

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330116

研究課題名(和文) マルチホップ無線中継技術をベースとした自律分散型地域情報流通ネットワークの研究

研究課題名(英文) A study on self-distributed large-scale local area information communication networks basing multi hop wireless network technologies

研究代表者

山本 尚生 (YAMAMOTO, HISAO)

東京都市大学・工学部・教授

研究者番号：60350229

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：広域(市区町村)にわたる環境情報の収集と流通、一次産業の大規模省力化、携帯端末の普及に伴うアクセス回線帯域の困窮対策、地域住民や一人暮らし者の健康管理、また電力需給改善のためのスマートグリッド等の組み込みなど、地域における多目的情報流通基盤の重要性は高い。本研究では、無線センサーネットワーク(以下WSN)と無線LANメッシュネットワーク(以下WL-MN)の融合、連携により、「アクセスネットワーク機能(インターネットへの広域アクセス機能)」、「情報センシング機能」、および「センシング情報と地域内情報の流通機能」の環境を提供する多目的情報流通基盤の構築を目指し、その実現への道を開く。

研究成果の概要(英文)：An urgent instant communication network is usually built just after large-scale accident occurrence. However, the instantly constructed systems which isn't daily used generate always many defects and be not often use easily. Use of a radio mesh network is expected as such communications system. Wireless Mesh Networks which guarantee connection by self-organization scheme have constructions based on IEEE802.11 wireless LAN technology. It has possibility of offering the new communication environments which cannot be performed by traditional technologies. The purpose of this research is to establish scalable and self-distributed traffic control technologies for wireless mesh networks and wireless sensor networks aiming at opening the way for application to a wide-area infrastructure network.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：無線LANメッシュネットワーク 無線センサーネットワーク 無線マルチホップ通信

### 1. 研究開始当初の背景

将来のコピキタネットワークには、自己組織的、自律分散型のア - キテキチャが望ましいと考えて、MANET および無線 LAN メッシュネットワークに関する検討を進め、これらを準インフラ技術として使うには分散管理を徹底したスケラビリティのある制御方式と、センサーネットワークと融合した制御アルゴリズムが必要と考えた。

### 2. 研究の目的

解決すべき課題を次の3項に整理した。

- (1) センシングカバーエリア大規模化と稼働寿命延伸のための制御アルゴリズム
- (2) 無線 LAN メッシュネットワーク大規模化に伴う通信品質劣化の克服
- (3) 公共利用を考慮したデータ流通時の QoS とセキュリティー管理技術

### 3. 研究の方法

想定する構成がもたらす環境下で WL-MN (大規模無線メッシュネットワーク) と WSN (無線センサーネットワーク) に新しく要求される機能 (課題 1、2) の検討に取り組み、追って、データ流通時の問題 (課題 3) に取り組んだ。

#### 2-(1)について:

本検討では、まず、シンク (データ収集ノード) を複数設置した場合の不要な (冗長な) フラディングを削減する制御法を提案した (4-(1))。

#### 2-(2)について:

ここでは、まず、WL-MN カバーエリアの拡大に伴う特定着対地集中過負荷への対応を検討した (4-(2))。次いで、メッシュノード間の電波干渉を考慮した経路構築技術を提案した (4-(3))。

#### 2-(3)について:

WL-MN のオープン性を考慮して個人認証等のためにセキュアなデータ転送法の検討を進め、インターネット等の IPsec 技術の導入法を追求した (4-(4))。

### 4. 研究成果

(1) 複数シンクセンサーネットワークにおける効率的なデータ要求フラディング手法

ホットスポット問題に対して、設置位置の分散した複数のシンクを用いることで経路上の負荷を分散させる方式が提案されている。しかし、データ要求パケットはシンクからフラディングによって全センサに配信されるので、複数シンクの場合、データ要求パケットが各シンクから重複して送られ、無駄な電力を消費する。通常、パケットの転送回数を制限する TTL (Time to live) を用いるが、TTL の値に対してシンク同士の距離が近い場合は、データ要求パケットの過剰配信を十分に抑制することができない。

