

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月21日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22500053

研究課題名（和文）ネットワーク同定における確率論的手法と決定論的手法の相補的融合

研究課題名（英文）Complimentary Use of Deterministic and Stochastic Methods in Network Tomography

研究代表者

塩田 茂雄 (SHIODA SHIGEO)

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70334167

研究成果の概要（和文）：獲得可能な部分情報から通信ネットワークを可視化して、モデリング、性能評価、もしくは情報処理を行う際に、確率論的手法と決定論的手法を相補的に利用する方法論を具体的な事例に即して確立した。具体的な研究対象は以下の通り：(1) 次数対列を再現する単純グラフの存在性と構成法、(2) マルコフネットワークの提案とインターネットトポロジ分析への応用、(3) フレーム送信サイクルの考え方に基づく非飽和 IEEE802.11e EDCA 無線 LAN の性能評価手法、(4) バイナリセンサによる対象物形状推定技術。

研究成果の概要（英文）：The deterministic and stochastic approaches to the modeling, performance analysis, or information processing are studied in the field of telecommunications, and several results are obtained in the following subjects: (1) Deterministic construction of a simple graph having a given joint degree sequence, (2) Modeling of correlated random networks and its application to the analysis of the Internet topologies, (3) Analytical model for IEEE 802.11e EDCA with non-saturated stations, (4) Estimating parameters of target objects using networked binary sensors.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：通信ネットワーク

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：性能評価、ネットワーク同定、センサ、複雑ネットワーク、無線 LAN

1. 研究開始当初の背景

信頼性の高い情報基盤として通信ネットワークを安定的に運用するために、測定により通信ネットワークの状態を推定・把握しつつ、必要なアクション（設計・制御）を実施する技術は、重要な研究課題の一つである。コスト的・技術的制約から現実の測定系で収集できる情報量には限界があり、情報は部分

的にしか獲得できないこと、従って部分情報からネットワークを同定する方法論が必要であることが共通に認識されている。

部分情報に基づくシステムの同定には、これまで主として確率論的手法が用いられてきた。確率論的手法は、仮定する確率法則のもとで最も確からしい推定値を知ることが可能とするが、仮定する確率法則の正当性が

保証されない場合は、その信頼性に問題が生じる。また、確率論的手法では得られた情報を（平均、分散等の）少数のパラメータに縮約するため、測定によって得られた情報を十分に活かすことができない。

確率論的手法とは対照的なシステム同定のアプローチに決定論的手法がある。決定論的手法は、システムを支配する確率法則が未知の場合に有用である。決定論的手法では、獲得できる情報の質・量が精度を決定する。近年の測定系の進歩により、システムに関する詳細な情報が取得できるようになったことから、今後、決定論的なシステム同定が利用可能なケースが増えていくと考えられる。

2. 研究の目的

測定限界の存在は不可避であり、それ故にシステム同定結果には本質的に誤差が内在する。本研究は、確率論的手法と決定論的手法を相補的に利用してシステム同定・性能評価を行うアプローチを具体的な事例に基づいて検討し、新たなシステム同定・性能評価手法として確立することを狙いとする。

3. 研究の方法

本研究では、具体的な検討対象を以下の4つに絞り、研究を進めた。

(1) 次数対列を再現する単純グラフの存在性と構成法

通信プロトコルの動作性能を確認するには、コンピュータ上でネットワークを仮想的に構築し、シミュレーションにより解析する方法が最も簡便である。そのためには、現実のネットワークのトポロジカルな特性を反映したネットワークを自在に生成する技術が必要となる。これまでに、次数列（次数分布）の再現を目的としたネットワーク生成法が幾つか提案されているが、次数列はネットワークのグラフ構造の特徴の一部にすぎず、次数列から特定されるグラフ構造には任意性が大きすぎる問題が認識されている。

