

機関番号：17104
 研究種目：基盤研究（S）
 研究期間：2006～2010
 課題番号：18100001
 研究課題名（和文） ネットワーク浸透のための融合技術と進化のための情報ダイナミクスに関する研究
 研究課題名（英文） Research on Fusion Technology and Information Dynamics for Penetrative and Evolutional Network
 研究代表者
 尾家 祐二（OIE YUJI）
 九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授
 研究者番号：50167293

研究成果の概要（和文）：今日、インターネットは重要な社会基盤へと発展を遂げているが、きたるべきユビキタス社会における実世界での人間活動とのシームレスで信頼性の高い連携や、人間（モノ）－モノ間の膨大で多様な情報の伝達・流通への要求に対応するために、真に人間の活動を支えるためのディペンダブルな新世代ネットワークに関する研究開発を実施した。

研究成果の概要（英文）：Since the Internet has been spread all over the world, it becomes the fundamental and social infrastructure of today's daily life. However, it is not yet sufficient to support the forth-coming Ubiquitous Society, in which a seamless and highly reliable linkage between the Internet and human activities in real world. Thus, in this research, we tried to develop newly dependable network architectures for supporting human activities.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	13,300,000	3,990,000	17,290,000
2007年度	14,900,000	4,470,000	19,370,000
2008年度	19,900,000	5,970,000	25,870,000
2009年度	17,900,000	5,370,000	23,270,000
2010年度	12,500,000	3,750,000	16,250,000
総計	78,500,000	23,550,000	102,050,000

研究分野：情報ネットワーク

科研費の分科・細目：情報学，情報システム・ネットワーク

キーワード：ネットワーク融合，情報ダイナミクス，サービス融合，新世代ネットワーク，情報分析・統合

1. 研究開始当初の背景

インターネットはこれまで、グローバル、かつボーダレスに広がってきた。そして、量的な拡大を目指した大容量ネットワーク、人間の特質である移動性に対応するモビリティ管理・シームレス通信などの研究開発がネットワークの浸透を推進させた。利用者にとってさらに身近なネットワークとなるためには、ネットワークのさらなる浸透と情報のダイナミクスに着目した新世代ネットワー

クへの進化が必要である。

2. 研究の目的

「浸透」に関して、多様なネットワーク技術の融合(fusion)を必要とし、「進化」にはネットワーク上の情報の流れに着目し、情報のダイナミクスの分析および統合(analysis and synthesis)を通じて利用状況を分析し、その結果に基づく統合により、人、社会など実世界の活動とネットワークの関係を明らかにし、新世代のネットワークデザインの指

針を得る必要がある。また、情報の流れに着目すると、実世界に創発された多様な情報伝達機構が必要と考える。すなわち、宛先を指定する IP 経路制御とは異なり、情報が備えた特性、活力によって必要な情報が的確に必要な人に届くような、情報ダイナミクスを高める新たな情報伝達機構(non-IP 情報伝達機構)が必要であり、具体的には以下に取り組む。

- (1) ネットワーク融合：ネットワーク技術やサービスレベルの融合技術に関する研究。
- (2) 情報ダイナミクスの分析と統合：ネットワーク利用状況、形態、ネットワークと実世界の関係等の推定に関する研究。
- (3) 新たな情報伝達機構：情報ダイナミクスを高める新たな伝達機構に関する研究。

3. 研究の方法

2. で示した各サブテーマにおいて、

- (1)は、多様な有線/無線資源個別の有効利用を図る検討を通して、シームレスな通信を実現するネットワーク融合技術の研究を行い、サービスレベルの融合に関しては、自律移動ロボットシステムや並列分散システムを実現するための機構の研究を行う。
- (2)は、ネットワークの端点間での計測からその内部状態を推定するためネットワークトモグラフィなど様々な計測・推定技術に関する研究を行う。さらに異なる通信サービスのデータを組み合わせることで、人を含めたシステム全体の設計・制御に必要な実社会と情報ネットワークの関係を表す社会ネットワーク構造の解明に関する研究を行う。
- (3)は、人間が現実世界で行う「状況に応じた多様な識別子に基づく円滑な情報伝達」をネットワーク上で実現することを目標に、IP アドレスに代わる新たなグローバル識別子の考案ではなく、状況に応じた識別子の選択とそれに基づく情報伝達機構の提案を行う。

