

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 5 日現在

機関番号：17104

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2012

課題番号：24650030

研究課題名（和文） フェアネス理論に基づく高度中継ルータによるネットワーク資源制御

研究課題名（英文） Fairness theory for network resource control by intelligent routing

研究代表者

ケッペン マリオ (KOEPPEN MARIO)

九州工業大学・ネットワークデザイン研究センター・教授

研究者番号：90525065

研究成果の概要（和文）：ネットワーク制御およびネットワークフェアネスの設計について、一般的なアプローチの観点から、ネットワークモデルに関する検討、インテリジェントルータの概念設計およびプロトコルの考察、インテリジェントルータの制御に関する検討、ネットワークフェアネスの数学的考察を行った。また、メタヒューリスティクス手法の開発について、ネットワークフェアネス関係に基づくメタヒューリスティクス手法の開発、進化的計算手法における考察、計算論的効率の検討を行った。さらに、ワイヤレスチャンネルアロケーション問題についてオープンアクセス可能なベンチマークテストによって、提案手法の有効性を検証した。これにより、パラボリックフェアネスのためのメタヒューリスティクスアルゴリズムについて、ネットワークシミュレータを用いた実験環境において実験的なプロトタイプを設計できた。

研究成果の概要（英文）：The problem definition and characterization stage of intelligent routing of first workpackage has been absolved. The work continued on the provision of meta-heuristic methods, including the Multi-Attribute Secretary Problem (MASP) search algorithm. New formal concepts of fairness, extending proportional fairness have been presented. The concept for validation experiments has been developed. An open accessible benchmark on wireless channel allocation problems was introduced. An experimental prototype was installed for an available network simulation platform.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	1,000,000	300,000	1,300,000

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：ネットワークプロトコル，ネットワークデザイン

1. 研究開始当初の背景

今日我々は日常生活で様々な通信ネットワークサービスを利用しており、社会・経済が強くそれに依存している。そのため、インターネット等の大規模ネットワークの利用は際限なく増加し、安定利用のためには、ネットワーク資源利用の効率化が急務である。一方、ネットワーク上で資源を共有する多数のユーザの環境（エンド端末や無線）や利用

するアプリケーションサービスは、ネットワークへの要求性能や発生する通信トラヒックのパターンにおいて極めて多様であり、それを考慮しない資源制御ではサービス品質が著しく低下する恐れがある。そして、「資源利用の全体効率」と「各ユーザ（アプリケーション）の獲得性能」の2つは一般に相反する指標である。

この2つの指標の適切で安定した balan

スを実現するには、基本的に個々の通信フローの送信レートとそのフローが通過する経路の動的な制御が重要である。しかし、旧来のエンド端末間のプロトコル(TCP等)のみによる送信レートの制御やネットワーク内の中継ルータのみによる経路の制御では十分に対応できないことが認識され、送信レートの調整に高度なルータ(「インテリジェントルータ」)が介在したり、経路の決定にエンド端末が介在したり、さらにはそれらが連携したりする手法等が、新世代インターネットに向けて研究されている。特に、2つの指標のトレードオフに関しては、「フェアネス(fairness)」の概念を使った定式化や分析、制御が研究されている。例えば、ボトルネックを共有する複数の通信フローの送信レートに関してフェアネス理論を用いたエンド端末間のプロトコル設計の先駆的な研究がある。また、ネットワーク全体の個々の通信フローに対する与えられた経路上での静的送信レート割当て問題における max-min フェアネスの実現には、Progressive Filling アルゴリズムがある。しかしながら、大規模ネットワークにおいて、フェアネス理論に基づく、資源利用の全体効率と各ユーザの獲得性能のバランスを意図的に効率よく制御するための枠組みは未だ存在しない。その原因の1つは従来のフェアネス理論のアルゴリズムが、集中形計算向きであり、また計算時間などのコストと制御の効果とのトレードオフを柔軟に扱うことができない点にある。

そこで、この問題を解決するために、数理経済分野に着想を得て、新たなネットワークフェアネスの概念設計を行う。着想を得た鈴木らの最近の研究は関係ベースの数学モデルであり、本研究ではこれを拡張し、右図に示すように、ソーシャル選択、最適化、アルゴリズム、関係の4点について数学モデルを提案し、ネットワーク制御の設計に応用する。この枠組みは、選択肢の異なるモダリティ間の同時存在とそれらの関係を数学的に定義できる。

2. 研究の目的

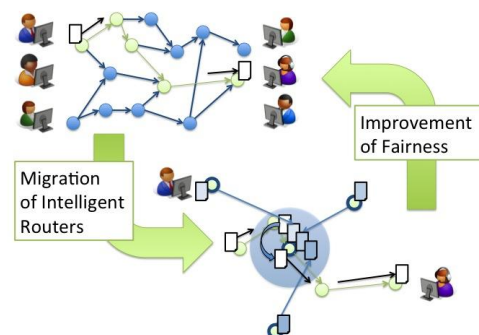
通信ネットワークのトラフィック制御において、資源利用の全体効率と各ユーザ(アプリケーション)の獲得性能という2つの指標のトレードオフを柔軟に制御可能な枠組みを、フェアネス理論に基づき構築する。特に、応募者が考案したパラボリックフェアネスの概念を活用・拡張し、ユーザ端末とインテリジェントルータが連携する分散的・適応的な手法によって、指標間のバランスを制御する。そのために、概念・モデル・プロトコルの開発・拡張、適合するメタヒューリスティクスアルゴリズムの開発、ネットワークシミュレータを用いた実験、有効性の実験的検証を行う。

3. 研究の方法

本研究は、大規模パケット通信ネットワークを想定したトラフィック制御(通信フローの送信レートや通過する経路の制御)を対象とし、資源利用の全体効率と各ユーザの獲得性能のバランスを意図的に効率よく実現するための関係性フェアネス理論が斬新であり、関係性フェアネス理論に基づくエンド端末とインテリジェントルータの連携によるネットワーク制御の枠組みの構築を目指す点がチャレンジ性を有している。特に、「資源利用の全体効率」と「各ユーザ(アプリケーション)の獲得性能」という一般に相反する指標に関して、数理経済分野に着想を得て、新たなネットワークフェアネスの概念設計を行う点が新しい原理の発展につながり、成功した場合には、新たなネットワーク資源制御による高度知的ルータに応用可能である。

応募者は、これまでに関係性フェアネスに基づく資源共有に関して多くの考察(研究業績参照)を得ており、最近の研究成果において、パラボリックフェアネスという数学モデルを提案したが、これは、Progressive Filling に代わる max-min フェアネスの実現手法になり、また分散形計算と相性がよい。パラボリックフェアネスに基づく通信フローの送信レート制御においては、送信レートの単純な加重和を指標とし、1番大きな送信レートには1番小さな重み、2番目に大きな送信レートには2番目に小さな重み、1番小さな送信レートには1番大きな重みを付して計算する。これまでの研究から以下の特長が得られている。

- 重みの増加が指数関数的ならば、その指標を最大にする状態は max-min フェアネスである、
- その指標の向上は max-min フェアネス状態を近似できる、
- 異なる加重での指標を比較することで資源共有の強さに関する情報を得ることができる、
- 特別に設計されたメタヒューリスティクスアルゴリズムはこの指標の向上に効果的。



そこで、出発点として、パラボリックフェアネスに基づく送信レート制御を、エンドツーエンドのユーザ端末と、複数の通信フローの監視や制御を行うインテリジェントルータとの連携によって分散的に実現する方式を確立する。また、フェアネス指標（制御の効果）の向上に、高度なヒューリスティクスとメタヒューリスティクスアルゴリズム[4]を適用する。それに基づき、計算時間やインテリジェントルータの配備等と制御の効果とのトレードオフを柔軟に扱える枠組みの確立を目指す。さらに、それによって様々な時間粒度における制御の適切な組み合わせも模索する。同様に、フェアネス理論に基づく経路制御についても検討する。フェアネス理論に基づくトラフィック制御は、極端なアンバランスを未然に防ぐ能力を自ら備えていることが期待でき、それによって想定外の異常なトラフィック状態が発生したときにも決定的な破綻（カタストロフィ）を回避する堅牢性が実現できる可能性があり、その調査も行う。

これらのために、概念・モデル・プロトコルの開発・拡張、適合する新たなメタヒューリスティクスアルゴリズムの開発、ネットワークシミュレータを用いた実験、有効性の実験的検証を行う。

4. 研究成果

(1) The problem definition and characterization stage of intelligent routing of first work package has been absolved. Main result was that the primary focus should be given on the realized concepts of optimality and the needed exact or heuristic algorithms. The work continued on the provision of suitable meta-heuristic methods. A multi-objective optimization procedure inspired by the famous secretary problem from optimal stopping theory was developed. The proposed algorithm is designed to be applied to multi-attribute decision making problems that require fair solutions. Two fairness relations were considered, namely maxmin fairness and proportional fairness, and the evaluation was performed for the problem of wireless channel allocation. The performance was compared to random search, and the quality of the solution is measured with respect to the distance to the results obtained with brute-force in the whole space search. Results showed that the proposed algorithm, compared to random search, could cover a much larger portion of the search space for

the same number of pairwise comparisons.

(2) New formal concepts of fairness, extending proportional fairness, have been presented. Proportional fairness is a concept from resource sharing tasks among n users, where each user receives at least $1/n$ of her or his total value of the infinitely divisible resource. An approach to proportional fairness was provided that allows its extension to discrete domains, as well as for the direct application of evolutionary computation to approximate proportional fair states. The concept of relational optimization was employed, where the optimization task becomes the finding of extreme elements of a binary relation, and defines a proportional fairness relation correspondingly. By using a rank-ordered version of proportional fairness, the so-called ordered proportional fairness, the active finding of maximal proportional fair elements by evolutionary meta-heuristic algorithms could be improved. This was demonstrated by using modified versions of the Strength Pareto Evolutionary Algorithm (version 2, SPEA2) and Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO). In comparison between proportional and ordered proportional fairness, and by using relational SPEA2, the evolved maximum sets of ordered proportional fairness achieved 10% more dominance cases against a set of random vectors than proportional fairness.

(3) In the relational approach to fairness, fairness is considered as a social choice that coincides with the maximum set of a fairness relation. The further application of this approach to achieve general fairness in collaborative systems was studied. The approach was based on posing additional conditions on the fairness relation based on representation of collaboration among agents by a social graph, and various social types of agents. Such relation can be used for the formal analysis of various collaboration scenarios by justifying tractable sizes of maximum sets of corresponding collaborative fairness relations. As an example result, the introduction of cliques of larger size appears to be in favor of achievability of collaborate

fairness.

(4) The concept for validation experiments has been developed. An open accessible benchmark for the performance evaluation of heuristic and meta-heuristic approaches to fair distribution of indivisible goods was developed. The specific problem reflected by the benchmark data sets is Wireless Channel Allocation (WCA), and the approach to fair distribution is to choose from feasible allocations by the maximum set of a fairness relation between their corresponding allocation performances. The effort for exhaustive search for such maximum sets is rapidly increasing and even problems with 10 users may already be beyond today's computing capabilities. The results for up to 7 users were calculated including a discussion of some general aspects of using fairness relations in the prescribed manner, also indicating the efficiency of the approach in terms of establishing rather small maximum sets with much overlap of maximal elements among different fairness relations.

(5) An experimental prototype of a network simulation platform for approximating resource requests was installed. The purpose was to study the efficiency of procedures to map a demand vector to a feasible resource allocation in a fair manner. The maximality concept of a relation was applied to the approximation problem by separating it into two independent sub-problems. The first sub-problem is to gather a set of efficient system allocations by maximizing majorities. Due to computational complexity, an online meta-heuristic search algorithm handled the task. At each timeframe the system exposes a number of candidate allocations for mapping user demands. The second sub-problem, given a current demand vector, is a fair selection among the currently exposed candidate allocations. Among the per-user demand-degradation vectors for all candidates, maximal vectors according to a fairness relation were selected. This approach was studied in the low mobility core of a wireless broadband architecture. The approach allows comparing among different fairness models. Actual demand that was not fulfilled reappeared in the

next timeframe of the simulation, thus the related uplink traffic would stay longer in the system. Then, by delay minimization a specific fairness model for system operation could be chosen.

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) Mario Koeppen and Kaori Yoshida and Kei Ohnishi and Masato Tsuru, Meta-heuristic approach to proportional fairness, Evolutionary Intelligence, 査読あり, Vol.5, No.4, 2012, 231-244

[学会発表] (計4件)

- (1) Rodrigo Verschae, Mario Koeppen and Masato Tsuru, A Benchmark for Evaluating Approximated Algorithms for Fair Wireless Channel Allocation, INCoS 2012 - Fourth International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems, 2012年09月19日~2012年09月21日, Bucharest, Romania
- (2) Mario Koeppen and Rodrigo Verschae and Masato Tsuru, INCoS 2012 - Fourth International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems, 2012年09月19日~2012年09月21日, Bucharest, Romania
- (3) Mario Koeppen and Rodrigo Verschae and Masato Tsuru, MASP - A Multi-Attribute Secretary Problem Approach to Multi-Objective Optimization with Fair Decision Maker, ICGEC 2012 - Sixth International Conference on Genetic and Evolutionary Computing, 2012年08月25日~2012年08月28日, Kitakyushu, Japan
- (4) Mario Koeppen, Kaori Yoshida, Rodrigo Verschae, Masato Tsuru and Yuji Oie, Comparative Study on Meta-heuristics for Achieving Parabolic Fairness in Wireless Channel Allocation, 2012 IEEE/IPSJ 12th International Symposium on Applications and the Internet, 2012年07月16日~2012年07月20日, Izmir, Turkey

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

ケッペン マリオ (KOEPPEN MARIO)
九州工業大学・ネットワークデザイン研究
センター・教授

研究者番号：90525065