muniz, K. Tsukamoto, K. Kawahara, M. Tsuru, Y. Oie, "Cooperative Transmission Scheme Between PLC and WLAN to Improve TCP Performance," The 2013 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PACRIM), CD-ROM, Victoria, Canada, August 2013.
- ③ M. Mizutani, M. Shibata, K. Tsukamoto, M. Tsuru, and Y. Oie, "A Broad/Narrow PLC dual channel system improving TCP throughput," Proc. of 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (PowerEng2013), CD-ROM, May 2013.
- ④ 内田 真人, 飯塚 秀明, 杉野 勲, "依頼講演: P2P データストレージシステムにおける需給関係のマクロモデル," 2013年電子情報通信学会総合大会, BS-9-5, 2013年3月19-22日(岐阜大学, 岐阜県岐阜市).
- ⑤ 中野 栄俊, 江口 真央, 塚本 和也, 鶴正人, "コグニティブ無線車車間通信におけるチャネル切替時中断を考慮したデータチャネル選択," 電子情報通信学会 技術研究報告, AN2011-91, pp. 141-146, 情報通信研究機構小金井, 2012年3月.

[その他]

内田真人:

<http://www.uchida-lab.com/>

飯塚秀明:

<http://www.mo.cs.meiji.ac.jp/iiduka/default>

塚本和也:

<http://infonet.cse.kyutech.ac.jp/~kazuya/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内田 真人 (UCHIDA, Masato)
千葉工業大学・工学部・准教授
研究者番号: 20419617

(2) 研究分担者

飯塚 秀明 (IIDUKA, Hideaki)
明治大学・理工学部・准教授
研究者番号: 50532280

(3) 連携研究者

塚本 和也 (TSUKAMOTO, Kazuya)
九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授
研究者番号: 20452823