#### 提案手法

既存方式では完全に防げなかったデータ要求パケットの過剰配信を防ぐために、新た

なフラディング手法を提案する。この手法では、各センサが自ノードから最もホップ数の少ないシンクを最短シンクとし、そのシンクから送られてきたパケットのみを転送し、それ以外のシンクから送られてきたパケットは転送を中止する。これによりシンクの位置に左右されず、データ要求パケットの過剰配信を防ぐことが可能となる。また TTL 値の設定などを必要とせず、複数シンク方式への適応性が高い。

#### シミュレーションによる評価

提案方式と TTL を用いた既存方式との比較実験を行った。シンク同士の距離が比較的に近い場合のノード配置におけるデータ到着率の例を図 1 示す。提案方式は TTL 方式よりも長期間高いデータ到着率を維持し、有効性が確認できた。

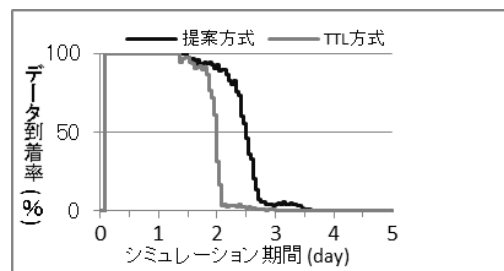


図 1 データ到着率の例

(2) 大規模無線メッシュネットワークにおける輻輳制御の検討

面的に拡大された無線メッシュネットワークでは広い範囲から特定のエリアに通信が集中することによる輻輳の発生が想定される。本検討では、このような特定対地集中過負荷による輻輳を発信側で制御を行うことにより、輻輳の回避とネットワーク全体における通信品質の改善を図る輻輳制御法を提案した。

大規模化した無線メッシュネットワークでは、STA-GateWay 間だけでなく、STA-STA 間の通信が増えることにより様々な輻輳が発生する。原因となっている特定対地 (原因対地) 以外へ向かうトラフィックへの影響を抑えるためには、原因対地へ向かうトラフィックを送信元で規制する必要がある。送信元の STA で制御を行う場合、STA ごとに制御レベルを変えることが出来、柔軟な制御が可能になるが、ユーザ端末である全 STA に制御機能を実装する必要があるため現実的に困難である。

本検討では、送信元 STA が所属する MR で規制制御を行うことで STA に改良を加えることなく、輻輳を改善する手法を検討する。

#### 提案方式

提案方式の制御は以下の 3 つの機能で構成される。

#### [輻輳検知]

原因ノードの特定各ノードにおいて輻輳検知を行う。検知 (輻輳判断) にはバッファに滞留するデータ量を用い、閾値 を超えた

場合に輻輳と判断する。また、図2(a)のように、輻輳が原因の宛先 MR で発生するとは限らず、他の MR において中継経路の集中による輻輳の発生も考えられる。この場合は、原因宛先 MR を特定する必要があり、輻輳の発生を検知した時点でバッファに滞留しているパケットの宛先のうち最も多い宛先を原因宛先 MR と判断する。同時に、輻輳原因が特定対地への集中過負荷によるものか、経路集中によるものかを判断できるため、迂回経路構築による輻輳制御も発動することが可能である。

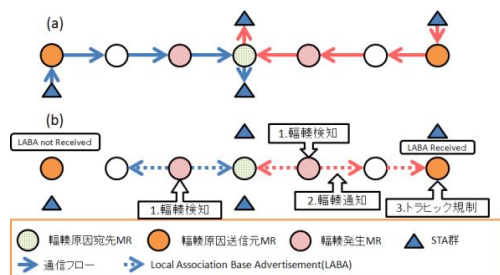


図2 輻輳発生概要図(a)と制御概要図(b)

#### [発信元 MR への輻輳通知]

輻輳の通知には、RA-OLSR における STA 位置管理メッセージである LABA(Local Association Base Advertisement)に輻輳情報(原因宛先 MR 情報など)を追加することで行う。各 MR は定期的に受信する LABA から、原因宛先 MR を知ることができる。この方法は、新たに制御用のメッセージを生成しないため、ネットワーク内の制御信号増加を抑える効果が期待できる。輻輳情報には、輻輳の原因となっている原因宛先 MR のアドレス、輻輳フラグ、規制レベル情報を載せる。規制レベル情報を変更することで、柔軟に輻輳制御を変更することができる。

