

平成21年 3月31日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18500046

研究課題名（和文） 情報の不完全性を前提としたネットワーク推定・診断技術とその応用

研究課題名（英文） Network Estimation and Tomography based on Incomplete Observation

研究代表者

氏名（ローマ字）：塩田 茂雄（SHIODA SHIGEO）

所属機関・部局・職：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：

本研究では不完全な部分情報からネットワーク状態を高精度に推定するための系統的な方法論を確立し、種々のネットワーク管理技術への応用を展開した。具体的には、(1)一定周期で計測されたトラフィック情報から損失トラフィック量を推定する技術、(2)ポリシングパラメタ等により知られるトラフィック量の上限值からネットワーク遅延分布を推定する技術、(3)サンプリング測定に基づきヘビーユーザを検出する技術、(4)空間定常に配置された多数のセンサを用いて侵入物体の軌跡・形状・大きさ推定する技術、(5)非構造型 P2P において各ピアが自律分散的かつ効率的にネットワークブロードキャストを行う技術等を提案した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,400,000	0	1,400,000
2007年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	660,000	4,260,000

研究分野：工学

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：インターネット、ネットワーク測定、ネットワーク診断、トラフィック、性能評価、サンプリング、フロー、センサ

1. 研究開始当初の背景

インターネットは我々の社会生活を支える最大の通信基盤であるが、その管理法はいまだ充分には確立されておらず、安定性・信頼性の高い通信基盤とは言い難い。その原因の一つは、インターネットの測定・監視機能の脆弱さにある。例えば、ルータのSNMPカウンタはポート単位のトラフィック総量の計測機能しか持たず、宛先別に測定結果を分計することはできない（その時間分解能も

低い）。加えて、通信リンクの広帯域化によりラインスピードでのトラフィック測定は限界にきており、パケットの全数測定に代わり、一部のパケットのみ測定対象とする「サンプリング測定」が、今後主流になると考えられているが、サンプリングデータからトラフィックの完全な情報を復元することはできない。つまり、ネットワークの設計・制御・管理上の基礎データとなるべきトラフィックについて完全な情報を得ることは、現在は

もちろんのこと将来的にも困難であり、不完全な部分情報を統計的推定手法等で補いつつ高精度にネットワークを設計・制御・管理するための抜本的な技術革新が必要である。

この状況はトラフィック測定に限られたことではない。例えば、P2P ネットワークのようなインターネット上のオーバーレイでは、レイヤ4以下のネットワークの状態を間接的に推定しながら、上位レイヤでネットワークを制御する考え方が主流となりつつある。また、多数のセンサから構成されるセンサネットワークでは、個々のセンサが獲得した空間的に分散する部分情報から監視領域全体の大域的な情報を推定する技術が本質的に必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、(1)ネットワーク推定・診断技術に共通する問題の特徴を抽出し、(2)共通の特徴を的確に記述する(数学)モデルを構築し、(3)上記モデルを解析することによって、ネットワーク推定・診断技術に関する系統的な方法論を確立することにある。

さらに、得られた方法論を、より具体的なネットワーク管理上の課題、例えば部分トラフィック情報に基づくネットワーク管理技術等に応用し、従来技術の問題点を抜本的に解決する新技术を確立すると同時に、現在のインターネットのみならず、近年注目を集めているセンサネットワーク・P2P ネットワークに普遍的に通用しうる方法論にまで拡張することを狙う。

3. 研究の方法

(1)一定周期で計測された入力量に基づく待ち行列性能推定

従来の待ち行列理論では、客(パケット)の到着間隔とサービス時間(パケット長)分布から待ち行列の特性を解析するが、ネットワーク測定ではむしろ一定周期(例えば1秒)毎の入力量が計測されることが多い。本研究では一定周期で計測された入力量から待ち行列の特性を解析する手法を新たに考案する。

(2) 確定上限を持つ入力のあるフィードフォワード待ち行列網の解析法

パケットフローがネットワークの入口においてトークンパケット等でポリシングされる場合、ポリシングされたフローのトラフィック量の確定上限をトークンパケットのパラメタから知ることができる。確定上限を持つ入力のあるネットワークの性能解析手法に Network Calculus があるが、Network Calculus では遅延の最大値しか知ることができない。本研究では、確定上限を持つ入力のあるフィードフォワード待ち行列網において、最大遅延のみならず遅延分布を解析で