リンクの両端のノードの次数のペアを次数対と呼び、ネットワークを構成する各リンクの次数対を並べたものを次数対列と呼ぶ。次数対列は次数列より多くの情報を含むため、次数対列から特定されるグラフ構造は次数列に比べて任意性が少ないと考えられる。本研究では、与えられた次数対列を再現するネットワークトポロジを決定論的に構築するアルゴリズムについて検討した。

(2) マルコフネットワークの提案とインターネットトポロジ分析への応用

次数対列は次数列よりも多くの情報を有するが、一意にネットワークトポロジを決定するだけの情報は持たないため、与えられた次数対列から特定されるグラフ構造（単純グ

ラフ）には依然として任意性が存在する。

決定論的な情報である次数対列に対応する確率論的な情報として次数相関が知られる。本研究では、次数相関を拡張した概念として、マルコフ性の概念を定義し、マルコフ性を満たすネットワークのトポロジカルな特徴を理論的に分析した。さらに、マルコフ性を要求することで、所与の次数相関（次数列）を再現するもっとも確からしいネットワークトポロジを一意的に構築する手法について検討した。

(3) フレーム送信サイクルの考え方に基づく非飽和 IEEE802.11e EDCA 無線 LAN の性能評価手法

無線 LAN のデータリンク層・物理層プロトコルの標準規格として IEEE802.11 が普及しており、その品質差異化機能追加版として IEEE802.11e EDCA が広く用いられている。無線 LAN の性能評価手法には多数の既存提案があるが、EDCA に適用できるものは少数であり、いずれも端末が飽和状態にある（送信待ちのフレームを常に所持している）ことを仮定している。しかし、現実には端末が飽和状態にあることは稀であり、非飽和端末が存在する EDCA ベースの無線 LAN の性能評価を行う手法の確立が望まれている。

本研究では、Tinnirello らが提案したフレーム送信サイクルの考え方をを用いた無線 LAN 性能評価モデルに着目し、非飽和端末を有する EDCA ベースの無線 LAN に適用できるように拡張した。

(4) バイナリセンサによる対象物形状推定技術

センサが取得した物理情報をセンサに搭載した通信機能を介して収集し、様々な分析や制御に用いるセンサネットワークが注目されている。これに関連して、複数のゲートウェイを広域に配置し、センサといずれか一つのゲートウェイを狭帯域ではあるが長距離の無線リンクにより 1 ホップで接続するセンサの収容形態が提案されている。この形態では安価な低機能センサを多数配置し、広域に情報収集する利用法が可能となる。

このような利用法の一例として、対象物を検知したか否かのみ通知するバイナリセンサを監視領域に多数配置して、領域を通過する対象物に関する情報を取得する用途を想定し、特に対象物の形状を推定する種々の技術について検討した。

4. 研究成果

(1) 次数対列を再現する単純グラフの存在性と構成法

次数対列を実現する単純グラフが存在するとき、次数対列はグラフ的であるという。

本研究では次数対列を再現する単純グラフの存在性に関する幾つかの定理を導くことにより、

- ① 与えられた次数対列がグラフ的であることを判定する高速アルゴリズム
- ② 与えられた次数対列がグラフ的であるときに、次数対列を再現する単純グラフを一つ生成する決定論的アルゴリズムを導出することに成功した。

なお、次数対列を再現する単純グラフは複数存在するため、現実のネットワークの部分情報として次数対列が得られたとしても、本研究で導出したアルゴリズムで生成された単純グラフが、現実のネットワークと同じトポロジを有する保障はない。このため、現実のルータレベルトポロジ、AS レベルトポロジの次数対列を求め、導出したアルゴリズムにより同じ次数対列を持つ単純グラフを生成し、それがルータレベルトポロジ、AS レベルトポロジに類似したトポロジカルな特徴を有するかを数値実験を通して調査した。その結果、再現精度は満足できるものではなく、より高い再現精度を求めるには、次数対列以外の情報が必要であることが確認された。