#### [トラヒックの規制]

各 MR は、受信した LABA の輻輳情報から自身が原因宛先 MR であるパケットを転送している場合にその通信を対象に規制を実施する。トラヒック規制手法として、送信レート制御とセッション規制(アドミッションコントロール)が考えられ、対象となる通信に応じて使い分けが必要がある。どちらの場合も、確率的に制御する手法、トークンによるポリシング、および通過トラヒックの量を絶対値で制御する手法、などが考えられる。

#### シミュレーション評価の結果

シミュレーション諸元は次の通りである。

Simulator	QualNet5.02
Simulation time	300[s]
Application type	CBR
LABA Interval	10[s]
Packet Size	1024[bytes]
Threshold	100[packets/s]
Traffic Pattern	Deterministic
Interval (Load)	20, 25, 30, 35, 40, 45, 50[packet/s]

Session Start 60[s]  
Radio type 802.11a  
Data rate 6[Mbps]

評価では、特定対地集中過負荷が発生しやすい状況を想定し CBR(Constant Bit Rate)フローを発生させ、新しい通信フローの発生は行われぬものとした。

シミュレーション結果を図3に示す。特定対地集中過負荷に対応したトラヒック規制を行うことで、特定対地に向かうトラヒックのパケット到着率を維持できていることが分かる。

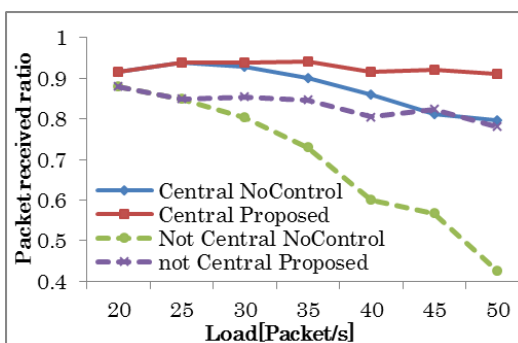


図3 パケット到着率

### (3) 無線メッシュネットワークにおける電波干渉を考慮した経路構築法の提案と実装実験

無線メッシュネットワークでは CSMA/CA の利用を想定することが多い。CSMA/CA は通信ノードの周辺ノードを一時的な通信停止状態 (NAV) に遷移させるため、マルチホップ通信に適用した場合、経路周辺で多数の NAV ノードが発生することとなる。

この問題への対処として、干渉ノード数が最少の経路を最適経路として構築する干渉ノード数考慮経路構築法を提案した。まず、既存のルーティングプロトコルである OLSR に実装し、次いで、より動的環境に適しているイーテックプロトコル HWMP への実装方法を示し、評価を行った。

#### 提案方式: 干渉ノード数をメトリックに導いた OLSR

本提案では、OLSR の制御メッセージの枠組みを変えずに、ノードがメトリックを計上する機能と、計上したメトリックを制御メッセージに記録し他のノードへ通知する機能を実現している。

ノードは制御メッセージと自ノードのリンクセットの情報から各隣接ノードと通信する際に干渉するノード数を計上し、リンクセットの対応するメトリックフィールドに記録する。さらに、OLSR の手順に従い隣接ノード情報をメッセージに記録する際、対応したメトリックをメッセージのメトリックフィールドに記録し、他のノードへ通知する。制御メッセージの送受信を繰り返すことで、各ノードはネットワーク内のすべてのリン

クのメトリックを把握する。ノードは収集したリンクメトリック情報を基に干渉数が最少の経路を構築する。結果、構築された経路間の妨害が発生する可能性を低減することとなり、スループット変動を抑制できる。  
[シミュレーション評価]

ネットワークシミュレータ QualNet 上で、提案を実装した OLSR と通常の OLSR、それぞれを使用した場合における平均スループット変動率の比較を行った。あるノードのセッション数  $i$  におけるスループットを Throughput ( $S_i$ ) としたとき、スループット変動率 Rate of Throughput Variability を次式で表す。

$$\text{Rate of Throughput Variability} = \left| \frac{\text{Throughput}(S_{i-1}) - \text{Throughput}(S_i)}{\text{Throughput}(S_{i-1})} \right|$$

図 4 にセッション数に対する平均スループット変動率を示す。平均スループット変動率は、あらかじめ定めた 1 ノードからスループットを取得し、各  $S_i$  ( $i = 2, 3 \dots, 10$ ) における平均を算出したものを使用した。図中の区間は通信を行うノードをランダムに 40 パターン変更し、結果から得られた 95% 信頼区間を表す。図 4 より、セッション数の増加に対し提案方式は通常の OLSR と比べてスループット変動率が抑制できていることが確認できた。

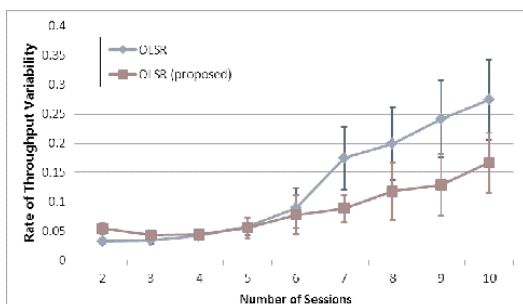


図 4 平均スループット変動率

提案方式: 被干渉ノード数考慮メトリックの HWMP への実装実験

IEEE802.11s には、標準のルーチングプロトコルとしてリアクティブ型ベースの HWMP が存在しており、同じく標準とされているメトリックである Airtime を用いて経路を構築する。しかし、Airtime は品質の良いリンクを優先して選択するため、先に発生したセッションは最短ホップ経路に近い経路を構築し、多くの被干渉ノードを発生させる可能性がある。

そこで本研究では、HWMP に被干渉ノード考慮メトリックを実装する方法を示し、動作確認および通常の HWMP との比較評価を行った。

WMN におけるノードは、周辺ノードを検知するために定期的にビーコンを送信している。ノードは、経路要求メッセージ (PREQ :

PathREQuest) をブロードキャストする際、ビーコンから取得した隣接するノードのアドレス (隣接リスト) を記録して送信する。PREQ を受信したノードは、自ノードの隣接リストおよび PREQ に記録された隣接リストを参照することで、1 ホップ前のノードと通信した際に発生する被干渉ノード数を計上することができる。中継ノードの場合、計上した値を PREQ のメトリックフィールドに加算し、自ノードの隣接リストを上書きで記録し、リブロードキャストする。宛先ノードの場合、PREQ に記録された合計の被干渉ノード数が、過去に受信した PREQ より小さければ経路応答メッセージ (PREP : PathREPLY) を PREQ の送信元ノードへ送信し、経路を構築する。  
[シミュレーション評価]

ネットワークシミュレータ QualNet 上で、被干渉ノード考慮メトリックを実装した HWMP と通常の HWMP、それぞれを使用した場合における平均スループット変動率の比較を行った。あるノードのセッション数  $i$  におけるスループットを Throughput ( $S_i$ ) としたとき、スループット変動率 RTV を次式で表す。

$$\text{RTV} = \left| \frac{\text{Throughput}(S_{i-1}) - \text{Throughput}(S_i)}{\text{Throughput}(S_{i-1})} \right|$$

32 ノードを均一に配置した環境における、セッション数に対する平均スループット変動率を示す。図 5 より、セッション数が多い環境において、被干渉ノード考慮メトリックを実装した HWMP は、通常の HWMP と比べスループット変動率を抑制できていることが確認できた。