きる方法を開発する。

(3)パケットサンプリング手法の提案とネットワーク管理手法への応用

フロー単位のトラフィック情報はネットワーク異常検出、ユーザレベル品質測定、課金業務等において重要であり、最近のルータの多くはNetFlowのようなフロー単位のトラフィック測定機能を搭載している。しかしフロー単位のトラフィック測定には過大な処理負荷がかかることから、ランダム抽出したパケットを対象にフロー単位のトラフィック測定を行うサンプリング測定が広く用いられている。

サンプリング測定では、一定レイトでパケットをサンプリングする「定レイトサンプリング」が一般的であるが、サンプリングパケット数や、フローテーブルのエントリ数がトラフィック量に依存する問題がある。本研究ではこの問題を解決できるパケットサンプリング手法を提案し、ネットワーク管理手法への応用を検討する。

(4)空間定常に配置されたセンサによる侵入物体の軌跡・形状・大きさ推定

無線通信機能を有するセンサを多数配置して無線ネットワークを構築し、居住空間や工場などの監視、農場などの大規模領域の観測、物体の動き検出などを遠隔で行うセンサネットワークが注目を集めている。

個々のセンサが獲得した空間的に分散する部分情報から監視領域全体の大域的な情報をどのように推定するかは数学的にも工学的にも興味ある問題である。本研究ではセンサネットワークによる監視領域に侵入した物体の軌跡・形状・大きさを推定する手法に着目し、高精度な推定法を開発する。

(5)非構造型P2Pネットワークにおける経路制御の実現

非構造型P2Pではピア間のトポロジーに制限がなく、各ピアは自由に任意の相手とリンクを設定できる反面、経路制御が実質できず、効率的なネットワークの運用が難しい。本研究では各ピアがローカルな部分情報に基づいて自律分散的に行動しながら、簡易な経路制御を実現する手法について検討する。

4. 研究成果

(1)一定周期で計測された入力量に基づく待ち行列性能推定

一定周期で計測された入力トラフィック量(例えばバイト量)の時系列データに基づき、有限容量単一サーバ待ち行列システムの性能を評価する手法を提案した。一定周期の入力量の時系列データはあくまで入力過程に関する部分情報であり、この情報から一意に待ち行列システムの性能を定めることはできない。本研究では部分情報から予想されるシステム性能の最悪値に焦点をあて、特に

バッファ溢れにより発生する損失トラフィック量の上限評価式をサンプルパス解析により導出することに成功した(図1). 加えて, 一定周期で計測された入力トラフィック量の分布情報が得られるときに, バッファ溢れにより失われるトラフィックの割合の最大値を推定する式を導出した. 導出式はいずれもタイトな上限を与えることが理論的に保証される.

得られた結果は, トラフィック測定システムの時間分解能の限界等により, 詳細な入力トラフィック情報が得られないようなケースにおいて, システムの性能を解析する際に有用である.

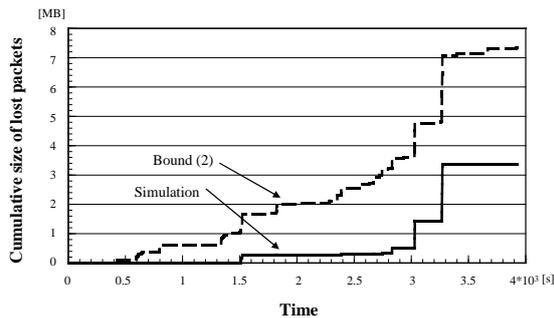


図1. 損失トラフィック量の評価例

(2) 確定上限を持つ入力のあるフィードフォワード待ち行列網の解析法

トラフィックフローが多数重畳されるフィードフォワード待ち行列ネットワークにおいて, 各ノードでの待ち時間分布を評価する手法を考案した. 重畳される各フローのトラフィック量はいずれも確定的な上限を持つため, 各フローのトラフィック量を直接知ることはできないが, フローの subadditive envelope (t 時間内の最大入力量を t の関数として与えるもの) はわかるとする. 本研究では, 定常性及びフロー間の独立性のみを仮定することにより, subadditive envelope に基づいて, それぞれのキューからの各フローの出力過程の特性を厳密に取り扱いながら, 各キューでの最大待ち時間および待ち時間分布の上限を導出することに成功した.

本研究で扱った待ち行列ネットワークモデルは, インターネットの品質保証のためのネットワークアーキテクチャーとして知られる IntServ や DiffServ モデルを含んでおり, これらモデルを採用するネットワークの遅延特性の評価や帯域設計などへの応用が可能である.

(3) パケットサンプリング手法の提案とネットワーク管理手法への応用

本研究では一定時間周期でパケットを抽出・分析する新しいサンプリング概念である「定周期サンプリング」を提案した. 定周期

サンプリングは, 時間軸を固定時間長 t_w の小さなウィンドウ (サンプリングウィンドウ) に区切り, 各サンプリングウィンドウ内で高々1個のパケットを抽出して, そのフロー属性等を調査する点に特徴がある. 定周期サンプリングでは, トラフィック負荷によらずサンプリングパケット数やトラフィック情報を保持するフロー数の上限が決まるため, 定レートサンプリングの欠点を完全に解決することができる.

定周期サンプリングでは, 各サンプリングウィンドウで最初に到着するパケットを抽出するとサンプリングにバイアスが発生し, ランダムサンプリングとならない. 本研究では, 各サンプリングウィンドウで2番目に到着するパケットを抽出する「second packet sampling」を適用すると, バイアスが大幅に取り除かれほぼランダムサンプリングを模擬できることを確認した.

さらに, 本研究では定周期サンプリングに基づいて, 各フローの「フローレート」を最尤推定法等により推定する手法を考案した(図2). 提案推定法を用いることで「高レートフロー」を高精度に検出できることを, 実トラフィックを用いたシミュレーションで検証している.

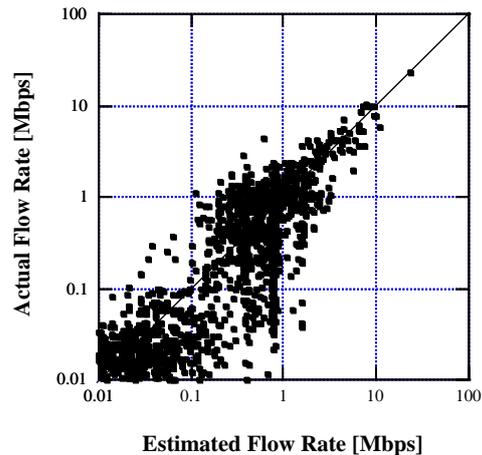


図2. 提案手法によるフローレート推定例

(4) 空間定常配置されたセンサによる侵入物体の軌跡・形状・大きさ推定

多数のセンサが空間定常性を満たすように配置される2次元センサネットワークを用いて, センサ配置領域を動く物体の軌跡をどの程度の精度で追跡しうるかを理論的に考察した. 特に, 物体の軌跡の被覆割合・完全被覆確率・部分被覆確率をセンサ密度とセンシング半径, 通信半径の関数として導出することに成功した(図3). 提案手法は, センサがランダムに(ポアソン過程に従って)配置されるケース, 等間隔に規則正しく配置されるケース, Cox 過程のように多少配置ムラがあるケース等, センサの配置が空間定常性を

満たす場合に広く適用できる。

本研究の結果から、被覆性能の目標値を満足するためのセンサ密度の目安を得ることができる。また、一般にセンシング半径や通信半径が増すと被覆性能は向上するが、得られた結果から被覆性能の目標値を満たすセンシング半径や通信半径を導出できることから、これをセンサの設計目標として利用することができる。

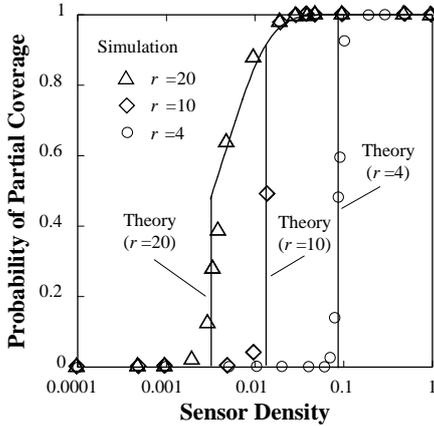


図3. 侵入物体の検出確率とセンサ密度，通信半径との関係

また、センサネットワークでは安定的な電源供給が難しいため、利用するセンサにはプロセッサ能力や通信機能の面で強い制約が課せられる。大量のセンサを広いエリアに撒いてエリア情報を収集する場合、必然的に安価な低機能センサが利用されるが、コストや電源の問題から、このようなセンサにGPS受信モジュールのような測位機能を持たせにくい。測位機能を持たないセンサから構成されるセンサネットワークの場合、測定データの位置属性がわからないことから、測定データから有意な情報を引き出すには統計処理上何らかの工夫が必要である。

本研究では測位機能を持たないが、センシングエリア内の物体の大きさを計測できるセンサを多数監視領域に配置し、領域内に侵入した物体の大きさと周囲長，さらには侵入物体の形状を推定する手法を考案した。さらに、点過程論を用いて上述のセンサネットワークを数学的にモデル化し、提案推定法の精度を理論的に分析するとともに、詳細なシミュレーション実験を通して、物体形状やセンサ配置パターンに推定精度がどのように依存するかを定量的に明らかにした。

(5) 非構造型 P2P ネットワークにおける経路制御の実現

非構造型 P2P をベースとするファイル共有システムでは、通常、ネットワークブロードキャストによりファイル検索が行われる。例えば、Gnutella ではフラディングによりネ

ットワークブロードキャストを実現する。フラディングは、全てのノードに最短時間で情報が配信できる強力な手法であるが、その反面、ネットワーク内でメッセージが冗長に複製・配信されるため、情報配信に伴うトラフィック量が不必要に増大するという問題がある。

フラディングと対照的なネットワークブロードキャストの実現法の一つに、メッセージの発信元（メッセージソース）を頂点とする最短路木に沿ったメッセージ配信がある。この手法では、メッセージの冗長な複製が行われず、メッセージの発生数を最小限に抑えることができる。しかし、ネットワーク内の各ノードを頂点とする全ての最短路木の情報を最新の状態に維持管理するためには、多大なオーバーヘッドが必要となる。

本研究では、ネットワーク内のノードが近隣のノードを頂点とする n ホップ部分最短路木（頂点からのホップ数が n 以下に制限された最短路木）の情報を「メッセージ転送テーブル」（メッセージ発信元別のメッセージ転送先リスト）として保持し、メッセージ転送テーブルに基づいてメッセージの転送を行うことで、冗長なメッセージの生成を極力抑えるネットワークブロードキャストを提案する。本提案手法では、各ノードが保持すべき情報が「近隣のノードを頂点とする部分最短路木」に限定されるため、情報の維持・更新に関わる負荷が軽減される。完全な最短路木を用いる場合に比べると、発生するメッセージ数は幾分増えるものの、通常のフラディングに比べるとはるかに効率的である（図4）。さらに（静的なネットワークであれば）メッセージの各ノードへの到達率が 100% に維持される。部分最短路木の情報は各ノードが自律分散的に構築・維持することが可能である。

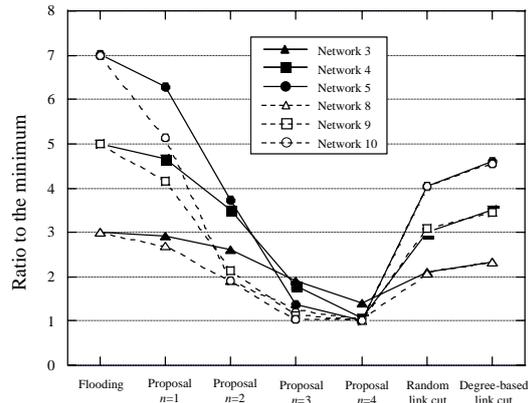


図4. 部分最短路木によるネットワークブロードキャストでのメッセージ削減率

提案手法は、 $n=0$ の場合が通常のフラディング、 $n=\infty$ の場合が完全な最短路木に沿ったメッセージ配信に相当し、通常のフラッ

イングから完全最短路木に沿ったメッセージ配信までを n をパラメータとして内挿するネットワークブロードキャストを実現している。

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 11 件)

1. Junko Harada, Shigeo Shioda, and Hiroshi Saito, "Path coverage properties of randomly deployed sensors with finite data-transmission ranges," *Computer Networks* (in press).
2. Shigeo Shioda, "Loss bounds for a finite capacity queue based on interval-wise traffic observation," *Queueing Systems*, vol. 60, no. 1-2, pp. 153-170, 2008.
3. Shigeo Shioda, Kenji Ohtsuka, and Takehiro Sato, "An efficient network-wide broadcasting based on hop-limited shortest-path trees," *Computer Networks*, vol. 52, pp. 3284-3295, 2008.
4. 塩田茂雄, "インターネット性能解析手法に関する幾つかの話題," *オペレーションズ・リサーチ*, vol. 53, no. 6, pp. 315-320, 2008.
5. Shigeo Shioda, "Performance bounds for feedforward queueing networks with upper-constrained inputs," *Performance Evaluation*, vol. 64, no. 7-8, pp. 782-801, 2007.
6. Sadayoshi Itou, Kousuke Uchiyama, and Shigeo Shioda, "Fixed-period packet sampling and its application to flow rate estimation," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E90-B, no. 10, pp. 2673-2682, 2007.
7. Shigeo Shioda, Kenji Ohtsuka, and Fumiaki Machihara, "A finite population model and product-form approximation for cellular mobile systems with traveling users," *Journal of the Operations Research Society of Japan*, vol. 50, no. 4, pp. 404-427, 2007.
8. Shigeo Shioda, "Some upper and lower bounds on the coupon collector problem," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 200, no. 1, pp. 154-167, 2007.
9. 塩田茂雄, "コンピュータネットワークの性能モデルの新潮流 — マルコフモデルを超えて —," *電子情報通信学会誌*, Vol. 90, No. 4, 2007.
10. Shigeo Shioda and Kazuya Ohtani, "Estimating the source-destination

traffic matrix of a VPN from access-link loads," *Computer Communications*, vol. 29, no. 18, pp. 3663-3678, 2006.

11. 大塚憲治, 石原田久, 塩田茂雄, "リンクカットを用いたフラッディング効率化手法の提案," *電子情報通信学会論文誌*, vol. J89-B, no. 4, pp. 532-542, 2006.

[学会発表] (計 25 件)

1. Hiroshi Saito, Shinsuke Shimogawa, Shigeo Shioda, and Junko Harada, "Shape Estimation Using Networked Binary Sensors," *IEEE INFOCOM Mini-Conference*, 2009年4月20日, ブラジル.
2. Junko Harada, Shigeo Shioda and Hiroshi Saito, "Path coverage property of randomly deployed sensor networks with finite communication ranges," *IEEE International Conference on Communications*, 2008年5月20日, 北京(中国).
3. チュンマニプーペー, 塩田茂雄, "ホップ制限付き距離ベクトルを用いた非構造型P2Pネットワークにおける経路制御," *電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会*, IN2008-91, 2008年12月11日, 広島.
4. 原田淳子, 塩田茂雄, 斎藤洋, "測位能力を持たないセンサネットワークによる物体サイズ・形状推定," *電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会*, IN2008-96, 2008年12月12日, 広島.
5. 塩田茂雄, 原田淳子, 斎藤洋, "物体サイズ測定能力を持つセンサネットワークの被覆性能に関する上下限式と単調性," *日本オペレーションズ・リサーチ学会 秋季研究発表会*, 1-G-3, 2008年9月10日, 札幌.
6. 塩田茂雄, "インターネットの未解決問題とOR," *日本オペレーションズ・リサーチ学会 第59回シンポジウム*, 2008年3月24日, 京都.
7. 斎藤洋, 塩田茂雄, 原田淳子, "Shape and size estimation using networked sensors: general stationary spatial placement," *日本オペレーションズ・リサーチ学会 春季研究発表会*, 2008年3月25日, 京都.
8. Kenji Ohtsuka, Shigeo Shioda, and Fumiaki Machihara, "A finite population model and product-form approximation for cellular mobile systems with traveling users," *IEEE Global Telecommunication Conference*, 2007年11月27日, ワシントンDC, 米国.
9. Kenji Ohtsuka, Takehiro Satoh, and Shigeo Shioda, "An efficient technique for message flooding based on partial shortest-path trees in wired networks," *IEEE International Conference on*

- Communications, 2007年6月27日, グラスゴー, 英国.
10. Sadayoshi Itoh, Kousuke Uchiyama, and Shigeo Shioda, "Fixed-period packet sampling and its application to flow rate estimation," IEEE International Conference on Communications, 2007年6月26日, グラスゴー, 英国.
 11. Shigeo Shioda, "New packet sampling technique for robust flow measurements," IEEE Communication Quality and Reliability Workshop, 2007年5月17日, フロリダ, 米国.
 12. 佐藤武大, 塩田茂雄, "距離ベクトル情報の交換による部分最短配信木の構築とフラディング効率化," 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, NS2007-116, 2007年12月21日, 千葉.
 13. 池田徹, 塩田茂雄, "ハッシュフラグメントマーキングによるIPトレースバックの効率性評価," 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, NS2007-117, 2007年12月21日, 千葉.
 14. 塩田茂雄, 池田徹, "ハッシュフラグメント方式によるIPトレースバックの特性分析," 情報処理学会システム評価研究会, 2007年11月19日, 金沢.
 15. 斎藤洋, 塩田茂雄, 原田淳子, "被覆過程の不変性とセンサネットワークへの応用," 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会, 2-F-4, 2007年9月28日, 東京.
 16. 塩田茂雄, "トラフィックモデルフリーな性能解析の試みーバイトカウントに基づくデータロス推定ー," 電子情報通信学会ソサエティ大会, BS803, 2007年9月11日, 鳥取.
 17. 原田淳子, 塩田茂雄, 斎藤洋, "ランダムセンサネットワークによる軌跡の被覆性能," 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, IN2007-7, 2007年5月18日, 東京.
 18. 塩田茂雄, 大塚憲治, 町原文明, "客の移動を考慮した移動体通信システムのネットワークモデルと積形式解条件," 日本オペレーションズ・リサーチ学会待ち行列部会, 2007年4月21日, 東京.
 19. 篠塚耕一, 三好直人, 塩田茂雄, "DDoS攻撃に対するIPトレースバック技術の漸近評価," 日本オペレーションリサーチ学会待ち行列シンポジウム, 2007年1月25日, 葉山(神奈川).
 20. Shigeo Shioda and Hui Jing Wang, "A Comparative Study on Different Probabilistic Packet Marking Schemes for IP Traceback," IEEE TENCON, 2006年11月17日.

21. 大塚憲治, 塩田茂雄, 町原文明, "ユーザの移動を考慮した移動体通信システムのネットワークモデルと積形式解条件," 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, IN2006-83, 2006年10月13日.
22. 寺山雅宏, 塩田茂雄, 石橋圭介, "異常トラフィック検出のためのパケットカウンタの最適構成法," 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, IN2006-78, 2006年10月12日, 東京.
23. 伊藤貞義, 内山浩佑, 塩田茂雄, "定周期サンプリングに基づく高レートフロー検出手法の提案," 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, IN2006-79, 2006年10月12日, 東京.
24. 伊藤貞義, 内山浩佑, 塩田茂雄, "定周期サンプリングによるフローレート推定法の高度化," 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, IN2006-1, 2006年5月11日, 東京.
25. 伊藤貞義, 内山浩佑, 塩田茂雄, "定周期サンプリングによるフローレート推定法の精度評価," 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, NS2006-15, 2006年4月21日, 高知.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

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