(2) マルコフネットワークの提案とインターネットトポロジ分析への応用

単純グラフのマルコフ性に関する定義を与えるとともに、マルコフ的な単純グラフのトポロジカルな性質について解析した。単純グラフがマルコフ的であれば、そのトポロジカルな性質は次数相関により全て定まることを示すと同時に、クラスタ係数と2次の assortativity に関する表式を導出した。

マルコフネットワークは次数相関を再現するグラフの中で最も確からしい（エントロピーが最も高い）グラフとなる。本研究では、次数相関（次数対列）の情報から、マルコフネットワークを確率論的に生成するアルゴリズムを合わせて提案した。

さらにルータレベルトポロジ、AS レベルトポロジがマルコフ的であるかどうかを数値的に確認した。具体的にはマルコフ性を仮定した場合のクラスタ係数と2次の assortativity を求め、その結果をルータレベルトポロジ、AS レベルトポロジのクラスタ係数（図1）、2次 assortativity（図2）と比較した。

その結果、ルータレベルトポロジ、AS レベルトポロジは必ずしもマルコフ的とは言えないこと、特にルータレベルトポロジはマルコフ性の予想から乖離したクラスタ係数、2次 assortativity を持つことが確認された。

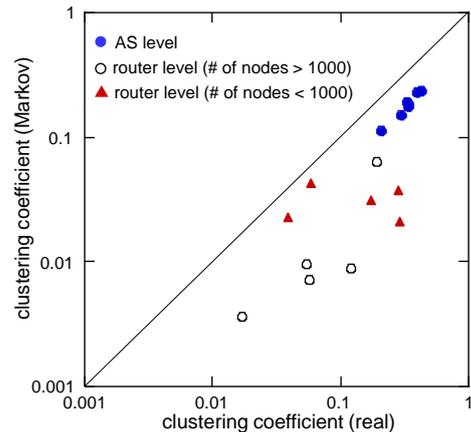


図1. マルコフグラフと実ネットワークの比較（クラスタ係数）

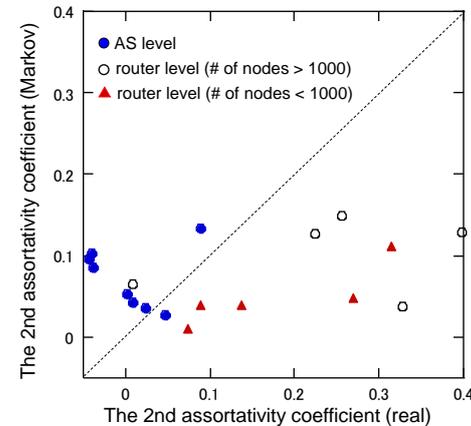


図2. マルコフグラフと実ネットワークの比較（2次 assortativity）

(3) フレーム送信サイクルの考え方に基づく非飽和 IEEE802.11e EDCA 無線 LAN の性能評価手法

フレーム送信サイクルの考え方に基づく EDCA ベース無線 LAN 性能評価モデルを提案した。提案モデルは飽和端末用のモデルを非飽和端末を有する無線 LAN にも適用できるように拡張したものである。単純な拡張を行うと、性能評価モデルが著しく複雑化するため、近似を適用してモデルの複雑化を回避した性能評価モデルも同時に提案した。

提案モデルの正確性を確認するため、音声通話を行う複数の端末とベストエフォートトラフィック（UDP）を送信する複数の非優先端末が一つの無線 LAN を共有する環境を想定して、シミュレーションとの比較を行い、提案モデルがシミュレーション結果（各端末のスループット等）を正確に再現することを確認した（図3）。