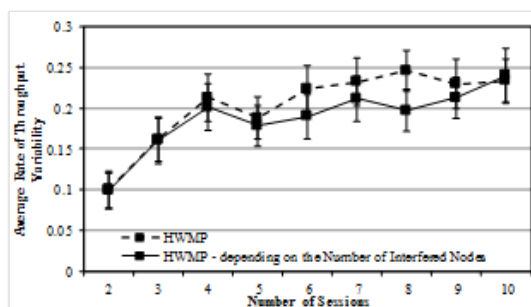


図 5 平均スループット変動率

(4) IPsec を用いたモバイルアドホックネットワークにおけるセキュリティ対策

従来有線系で使われてきた IPsec と呼ばれる暗号化通信の仕組みを用いて無線ネットワークである MANET を不正な通信使用の脅威から守る提案を行った。

IPsec / IKEv2 / MOBIKE について

IPsec の仕組み

IPsec の通信手順では「フェーズ 1」と「フェーズ 2」そして「IPsec の暗号通信」の 3 つのフェーズがある。

・「フェーズ 1」では、鍵情報を安全に運ぶた

めのトンネルを生成する。  
 ・「フェーズ2」では、トンネル内で実際の通信（通信内容のデータ）で使用するためのトンネルを作成する。  
 上記のフェーズ1とフェーズ2を合わせてIKE(Internet Key Exchange)という。  
 ・「IPsecの暗号通信」では、実データを送受信するための通信用トンネルを使用して通信を行う。  
 IPsecでは上記のような流れで通信を行っているが、MANETにIPsecを適用する際に移動通信のため途中で特定フェーズが途切れてしまう可能性がある。その際には再度フェーズを実行しなければならないため時間がかかってしまうという問題点がある。

#### 提案方式と性能評価環境

本検討では、MANETのマルチホップ環境にモバイル環境やマルチホーミング環境等を考慮したMOBIKEを採用しているIKEv2を適用した。これにより遅延時間が短くなること等を検証する。

本検討では、無線LANインターフェースを持つPCを端末とした実機による実験環境を構築して提案方式の性能を評価する。図6に実験環境を示す。

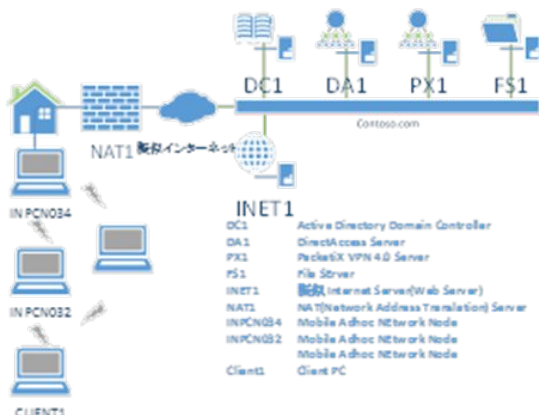


図6 実験環境

下記の実験を行った。  
 VPN接続(IKEv1およびIKEv2)がされている状態において1GBのファイルをダウンロードする時間を計測する。MANETの経路は変更しないものとする  
 次に、VPN接続(IKEv1およびIKEv2)がされている状況においてMANETの通信経路を切り替える。切り替えた際にどのくらいの早さでVPN接続が切り替わるか測定する。(IKEv1の場合手動で切り替える)。測定する際にpingを送り続けどの位落ちるのかも測定する。

#### DirectAccess

本実験では、IKEv2を構築するためにマイクロソフト社製のWindows Server 2012に搭載されているDirectAccessというテク

ノロジーを利用した。DirectAccessでは、リモートユーザーは仮想プライベートネットワーク(VPN)に接続しなくても、社内共有フォルダー、Webサイト、およびアプリケーションに安全にアクセスできる。

DirectAccessは、ユーザーのDirectAccess対応ポータブルコンピュータがインターネットにアクセスするたびに、ユーザーがログオンする前であっても、ユーザーのエンタープライズネットワークと双方向接続を確立する。また、コンピュータ起動時にネットワークの接続状況に応じて自動接続されるため、ユーザーによる接続や切断という操作は必要ない。

DirectAccessはMOBIKEのSAを再生成することなく、新たなIPアドレスを通知するだけで、既に確立されたSAを継続できる技術を利用してユーザーの操作は必要とせず再接続ができるため短時間で再接続が可能となる。

#### シミュレーション評価結果

本実験では、図7に結果の例を示す。ファイルのダウンロードはIKEv2の方が早いことが分かった。IKEv2の方がパフォーマンスの良いことが判明した。

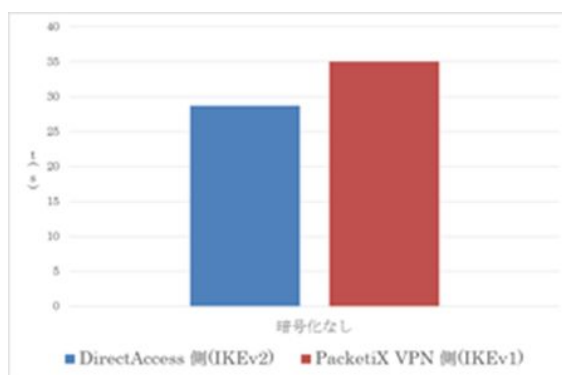


図7 実験(1)の結果

#### 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4件)

朝比奈啓、山本尚生、“無線メッシュネットワークにおける干渉ノード数を考慮した経路構築法”電子情報通信学会 技術研究報告、査読無し、Vol.113 No.405 2014、pp.99-104

吉村優太、林正博、山本尚生、“コンピュータネットワーク時代のネットワーク信頼性評価・設計法の一検討”電子情報通信学会 技術研究報告、査読無し、Vol.113No.405 2014、pp.93-98

高橋佑宗、山本尚生、“大規模無線メッシ

ユネットワークにおける幅穢制御の検討” 電子情報通信学会 技術研究報告、査読無し、Vol. 113 No.399 2014、pp.113-116

朝比奈啓、山本尚生、“無線メッシュネットワークにおける OLSR への被干渉ノード数考慮トリック実装実験” 電子情報通信学会論文誌 B、査読有り、Vol. J97-B No.9 2014、pp.821-825

〔学会発表〕(計 11 件)

大塚洋平、山本尚生、“複数シンクセンサネットワークにおける効率的なデータ要求フラッディング” 電子情報通信学会 2016 総合大会、2016 年 03 月 15 日～18 日、九州大学、(福岡)

H.Asahina, H.Yamamoto, y, I.Sasase、“Performance Evaluation of Path Metrics for Lower Throughput Fluctuation for Video Streaming Service in Wireless Mesh Networks” International Workshop on Vision Communications and Circuits (IWVCC'15)(国際学会)、2015 年 10 月 31 日～11 月 03 日、Keio Univ. Kanagawa JAPAN

H.Asahina, H.Yamamoto, K.Toyoda and I.Sasase、“Path Metrics for Lower Throughput Fluctuation for Video Streaming Service in Wireless Mesh Networks” Asia-Pacific Conference on Communications(APCC2015(国際学会)、2015 年 10 月 14 日～16 日、Kyoto Univ. Kyoto Japan

林龍一、朝比奈啓、山本尚生、“無線メッシュネットワークにおける被干渉セッション考慮メトリックを導入した HWMP の評価” 2015 年 電子情報通信学会総合大会、2015 年 03 月 10 日-13 日、立命館大学 草津キャンパス(滋賀)

朝比奈啓、山本尚生、“無線メッシュネットワークにおける被干渉セッション考慮メトリックの HWMP への実装実験” 2015 年 電子情報通信学会総合大会、2015 年 03 月 10 日-13 日、立命館大学 草津キャンパス(滋賀)

松田創、朝比奈啓、笹部聖也、山本尚生、“無線メッシュネットワークにおける指向ノード導入時の指向性末端特有の問題の特性評価” 2015 年 電子情報通信学会ソサイエティ大会、2014 年 09 月 23 日～26 日、徳島大学 常三島キャンパス(徳島)

中里竜太郎、山本尚生、“マルチパーパス無線センサネットワークにおけるフラッディング効率化の研究” 電子情報通信学会 2014 総合大会、2014 年 03 月 18 日～21 日、新潟大学(新潟)

朝比奈啓、山本尚生、“無線メッシュネットワークにおける干渉ノード数考慮経路築法の提案と OLSR への実装実験” 電子情報通信学会 2014 総合大会、2014 年 03 月 18 日～21 日、新潟大学(新潟)

高橋佑宗、山本尚生、“大規模無線メッシュネットワークにおける幅穢制御の検討” 電子情報通信学会知的環境とセンサネットワーク研究会、2014 年 01 月 23 日～24 日、ホテル奥道後(愛媛)

朝比奈啓、山本尚生、“無線メッシュネットワークにおける干渉ノード数を考慮した経路構築法” 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、2014 年 01 月 24 日、東京都市大学(東京)

吉村優太、林正博、山本尚生、“コンピュータネットワーク時代のネットワーク信頼性評価・設計法の一検討” 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、2014 年 01 月 24 日、東京都市大学(東京)

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www1.hylab.ec.tcu.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山本 尚生 (YAMAMOTO HISAO)  
東京都市大学・情報通信工学科・教授  
研究者番号：60350229

### (2) 研究分担者

宇谷 明秀 (UTANI AKIHIDA)  
東京都市大学・情報通信工学科・教授  
研究者番号：70277705