4. 研究成果

(1) ネットワーク融合技術

① 多様なネットワーク技術の水平融合

無線 LAN の相互接続環境下では移動端末が通信中に複数の無線 LAN を切り替えるハンドオーバーの機会が増加する。そのため、ハンドオーバー時の通信品質の向上はユーザへ快適な通信環境を提供すると共に、ロボット等の自律移動体の広範囲な移動を実現できるため、ネットワークを実社会に浸透させる手段となると期待できるが、これまでの手法においては、ハンドオーバー時に通信中断が発生する上、通信品質を考慮した切り替えができない。そこで、実時間 (VoIP) / 非実時間通信 (FTP) を対象とするハンドオーバー管理手法を提案し、シミュレーション実験、及びプロトタイプ実装を用いた実証実験を通じて有効

性評価を行った。提案手法では 2 つの IF を用いたマルチホーミングによるハンドオーバー時の通信切断を避け、ハンドオーバー決定指標として MAC 層から取得可能なフレーム再送回数情報を用いる (図 1-1)。評価結果から、提案手法を用いる事でハンドオーバー時の通信性能を維持出来ることを明らかにし [論文⑨]、成果を INTECH BOOK にて出版した。

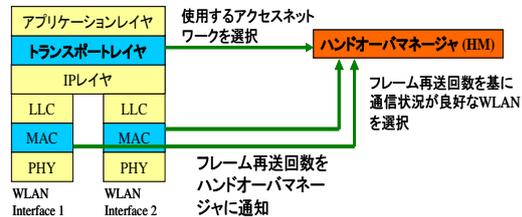


図 1-1: 無線 LAN ハンドオーバー手法

さらに、自律移動ロボットシステムの通信部分に提案ハンドオーバー手法を適用することで、ユビキタス無線 LAN 環境内における自律移動ロボットの自由な移動を実現できることを明らかにし、提案手法が無線ネットワーク浸透に寄与することを示した (図 1-2)。

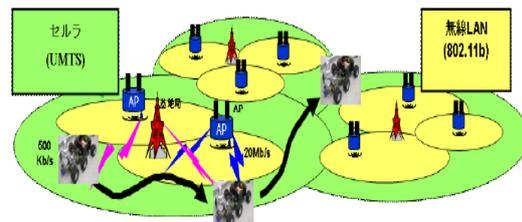


図 1-2: 移動ロボットシステムへの適用

② コグニティブ無線技術

ユーザが時間的・空間的に利用可能な周波数を利用して、広大な周波数帯への自由なアクセスを実現するコグニティブ無線技術が注目されている。しかし、周波数の利用状況の動的変化のため、送受信ノード間における通信周波数の調整が困難となる。そこで、自律分散型による協調制御チャネルの決定アルゴリズムを提案し、任意の 2 ノード間で共通制御チャネルを確立できることをシミュレーションから明らかにした [発表③]。さらに、確立した制御チャネルで取得した情報を元に、周波数毎に異なる到達距離や通信レートなどの通信特性の違いを考慮して、アプリケーションに適したデータチャネルを選択するための新しいメトリックを提案した。

③ ネットワークとユーザの垂直融合

無線アクセスポイント群とそれらのユーザとの相互作用を伴う制御手法を提案し評価した [発表②]。この手法は、ユーザからの評価に基づいて、無線アクセスポイント群の特性を自律的に変化させる。無線アクセスポイント群の特性の変化には、生物の形態形成と進化の仕組みを応用している。評価シミュレーションにより、本手法が、無線アクセスポイント群の特性を、動的にネットワークと