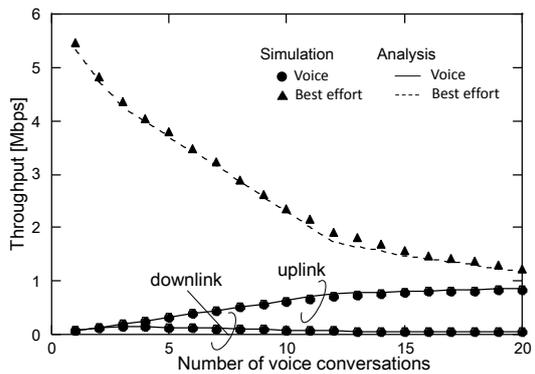


図 3. 提案性能評価モデルによるスループット評価結果

(4) バイナリセンサによる対象物形状推定技術

バイナリセンサは測位機能を通常持たないことから、各バイナリセンサで収集されたデータに位置属性をタグ付けすることはできない。この点に着目し、位置の不明な多数のバイナリセンサがセンシングする1ビット情報から、領域を通過する対象物の形状や個数を推定する手法について検討し、

- ① 単一凸形状物体の周囲長、面積の推定法
- ② 二つのバイナリセンサを棒の両端に配置した複合バイナリセンサによる複数の長方形もしくは円形対象物の個数、周囲長、面積の推定法
- ③ (並行な二つの線分上にバイナリセンサを配置した) 複合バイナリセンサによる単一多角形物体の内角、周囲長、面積の推定法
- ④ センサの散布密度が不明 (かつ非均一) なケースへの拡張

などの成果を得た。推定原理はいずれも積分幾何学の基本的な定理を用いたものであり、凸形状を持つ対象物やセンシングエリアに対して広く適用できる (一部の結果は非凸な形状に対しても適用可能)。全ての結果は、シミュレーションによって十分な精度を持つ得ることを確認している (図4は車両形状物体の周囲長と面積を、円形 (disk-shaped) のセンシングエリアを有するセンサと扇型 (circular-sector shaped) のセンシングエリアを有するセンサそれぞれで推定した結果を示したもの)。

タグ付けされない情報に基づいて形状推定を行う手法には (高密度でセンサを撒く必要がある、周囲長・面積以外の情報を収集することが困難、などの) 一定の限界があることから、監視領域を動き回るアンカーノードを利用して、バイナリセンサの位置を推定を行うとともに、位置推定値を用いて物体の形状推定を行うアルゴリズムについても検討し、一定の成果を得た。

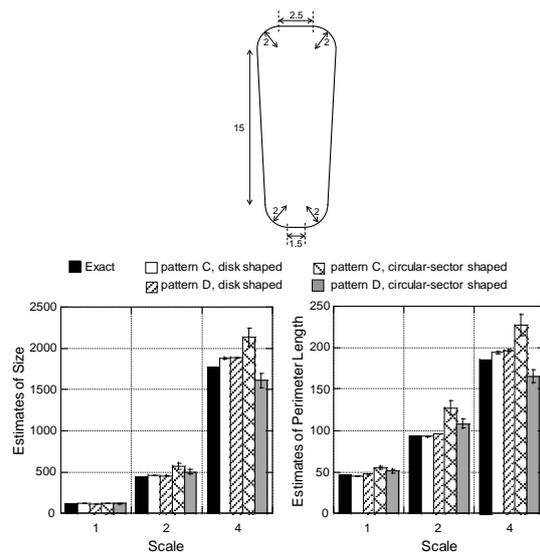


図 4. 車両形状物体の周囲長、面積推定結果

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

1. C. Huang and S. Shioda, "Analytical Model for IEEE 802.11e EDCA with Non-Saturated Stations," Proceedings of the IEEE IWCMC (International Wireless Communications and Mobile Computing Conference), 2013. <http://ieeexplore.ieee.org/>
2. C. Huang and S. Shioda, "Detailed Analysis for IEEE 802.11e EDCA in Non-Saturated Conditions - Frame-Transmission-Cycle Approach -," Proceedings of the WiOpt 2013 Workshop (International Workshop on Resource Allocation, Cooperation and Competition in Wireless Networks), 2013. <http://ieeexplore.ieee.org/>
3. S. Shioda, "Inner-Distance Measurement and Shape Recognition of Target Object Using Networked Binary Sensors," Proceedings of the The Ninth International Workshop on Heterogeneous Wireless Networks (IEEE HWISE 2013), 2013. <http://ieeexplore.ieee.org/>
4. S. Shioda and T. Hayashi, "Inner-distance-based shape recognition of target object using binary sensors," Proceedings of the IEEE ICPADS, 2012. <http://ieeexplore.ieee.org/>
5. 黄重陽, 塩田茂雄, "マルコフ連鎖と待ち行列モデルを組み合わせた無線 LAN 用性能評価モデル," 電子情報通信学会論文誌, vol. J95-B, no. 2, pp. 119-129,