ユーザの双方の要求を満たすことを示した。さらに、複数のサーバから構成されるシステムの効果的な性能評価を目的として、通信データ量の変化によりサービス時間が変動する並列分散システムにおける応答時間の平均値解析手法を提案した[発表①]。その結果、最適なシステムを設計するために有用である、システムの平均応答時間予測、ボトルネック特定を実現した。またネットワーク上でデータの中継を行う計算機において、分散処理することを目的として、XML 文書の中継計算機で分散処理する例証システムの設計と実装を行い(図 1-4)、評価実験を行った。その結果、全般にパイプライン並列よりもデータ並列の方が効率的、データの中継と処理を行う計算機でのバッファの構造で差異が生じる等の詳細な特徴が得られた。

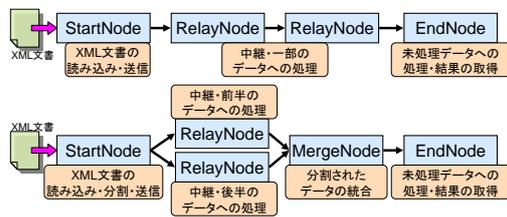


図 1-4: XML 文書の中継計算機での分散処理

(2) 情報ダイナミクスの分析と統合

本サブテーマでは、ネットワーク上の情報ダイナミクスに関わる構造や状態を分析し、分析を通じて得られた様々な知見の統合により、人や社会などの実世界の活動を含んだ動的な情報ネットワークシステム全体の設計・制御の指針を得ることを目指して研究を進めてきた。そのために、フローや通信品質などの1次レベルのネットワークの挙動・状態変化のスケラブルな計測・推定、計測に基づく多数のユーザやアプリケーションによる資源共有における公平性の制御、さらに人を含めたシステム全体の設計・制御に必要な実社会と情報ネットワークの関係を表す社会ネットワーク構造の解明、またより長い時間スケールでの変化・進化を管理するための情報ネットワーク構造の普遍的な形成過程の解明、などに関する研究を行った。以上より、社会ネットワーク構造の解明に繋がる重要な知見を得た[論文⑤]。

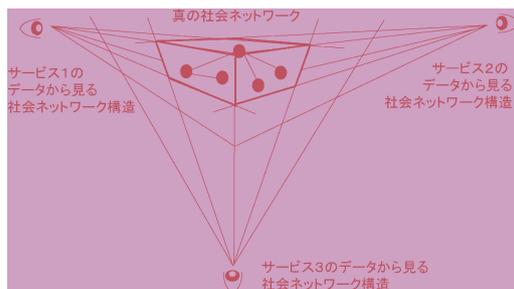


図 2-1: 通信データによる社会ネットワーク構造の分析方法のイメージ

これは、通信ネットワークサービスの各種データ(トラフィック量、ユーザ数など)には、通信サービスの背後にある「社会ネットワーク構造」に関する情報が反映されているという期待に着目した研究であり、模式的に図示したものが図 2-1 である。本研究では、異なる通信サービスのデータを組み合わせることで、特定の通信サービスの特性に依存しない、社会ネットワーク構造の普遍的な「立体像」を解明することを目指した。実施した分析の具体的な内容は以下の通りである。

まず、NTT DoCoMo の i-mode サービスの普及初期におけるユーザ数とトラフィック量の関係、NTT DoCoMo の携帯電話サービスのトラフィック履歴、及び株式会社ミクシィの提供する mixi のユーザ数の経時変化から、社会ネットワークの次数分布、ユーザの接続関係規則、及びユーザのサービス加入順序に関するモデルを構築した。社会ネットワークの次数分布については、au by KDDI の携帯電話トラフィック履歴を用いて妥当性を検証した。また、Trend Micro 社によるワーム型ウイルスの感染ホスト数のデータと上記で得られた社会ネットワークの次数分布から、ユーザのネットワーク利用頻度モデルを導くと共に、その妥当性を mixi ユーザ数の経時変化を再現するシミュレーションにより確認した。更に、ユーザ間通信頻度モデルにより生成したトラフィック量の特性(mixi で検証済み)と、社会ネットワーク構造の解明に用いたトラフィックデータの条件(i-mode のトラフィック特性)とを無矛盾に統合できる通信頻度モデルを考察し、その物理的な解釈を与えた。以上の結果の相互関係が図 2-2 であり、特定の通信サービスに依存しない普遍的な社会ネットワーク構造を捉えられたことが分かる。

一方、ネットワークの生成原理を調べるために、閾値モデルに関する研究を行った[論文⑥]。閾値モデルとは、各ノードが固有の

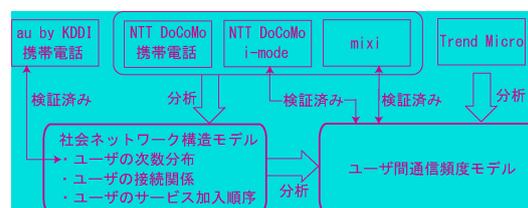


図 2-2: 分析の全体像

重みを持っている時、ノード同士の重みの和がある閾値を超えた時にリンクを張るというモデルであり、様々な現実のネットワークの生成過程の特徴が反映されている。既存研究では、重みの確率分布が指数分布など特定の分布において、スケールフリー性が成り立つことが知られていたが、ここでは重み分布に依らず普遍的にスケールフリー性が成り

立つことを証明し、現実のネットワーク構造を表すモデルとして閾値モデルが広く有効であることを理論的な観点から示した。

また、ネットワーク資源割当における公平性概念の情報理論による特徴付けに関する研究を行った[論文①]。具体的には、ネットワーク資源割当て問題において広く用いられる α -Proportional Fairness (α -PF)と呼ばれる公平性基準を、 α -ダイバージェンスと呼ばれる情報量基準を介することで、ユーザの満足度とネットワークの満足度のトレードオフの均衡点として特徴付けた。一方、実行可能な物理制約を満たすことに加え、ネットワーク利用者側の要求を可能な限り満たしながら、ネットワーク資源を割り当てるための不動点最適化アルゴリズムを提案した[論文②]。本提案手法によって実現される資源割当ては、物理制約にノルムの意味で最も近く、かつ、ネットワーク利用者の満足度を表す指標関数を最大化できることを示した。その他、ネットワークトモグラフィによるネットワーク間フロー流量の推定、打ち切りデータからのフロー継続時間分布の推定、サンプリングによるVoIP通信品質の推定といった情報ダイナミクスとの統合に必要な様々な手法の開発し、実ネットワーク環境での有効性を検証した。

(3) 新たな情報伝達機構

実世界で行われるような「状況に応じた多様な識別子に基づく円滑な情報伝達」の実現に向けて、その構成要素となる識別子、情報伝達方法、ユーザインターフェースに関する研究(図3-1)を行い、以下の成果を得た。

①識別子：ネットワーク応用システムやユーザにより情報伝達を円滑にする識別子が異なること、および個人依存の識別子の活用法を実際のシステム構築を通じて示した。

②情報伝達方法：ノードが状況を判断して作成する識別子(ノード間距離や負荷状態)と人が状況を判断して作成する識別子を用いる方法を提案・評価し、有効性を示した。

③ユーザインターフェース：ネットワーク応用システムの利用効率を高めるインターフェース設計・評価を行い、有効性を示した。

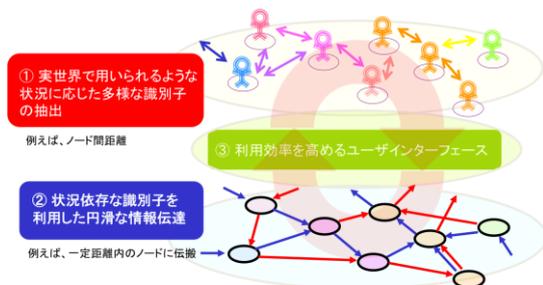


図 3-1:「新たな情報伝達機構」研究全体像

①ユーザ特性の識別子

新たな識別子に基づく情報伝達の研究として、ユーザ特性の識別子としての利用可能性を検討した。まず、情報伝達機構のユーザ識別手法の提案、試作システムによる実験、評価を行った。その結果、ユーザが情報システムを利用する際の無意識的行動を解析することにより、一部の特徴をユーザ識別に利用可能であることを確認した。また、ユーザ特性のひとつとして、ユーザからの主観評価取得方法の提案、試作システムによる実験、評価を行った。その結果、さまざまなメディアにおける類似性を定義することにより客観的に得られるメディア特性と主観的なユーザ特性を関連づけることが可能であることを実験的に示すことができた。また、ユーザからの評価の一部を取得することにより他の評価項目に対する応答を計算論的に推測可能であることを実験的に示した[論文③]。さらに、ユーザ特性に適応したユーザインターフェースに関する研究開発にも取り組んだ。

②情報伝達

ファイル共有を目的とした非構造型P2Pアプリケーションにおいて、複製の配置は検索効率を高めるための有効な方法であるが、既存の複製配置手法には、一部のノードに負荷を集中させてしまうという欠点があった。そこで、検索効率と両立しながら負荷分散を達成するために、ノードの負荷状態を識別子とした情報伝達方法として、熱拡散現象に着想を得た複製配置手法を提案した。そして、理論解析とシミュレーション実験により、提案手法は検索性能と負荷分散をうまく両立させる能力に加え、検索効率と負荷分散の多様なトレードオフ関係を開拓する能力を有すること、及び、その挙動が統計的に熱拡散現象と類似することを明らかにした[論文⑦]。さらに、提案手法の拡張とその枠組の理論的な一般化にも取り組んだ。

次に、蓄積搬送型通信を利用して、近接した時のみ情報を伝搬させる機能を有する複数のノードがネットワーク構造上を規則的に移動する場合の効率的な情報収集アルゴリズムを設計し、その有効性を評価した。さらに、ノードが移動時に得られる、加速度や方向の変化履歴の情報を用いて、未知のネットワーク構造上を探索してその構造を推定する問題を扱った[論文④]。これは災害時の建物内通行可能領域の推定などに適用することができる。この問題に対して、構造推定アルゴリズムを設計し、ノードが協調することによって、精度の低い情報からでも構造を推定できることを示した。

さらに、ネットワークの構成要素である人、ソフトウェア、ハードウェアのそれぞれの長所を機能として取り込む情報伝達・共有機構

をいくつか提案した。人は決められた事柄を高速に処理する能力ではハード・ソフトに劣るが、様々な知識と情報を統合して状況を判断する能力に優れる。このような能力を持つ人を、情報共有が促進する識別子を作成する仕組みとして情報伝達・共有機構に取り込むことが核となる考え方である。具体的な成果の一つは、P2P ファイル共有ネットワークにおいて、各ユーザに所有するファイルの内容に対するその人の感じ方(感性情報)を識別子(図 3-2)として付与させる情報伝達機構を提案したことである[論文⑧]。この方法においては、他者が作成したファイルと識別子の対応関係を見て、その人が自分とセンスの合う人(情報源)かどうかを判断できる。情報がネットワーク上に大量かつ分散して存在している状況においては、個々の情報の発見に加え、このような自分にとって有用な情報源(人)の発見が重要になると考えられる。

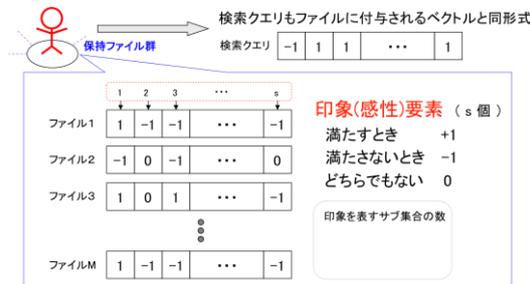


図 3-2: 感性情報を識別子とする P2P ファイル共有

③ 情報伝達機構を利用した活動の効率を高めるユーザインターフェース

ネットワーク上での人の活動履歴を要約することで、情報伝達機構を利用した活動の効率を高める GUI の実装を行った(図 3-3)。人の作業履歴を「あらすじ」と呼ばれる簡潔な形式にまとめ、スムーズに仕事を進めるための手法である。ネットワークを利用した作業において、作業者が活動を中断する以前の活動の内容を忘れると、次にどこから作業を始めていいか分からなくなる。また、作業内容を振り返る際にも時間がかかる。こうしたことが原因でスムーズに仕事にとりかかることができなくなってしまう。日常的に蓄積した活動履歴から「あらすじ」の利用を可能とする GUI を開発し、情報伝達機構の利用効率の向上の可能性を探索した。「適切な場面で作業を再開できること」「素早く過去の活動の内容を振り返ること」を実現して、活動の効率が改善されることが分かった。

最終的に、以上 3 サブテーマを総括する目的で 2011 年 1 月に公開シンポジウム(北九州市, 参加者 87 名)を行い、本研究課題で示したネットワークとユーザの多様性を活かせる融合が新世代ネットワークへの鍵となることを確認した。

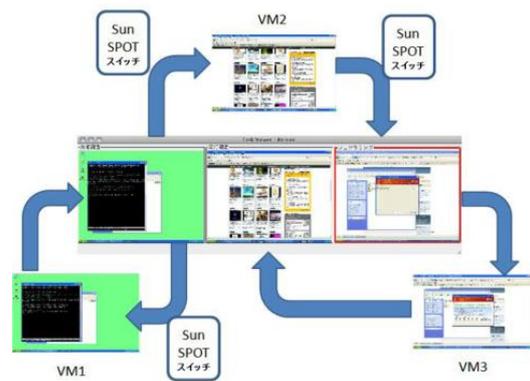


図 3-3: 情報伝達機構を利用した活動の効率を高める GUI

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 38 件)

- ① M. Uchida, J. Kurose, "An Information-Theoretic Characterization of Weighted α -Proportional Fairness in Network Resource Allocation," *Information Sciences*, 2011. DOI: 10.1016/j.ins.2011.05.001 (査読有)
- ② H. Iiduka, M. Uchida, "Fixed Point Optimization Algorithms for Network Bandwidth Allocation Problems with Compoundable Constraints," *IEEE Communications Letters*, 2011. DOI: 10.1109/LCOMM.2011.11.101369 (査読有)
- ③ R. Verschae, M. Koeppen, K. Yoshida, "Partial user-supplied information and user modeling for improving QoS", *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(1), pp. 47-55, Jan. 2011. (査読有)
- ④ 已波弘佳, 藤原明広, 下斗米貴之, "劣通信環境における情報収集とその構造推定への応用", *電子情報通信学会論文誌 B*, J93-B(12), pp.1575-1584, Dec. 2010. (招待論文)
- ⑤ 会田 雅樹, 高野 知佐, 小頭 秀行, 中村 元, "異なる通信サービスのデータを相補的に利用した社会ネットワークの構造分析", *電子情報通信学会論文誌 B*, J93-B(19), pp. 1430-1444, Oct. 2010. (査読有)
- ⑥ A. Fujihara, M. Uchida, H. Miwa, "Universal Power Laws in the Threshold Network Model: A Theoretical Analysis Based on Extreme Value Theory," *Physica A*, 389(5), pp. 1124-1130, Mar. 2010. (査読有)
- ⑦ M. Uchida, K. Ohnishi, K. Ichikawa, M. Tsuru, Y. Oie, "Dynamic and Decentralized Storage Load Balancing with Analogy to Thermal Diffusion for P2P File Sharing", *IEICE Transaction on Communications*, E93-B(3), pp.525-535, March 2010. (査読有)

- ⑧ K. Ohnishi, K. Yoshida, Y. Oie, "Folksonomical P2P File Sharing Networks Using Vectorized KANSEI Information as Search Tags", IEICE Transactions on Information and Systems, E92-D(12), pp.2402-2415, Dec. 2009. (査読有)
- ⑨ S. Kashihara, K. Tsukamoto, Y. Oie, "Service oriented mobility management architecture for seamless handover in ubiquitous networks," IEEE Wireless Communications Magazine, 14(2), pp. 28-34, April 2007. (査読有)

[学会発表] (計 227 件)

- ① K. Yoshinaga, W. Shohei, Y. Uratani, H. Koide, D. Cavendish, Y. Oie, "Characterizing Transactions with Data Transfer on Multi-Server Systems," WIND2010, Thessaloniki, Greece, Nov.26, 2011. (査読有)
- ② K. Ohnishi, K. Tsukamoto, S. Kashihara, Y. Oie, "Self-configuration of Wireless Access Points Based on Mechanisms of Biological Development and Evolution," SAN Workshop, Budapest, Hungary, Sept.27, 2010. (査読有)
- ③ K. Tsukamoto, Y. Omori, O. Altintas, M. Tsuru, Y. Oie, "On Spatially-Aware Channel Selection in Dynamic Spectrum Access Multi-hop Inter-Vehicle Communications (Invited Paper)," IEEE VTC2009-Fall, Anchorage, Alaska, USA, Sept.22, 2009. (査読有)

[図書] (計 2 件)

- ① S. Kashihara, M. Niswar, Y. Taenaka, K. Tsukamoto, S. Yamaguchi, Y. Oie, "End-to-End Handover Management for VoIP Communications in Ubiquitous Wireless Networks," VoIP Technologies, S. Kashihara (Ed.), ISBN: 978-953-307-549-5, InTech, 2011.
- ② M. Aida, H. Koto, "Structure and dynamics of social networks revealed by data analysis of actual communication services," In Handbook of Social Network Technologies and Applications (Ed. Borko Furht), Chap.2, Springer, pp. 23-43, 2010.

[その他]

- ① ネットワークデザイン研究センター (NDRC) : 研究実績 web ページ
<http://www.ndrc.kyutech.ac.jp/>
- ② ネットワーク浸透と進化に関する基盤(S) 総括シンポジウム開催に関する web ページ
<http://www.ndrc.kyutech.ac.jp/topics.php?SEQ=101&LNG=Japanese>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾家 祐二 (OIE YUJI)
九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授
研究者番号 : 50167293

(2) 研究分担者

會田 雅樹 (AIDA MASAKI)
首都大学東京・システムデザイン研究科・教授
研究者番号 : 60404935

巳波 弘佳 (MIWA YOSHIHIRO)
関西学院大学・理工学部・准教授
研究者番号 : 40351738

(3) 連携研究者

鶴 正人 (TSURU MASATO)
九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授
研究者番号 : 40231443

Mario Köeppen (MARIO KÖEPPEN)
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

川原 憲治 (KAWAHARA KENJI)
九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授
研究者番号 : 40273859

小出 洋 (KOIDE HIROSHI)
九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授
研究者番号 : 90333517

池永 全志 (IKENAGA TAKESHI)
九州工業大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号 : 50284716

吉田 香 (YOSHIDA KAORI)
九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授
研究者番号 : 60315174

中村 豊 (NAKAMURA YUTAKA)
九州工業大学・情報科学センター・准教授
研究者番号 : 40346317

大西 圭 (OONISHI KEI)
九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授
研究者番号 : 30419618

内田 真人 (UCHIDA MASATO)
九州工業大学・ネットワークデザイン研究センター・准教授
研究者番号 : 20419617

福田 豊 (FUKUDA YUTAKA)
九州工業大学・情報科学センター・助教
研究者番号 : 90372763

塚本 和也 (TSUKAMOTO KAZUYA)
九州工業大学・大学院情報工学研究院・助教
研究者番号 : 20452823 (H19 年度～)

田村 瞳 (TAMURA HITOMI)
九州工業大学・ネットワークデザイン研究センター・助教
研究者番号 : 30423601

安部 憲広 (ABE NORIHIRO)
九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授
研究者番号 : 00029571 (~H21 年度)

飯塚 秀明 (IIDUKA HIDEAKI)
九州工業大学・ネットワークデザイン研究センター・准教授
研究者番号 : 50532280 (H21 年度～)