2012.
<http://search.ieice.org/bin/index.php?category=B&lang=J&curr=1>
- 山下賢也, 塩田茂雄, 斎藤洋, "センサ密度が未知のバイナリセンサネットワークによる対象物形状推定," 電子情報通信学会論文誌, vol. J95-D, no. 1, pp. 54-66, 2012.
<http://search.ieice.org/bin/index.php?category=D&lang=J&curr=1>
 - H. Saito, S. Shimogawa, S. Tanaka, and S. Shioda, "Estimating parameters of multiple heterogeneous target objects using composite sensor nodes," IEEE Trans. Mobile Computing, vol. 11, no. 1, pp. 125-138, 2012.
<http://ieeexplore.ieee.org/>
 - H. Saito, S. Shimogawa, S. Tanaka, and S. Shioda, "Estimating parameters of multiple heterogeneous target objects using composite sensor nodes," IEEE Trans. Mobile Computing, vol. 11, no. 1, pp. 125-138, 2012.
<http://ieeexplore.ieee.org/>
 - S. Shioda, M. Yoshihara, A. Izumi, and Y. Tachikawa, "Markov property of correlated random networks and its application to the analysis of the Internet topologies," Proceeding of the ITC workshop CNET 2011.
<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2043528>
- [学会発表] (計 9 件)
- C. Huang and S. Shioda, "Performance analysis for non-saturated IEEE802.11e EDCA," 電子情報通信学会総合大会, BS-1-3, 2013年3月19日(岐阜).
 - 吉原正人, 塩田茂雄, "次数相関のモデル化手法とインタネットトポロジ分析への応用," 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会, NS2011-249, 2012年3月9日(宮崎).
 - 林大希, 塩田茂雄, "バイナリセンサの位置同定法と対象物形状推定への応用," 電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会, IN2011-191, 2012年3月9日(宮崎).
 - 黄重陽, 塩田茂雄, "非飽和端末を考慮した IEEE802.11e EDCA 性能評価モデルフレーム送信サイクルに基づくアプローチ," 電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会, IN2011-115, 2011年12月16日(広島).
 - 吉原正人, 塩田茂雄, "マルコフネットワークの提案とインターネットトポロジ分析への応用," 電子情報通信学会 ソサ

- エティ大会, B-7-51, 2011年9月16日(札幌).
- 山下賢也, 塩田茂雄, 斎藤洋, "センサ密度が未知のバイナリセンサネットワークによる対象物形状推定," 電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会, IN2010-147, 2011年3月3日(沖縄).
 - 黄重陽, 小松真弓, 塩田茂雄, "無線 LAN 用クロスレイヤ性能評価モデルの提案と評価," 電子情報通信学会 ソサエティ大会, B-5-104, 2010年9月17日(堺).
 - 黄重陽, 塩田茂雄, "連続衝突によるフレーム損失を考慮した無線 LAN 性能評価モデルの提案," 電子情報通信学会 通信方式研究会, CS2010-33, 2010年9月3日(仙台).
 - 塩田茂雄, "次数対列を再現する単純グラフの存在性と構成法," 電子情報通信学会 コンピューテーション研究会, COMP2010-23, 2010年6月25日(東京).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

塩田 茂雄 (SHIODA SHIGEO)
千葉大学・工学研究科・教授
研究者番号: 70334167

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし