

推薦論文

MANET によるワンセグ難視聴端末救済手法

布川 雄大^{†1} 孫 為華^{†1}
安本 慶一^{†1} 伊藤 実^{†1}

本論文では、モバイルユーザが所持する無線通信可能なワンセグ携帯端末を対象に、ワンセグの受信品質が良い端末から悪い端末（難視聴端末）に対してマルチホップでビデオをストリーミング配信することで視聴品質を向上させる手法を提案する。まず、無線通信帯域や最大転送ホップ数などの制約を満たし、難視聴端末の救済数を最大化するビデオ中継パスの集合を求める問題を形式的に定義する。本問題は NP 困難問題であり短時間に最適解を求めることは難しいため、各端末が近隣端末と定期的に交換した情報をもとにグリーディにビデオ中継パスを発見するアルゴリズムを提案する。また、本グリーディアルゴリズムを改良し、近隣端末に難視聴端末が要求するワンセグチャンネルを代理受信させ中継することで救済数を増加させるアルゴリズムを提案する。3 種類の典型的なフィールドモデルを用いた計算機シミュレーションの結果、提案手法は 2 ホップの中継により、難視聴エリアへの総滞在時間の 60% 以上において視聴品質を改善できた。

MANET-based Video Quality Improvement Method for One-segment Broadcasting Service

YUDAI NUNOKAWA,^{†1} WEIHUA SUN,^{†1}
KEIICHI YASUMOTO^{†1} and MINORU ITO^{†1}

In this paper, we propose a method for improving 1seg video playback quality of mobile terminals with weak 1seg radio area (*WRA terminals*) by wireless multihop video streaming from terminals in strong 1seg radio area (*SRA terminals*). First, we formulate the problem to derive the set of video forwarding paths that maximize the number of relieved WRA terminals under the constraints on the wireless bandwidth and the maximum number of hops. Since this problem is NP-hard and it is difficult to derive the optimal solution in real-time, we propose a greedy algorithm that each WRA terminal finds a video forwarding path from a SRA terminal receiving the required 1seg channel based on

the information periodically exchanged among neighboring terminals. In order to increase the number of relieved terminals, we introduce a technique called the *cascade video forwarding* where a WRA terminal (say A) asks a neighboring SRA terminal (say B) to receive the A's requesting 1seg channel and forward the video to A, and the terminal B asks another terminal to forward the video of the B's requesting 1seg channel. Through computer simulations, we confirmed that the proposed algorithm with 2-hop relief paths improved the video playback quality in more than 60% of the total WRA staying time for three typical field models.

1. はじめに

2006 年から地上デジタル放送の携帯端末向けサービス（ワンセグサービス）が提供されている。（社）電子情報技術産業協会の 2008 年度 11 月の推計では、携帯電話国内出荷台数（3,493 千台）のうちワンセグの搭載率は 90.5%（3,084 千台）に達した。今やワンセグは、ユーザの身近な存在となっているが、ビル影や屋内、地下街などの場所では、電波が遮られて届かず受信品質の悪くなる地域が発生するという問題をかかえている。このような電波の不感地帯（以下、難視聴エリアと呼ぶ）の問題に対して、現在の解決策としてはギャップファイラー^{*1}のような電波の受信特性を改善する装置を設置することが考えられている¹⁾。しかし、難視聴エリアをすべてカバーする範囲にそれらを設置し続けるには時間とコストがかかる。これらの問題に対し、インフラに依存せず、携帯端末に搭載されるソフトウェアと端末間ネットワークによる解決ができれば、低コストでインフラと同様な効果が得られるメリットがある。

本論文では、モバイルユーザが無線アドホック通信可能なワンセグ携帯端末を所持していると想定し、近隣の複数携帯端末がアドホックネットワークを形成して、ワンセグ放送の受信品質の良い端末が受信品質の悪い端末（以下、難視聴端末と呼ぶ）に対しビデオをストリーミング配信することで視聴品質を向上させる手法を提案する。

提案手法では、ショッピングセンターや駅構内など、電波を遮断する建物が多く、ワンセグ放

^{†1} 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科

Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

*1 電波受信の困難な場所でも受信できるように設置されている補助的な無線設備。

本論文の内容は 2009 年 10 月のマルチメディア通信と分散処理ワークショップにて報告され、DPS 研究会主査により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である。

送を視聴するユーザの多い環境を想定し、各ユーザはワンセグの視聴が可能かつ IEEE802.11 規格に基づいた無線 LAN デバイスを搭載した携帯端末を持っていると仮定する。このような仮定のもと、難視聴端末の救済数を最大化するビデオ中継パスを求める問題を形式的に定義する。本問題は NP 困難問題であり、短時間に最適解を求めるのは難しいため、各端末が近隣端末から得た情報からグリーディにビデオ中継パスを求める分散アルゴリズムを提案する。提案手法では、各携帯端末は、隣接端末群と受信状況を定期的に交換することで近隣エリアの端末群がどのチャンネルをどのような受信品質で視聴しているのかという情報を取得する。そして、リアルタイム性を損なわないための伝送遅延の制約と無線通信帯域幅の制約を満たすビデオ中継パスを算出する。難視聴エリアの端末は、必ずしも近隣エリアにいる端末群と同一のチャンネルを受信しているとは限らないため、ビデオ中継パスが発見できずに救済されない場合がある。この問題に対処し救済数を増やすため、近隣端末とは受信チャンネルの異なる難視聴端末に対し、特定の近隣端末が現在受信中の受信チャンネルを難視聴端末が要求するワンセグチャンネルと同一のものに切り換えてデータ中継を行い、自身は他の近隣端末による救済で視聴を維持する代理受信アルゴリズムを提案する。さらに、提案手法を実運用する際に必要となる、自らのバッテリーを消費して他の端末を救済することへのインセンティブとして、使用するバッテリー量に応じた端末間のポイント交換機構を導入する。

障害物のない広場、ビルが林立する市街地、電車の駅構内を想定したシミュレーション実験を行った結果、提案手法による 2 ホップのビデオ転送で、難視聴エリアの総滞在時間うち 60%以上の時間において視聴品質が向上することが分かった。

2. 関連研究

携帯端末向けワンセグ放送において、地下街のような難視聴エリアの救済方法として、地上で受信した電波を SCM 方式で RoF^{*1} 伝送し、地下に再輻射する「ワンセグギャップファイラシステム」がすでに実用化されている¹⁾。RoF の普及には、光ファイバの確保、電波法制上の RoF システムの位置付けや技術基準適合証明取得の枠組み構築などの課題がある²⁾。またギャップファイラの設置においても電波利用料がかかるなどの課題がある。

アドホックネットワークを利用した通信品質改善の研究として、Luo らは第三世代携帯電話網 (1xEV-DO³⁾) のセル全体の有効な帯域を増やすために、IEEE802.11b ベースのアド

*1 RoF (radio-on-fiber)²⁾

光ファイバ無線のことで、電波を光ファイバに閉じ込めて転送することで、「電波型式の保存」と「対外電波の電磁的非干渉転送」を特徴とする。

ホックネットワークを統合する手法を提案している⁴⁾。この手法では、通信品質の悪い端末へのパケットを通信品質の良い端末に中継させている。しかし、この手法はセルラ通信の品質向上を目的としているためワンセグ受信品質の向上にそのまま使用することはできない。

アドホックネットワークにおけるデータストリーミングの経路探索に関する研究として、Prapatsaranon らは、アドホックネットワーク上のビデオストリーミングにおいてプリエンティブテクニック⁵⁾を用いて AODV を複数経路に拡張したプロトコルを提案している⁶⁾。しかし、この手法はリアクティブ型であること、転送経路が長くまた複数になることから遅延が大きくなるという問題点があり、ワンセグ放送のリアルタイム視聴に適用するには適さない。

アドホックネットワーク上のビデオ転送に関して、Chow らは、有線ネットワークで使用される複数ノードから単一ノードへのビデオ伝送の概念とアドホックネットワークの特性の両方を考慮して設計したマルチパス転送法を提案している⁷⁾。この研究では、送信端末から送信された動画データを、受信端末において多重記述符号化 (Multiple Description Coding, MDC) と複数送信点からの複数ストリーム転送 (Multipoint-to-Point) を併用して復元することによりビデオの再生品質を高めている。しかし、データ転送の複雑さおよび MDC の処理遅延の点で、本研究の目的を実現するために適用することは難しい。

Liu らは、WMAN (無線メトロポリタンエリアネットワーク) において、多数のモバイル端末にビデオがブロードキャスト配信される際に、全端末に WMAN からデータを受信させず、一部の端末には WLAN (無線 LAN) のアドホックモードで中継することにより、全体の消費電力を削減する方法を提案している⁸⁾。この手法は、受信品質が悪いエリアの存在を想定しておらず、また 1 ホップの中継しか考慮していないため、本研究が対象とするワンセグ難視聴端末の救済への適用は難しい。

提案手法は難視聴エリアにいる端末のワンセグ視聴品質を、ワンセグ受信品質の良好なエリアの端末からの中継により改善するための無線マルチホップビデオストリーミング手法を提案している点で既存手法と異なる。

3. ワンセグ視聴品質向上手法の問題設定

本章では、まず、ワンセグ放送の受信品質が受信場所や向きで変化することを予備実験により示す。その結果をふまえ、提案手法で用いる仮定について述べ、本論文で取り扱うワンセグ視聴品質向上問題を形式的に定義する。

3.1 屋内外におけるワンセグ受信品質に関する予備実験

ユーザの位置や向きにより、どれだけワンセグの受信品質が変わってくるかを調べるため、奈良先端科学技術大学院大学の校舎屋内および屋外においてワンセグの受信品質を調査した。調査した TV 局の電波塔は、すべて大学の南西に位置している。調査は学内の 5 カ所で行い、3 つの TV 局のチャンネルの受信品質を体の向きを 8 方向に変えて調べた。受信強度測定器として、BUFFALO 社の USB 対応小型ワンセグチューナ DH-ONE/U2 をノート PC に接続したものをを用いた。なお、外付けアンテナは使用せず、本体のロッドアンテナを立てた状態で計測を行った。測定用ソフトは、DH-ONE/U2 に付属の PCast TV for ワンセグ Ver.1.18 を使用し、同ソフトが表示する受信感度インジケータに基づき、受信強度を 0~5 で記録した*1。その際、信号測定器はつねに人体の前に置いた。すなわち、電波塔と反対の方向（北東）を向いているとき、人体が陰になる。

測定結果を図 1 に示す。図では上方向が北に対応しており、図中のレーダチャートの数

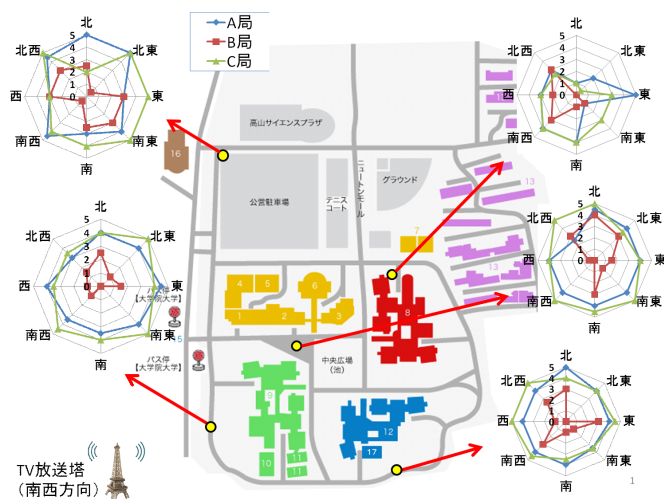


図 1 NAIST における各局 (A, B, C) のワンセグ受信強度

Fig. 1 1seg radio strength at NAIST.

*1 ここで、受信感度インジケータは非点灯、1 つ表示、2 つ表示、3 つ表示があり、受信強度を、非点灯または非点灯と 1 つ表示の振動のとき 0、安定して 1 つ表示のとき 1、1 つ表示と 2 つ表示の振動のとき 2、安定して 2 つ表示のとき 3、2 つ表示と 3 つ表示の振動のとき 4、安定して 3 つ表示のとき 5 とした。この値が 0 のときは映像がほとんど映らず、大きいほど受信品質が良い。

字は、その方向に体を向けた場合の受信強度である。図 1 より、ワンセグの受信強度が場所や向きによって大きく変化し、視聴品質に影響を与えることが分かる。

3.2 仮定

以下にワンセグサービス、ユーザ端末、ユーザの行動モデルに対する仮定を記述する。

(1) ワンセグのチャンネル

ワンセグのチャンネル (映像のソース) は k 個存在し、チャンネルの集合を $CH = \{ch_1, ch_2, \dots, ch_k, nothing\}$ とする。各ノードは、1 つのチャンネル $ch \in CH$ を選んで、視聴を行う。ユーザ u が選択しているチャンネルを $u.ch$ で表す。ここで、 $u.ch = nothing$ の場合、ユーザはどのチャンネルも視聴したくないものとする。

(2) ワンセグの受信品質

ユーザ u の位置、方向、視聴しているチャンネルをそれぞれ $u.pos, u.dir, u.ch_i$ としたとき、以下のように受信品質を表す関数 Deg を定義する。

$$Deg(u.pos, u.dir, u.ch_i) = q \quad (0 \leq q \leq 1) \quad (1)$$

$Deg(u.pos, u.dir, u.ch_i)$ は、ユーザ u が視聴するチャンネル ch_i とユーザの位置および向きに対して、電波の受信信号強度 (Received Signal Strength: RSS) を一定時間計測した際の平均値を返す関数である。この値からワンセグ映像の視聴品質が一意に決まるものとし、受信品質の値 q に対し、ビデオの転送ビットレートを $bw(q)$ とする。

(3) ワンセグ端末の機能

ユーザは以下の機能を持つ携帯端末 (ワンセグ端末) を持つとする。以下では、ユーザおよび所持している端末を単にノードと呼ぶ。

- ワンセグのチャンネルを 1 つ選んで受信・デコードし、映像を再生する機能
- 受信中のチャンネルの映像を、あるビデオコーデックに基づいたビデオデータに実時間変換し、IEEE802.11 に基づく無線通信により周辺ノードにブロードキャスト配信する機能
- ブロードキャストされたビデオデータを受信し、受信データを実時間で再生・再ブロードキャスト配信する機能

(4) ネットワークモデル

携帯端末の無線通信は IEEE802.11 の規格に基づいており、無線通信範囲は端末位置を中心とする半径 r の円内とする。また、同一無線範囲内にいる全ノードの合計使用可能通信帯域幅を BW とする。

(5) ユーザの行動モデル

ノードは、提案システムのサービスエリア（広場、市街地、駅構内、ショッピングモール内、電車内など）において、移動、静止を繰り返すとする。ただし、歩行中のワンセグ視聴は危険なため、静止中のみワンセグを視聴し、移動中はビデオの中継（無線 LAN 経由のビデオデータの受信と再ブロードキャスト）のみ行うとする。また、移動中の乗物内のユーザと乗物外（他の移動中の乗物含む）のユーザとの通信は、相対速度の高さから、本論文では対象外とする。

ノード u は自身のワンセグ受信状況が悪いときには、ある程度の視聴品質の向上が見込める同じワンセグチャンネルを視聴している最も近いノードを選択しビデオの配信を依頼する。このとき、配信を依頼する条件となる品質向上幅の最低値を $THDeg$ とする。また、ノードあたり他のノードの品質向上のため同時に転送できるビデオのビットレートの合計は制限されるとし、その閾値を $THBw$ とする。

3.3 問題設定

ノードの集合を U とする。ノード間の接続関係の集合を $E = \{(u, v) \mid u, v \in U, |(u, v)| \leq r\}$ とする。ここで、 $|(u, v)|$ は、ノード u と v の間のユークリッド距離である。ノード u の隣接ノードの集合を $N(u) = \{v \mid (u, v) \in E\}$ とする。

グラフ $G = (U, E)$ が与えられたとき、各ノード（ユーザ）が要求するデータを他ノードが協力して転送するための最適な経路を求めることが問題である。全ノード U のうち、救済されるノード（以後、被救済ノードと呼ぶ）の集合を $U' \subset U$ とする。また、ワンセグ映像を高品質で受信している端末（救済元ノードと呼ぶ）の集合を $S \subset U$ 、救済するため映像データの中継を行うノードの集合を $F \subset U$ とする。

S のノードから、 F のノードを 0 個以上経由して、 U' のノード u に至る E のリストを救済パスと呼び、 $\langle u_{k_1}, \dots, u_{k_m}, u \rangle$ で表す。ここで、 $u_{k_1} \in S, u_{k_2}, \dots, u_{k_m} \in F$ である。全救済パスの集合を $Path$ で表す。ノードの移動による救済パスの切断やビデオ転送の遅延を軽減するため、救済パスの最大ホップ数を $MaxHop$ に制限する（5章の評価では、 $MaxHop = 1, 2$ としている）。このとき、最適な救済パスの集合を導出するための制約条件を以下のように定義する。

$$\forall \langle u_{k_1}, \dots, u_{k_m}, u \rangle \in Path, (u_{k_1}, u_{k_2}), \dots, (u_{k_{m-1}}, u_{k_m}), (u_{k_m}, u) \in E \quad (2)$$

$$\forall \langle u_{k_1}, \dots, u_{k_m}, u \rangle \in Path, m \leq MaxHop \quad (3)$$

$$\forall \langle u_{k_1}, \dots, u_{k_m}, u \rangle \in Path, \quad (4)$$

$$Deg(u_{k_1}.pos, u_{k_1}.dir, u_{k_1}.ch) - Deg(u.pos, u.dir, u.ch) \geq THDeg \quad (4)$$

$$\forall u \in U, data(u) \leq BW \quad (5)$$

$$\forall u \in U, send(u) \leq THBw \quad (6)$$

ここで、

$$data(u) = send(u) + recv(u)$$

$$send(u) = \sum_{\langle u, \dots \rangle \in Path} bw(Deg(u.pos, u, u.ch)) + \sum_{\langle v, \dots, u, \dots \rangle \in Path} bw(Deg(v.pos, v, v.ch))$$

$$recv(u) = \sum_{v \in N(u)} send(v)$$

式 (2) は、より高い品質のビデオを受信する u への経路が存在するための条件を、式 (3) は救済パスにおける最大ホップ数が $MaxHop$ 以内でなければならないことを意味する。また、式 (4) は被救済ノード u と救済元ノードのワンセグ受信品質の差が示す向上幅が $THDeg$ 以上であることを、式 (5) は、 u の送信するデータ量 $send(u)$ と u の受信する（傍聴も含む）データ量 $recv(u)$ の総和が無線通信帯域幅 BW 以下でなければならないことを意味する。式 (6) は、受信品質向上のために各ノードがデータ転送を行う際のデータ転送容量（帯域）の制限を表す。

本問題の目的は、ホップ数が $MaxHop$ 以内で（条件 (2), (3)）、一定の品質向上幅が得られ（条件 (4)）、かつ無線通信資源の制約（条件 (5)）と救済元ノードの総送信容量の制約（条件 (6)）を満たす救済パスの数（すなわち、被救済ノードの数）を最大化することである。したがって、本問題の目的関数を以下のように設定する。

$$\text{maximize } |Path| \quad \text{subject to constraints (2)-(6)} \quad (7)$$

3.4 NP 困難性

制約条件 (2)-(4) を満たす通信パス（救済パス候補と呼ぶ）のすべての集合を $Path_{all}$ とする。各救済パス候補 $pc \in Path_{all}$ を救済パスの集合 $Path$ に含めるかどうかを表す 0-1 変数を $incl_{pc}$ とする。3.3 節で定義した問題、すなわち、目的関数 (7) を満たす救済パスの集合 $Path$ を求める問題は、制約条件 (5)-(6) を満たし、 $\sum_{pc \in Path_{all}} incl_{pc}$ を最大化する、各 $incl_{pc}$ の値を求める問題と等価である。この問題は、0-1 整数計画問題であり、NP 困難である。よって、3.3 節の問題は NP 困難である。

4. 提案手法

3.3 節で定義した問題は、NP 困難問題であり、分散環境で最適解を短時間に算出するの

は難しい．そのため，本章でヒューリスティックな分散アルゴリズムを提案する．

ワンセグ受信品質の高いノードから受信品質の低いノードにビデオ映像を転送することにより，高受信品質ノードの割合を増やすことが目的である．そのためには，高い品質でワンセグを受信しているノードを知る方法とそのノードまでの経路を探索する方法が必要である．以下ではこれらの方法を3つのフェーズ：近隣情報収集フェーズ，経路決定フェーズ，経路組み換えフェーズからなるノードの振舞いとして記述する．

4.1 ノードの振舞い

4.1.1 近隣情報収集フェーズ

各ノードは次に示す情報を含む Hello メッセージを，決められた周期（たとえば 60 秒）で無線範囲にブロードキャストする．ただし，視聴チャンネル $u.ch$ が変化したノード u は，ただちに Hello メッセージをブロードキャストするものとする．

- 送信ノード ID：Hello メッセージの送信元ノードの ID（IP アドレスなどの一意な値）
- 中継ノード ID：他ノードから受信した Hello メッセージを再ブロードキャストする際の中継ノードの ID
- 視聴チャンネル：Hello メッセージ送信元ノードが受信しているワンセグのチャンネル番号
- ワンセグ受信品質 q ：0 から 1 のアナログ値をとり，1 に近いほど受信強度が高い
- ビデオ転送状況（ビデオのビットレート，転送先ノード ID，転送中ワンセグチャンネル）：Hello メッセージの送信元ノードから他のノードへのビデオ転送状況
- TTL：Hello メッセージを転送する残りのホップ数（初期値は $MaxHop$ であり，転送されるたびに 1 ずつ減じられ，0 になった時点で再転送されなくなる）

Hello メッセージは無線通信範囲にいる隣接ノードに受信され，TTL 値で設定したホップ数だけマルチホップでさらに遠くのノードへ伝達される．一方，ノード u は隣接ノード v からの Hello メッセージを受信すると，受信した情報を近傍表と呼ぶ経路表に追加する．たとえば，TTL が 2 の場合には表 1 のような経路表となる．表 1 のエントリは，ワンセグチャンネル 2 を受信品質 0.8 で受信しているノード v_1 がノード v_3 を介して u の 2 ホップ先に，ワンセグチャンネル 3 を受信品質 0.7 で受信しているノード v_2 が u の 1 ホップ先に存在することを表している．また， v_1 はすでにビットレートが 416 kbps のチャンネル 2 のビデオをノード v_3 に向け転送中であることを表している．

4.1.2 経路決定フェーズ

このフェーズでは，前述のフェーズで得られた近隣のトポロジ情報から転送可能な経路の探索を行う．ノード u は，難視聴エリアに進入することで電波の受信品質が悪化し一時的

表 1 ノード u の近傍表の例 ($TTL = 2$ の場合)

Table 1 Neighbor table of node u .

送信ノード ID	中継ノード ID	視聴 ch	受信品質	転送状況 (bitrate, id, ch)
v_1	v_3	2	0.8	416k, v_3 , 2
v_2	—	3	0.7	—
v_3	—	1	0.2	—
v_4	—	2	0.1	—
...

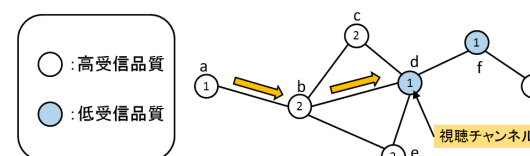


図 2 端末 d のトポロジ情報とデータ転送による救済（丸の中の数字は視聴チャンネル）

Fig. 2 Topology information retained by node d .

にワンセグの視聴が不可能になるが，近隣情報収集フェーズで取得済みのトポロジ情報（近傍表の内容）から視聴チャンネル $u.ch$ と同じチャンネルを視聴し，3.3 節の制約式 (2)–(6) を満たすようなあるノードに対してビデオ配信要求メッセージを送信する．

経路探索の方法は，転送ホップ数の小さいノードをグリーディに選択し，要求が拒否された場合，逐次近傍表を参照してグリーディに選択した別のノードに要求メッセージを送信する．これらを繰り返した結果，要求が受理されれば探索成功となり，そうでない場合，探索失敗となる．

図 2 は，Hello メッセージの TTL が 2，全ノードが 3.3 節の式 (5)，(6) の帯域制約を満たしているという想定の下で，電波受信品質の悪い端末 d が，電波受信品質の良い端末 a から端末 b を中継ノードとして 2 ホップで救済されている様子を示している．この場合，端末 d を救済できる端末は a のみであり，端末 f は視聴チャンネルは同じであるが，電波受信品質が低いため d の救済ができない．残りの端末については，視聴チャンネル自体が異なる．また，端末 f は a からのホップ数が 3 となるため救済されない．

4.1.3 経路組み換えフェーズ

難視聴端末は，必ずしも近隣エリアにいる端末群と同一のワンセグチャンネルを受信しているとは限らず，経路決定フェーズにおいてデータ中継パスが発見できずに救済されない場合

がある．この問題を解決し救済される端末数を増やすために，本フェーズで実行する代理受信アルゴリズムを提案する．

代理受信アルゴリズムでは，難視聴端末 u と， $v \in N(u)$ である隣接ノード v に対し， v が， u の視聴したいワンセグチャンネル $u.ch$ を高品質で受信できるなら， $v.ch \neq u.ch$ の場合でも， v が u のために，受信ワンセグチャンネルを $u.ch$ に変更しビデオを転送することで u を救済する．同時に， v は，自身が視聴したいワンセグチャンネル $v.ch$ のビデオを $MaxHop$ ホップ以内に存在する別のノード w に転送してもらうことで，自らの視聴を維持する．

図 3 は，代理受信アルゴリズムを適用する場合の例を表している．図 3(a) の左側に示すように，代理受信前は，低受信品質ノード b, c は，近隣に高受信品質ノード a, d が存在するが，受信チャンネルが異なるため救済要求を出すことができない．しかし， a が受信中のワンセグチャンネルを別のチャンネルに切り替えれば， b が c は救済される．代理受信アルゴリズムを適用したい場合，まず， b と c は近傍表を参照し，グリーディに選択した高受信品質ノードに対して代理受信要求メッセージを送信する．ここで，代理受信が可能となる条件は以下のとおりである．

- (i) 他のノードを救済していない．
- (ii) 自身の視聴維持のための救済ノードが存在する．
- (iii) 3.3 節の制約式 (2)–(6) を満たす．

要求を受信したノードは，条件 (i) ~ (iii) を満たすことを確認し，代理受信を行う．

図 3(a) は， a が代理受信と 2 ホップのビデオ転送で c を救済している様子を表している．この場合， a は，以前受信していたワンセグチャンネルを 1 から 3 に切り替え，自身の視聴は d からの救済で維持している．図 3(b) は，代理受信アルゴリズムのより複雑な適用例であ

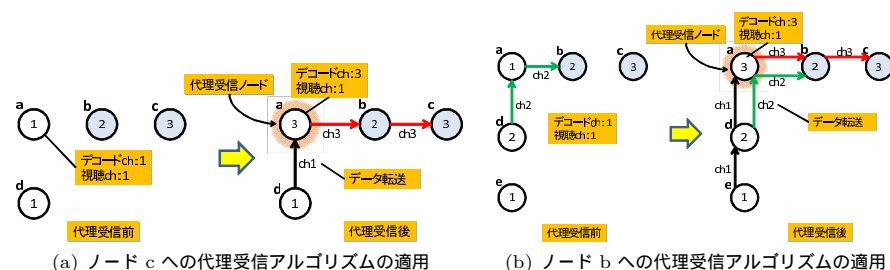


図 3 代理受信による難視聴端末の救済例
Fig. 3 Example of cascade video forwarding.

る．図 3(b) の左側に示すように，代理受信前は，低受信品質ノード b が高受信品質ノード d から a を経由して救済されている．このとき，低受信品質ノード c は経路決定フェーズにおいて救済パスが発見できない．しかし，2 ホップ先の高受信品質ノード a が条件 (1) ~ (3) を満たせば代理受信アルゴリズムを適用することで c を救済できる (図 3(b) の右側)．

4.2 インセンティブの機構

これまでに述べた方法では，救済ノードは他のノードのために自身のバッテリーを一方的に消費するため，全ユーザにとって利益が不均衡である．そのため，一定期間難視聴端末を救済することに協力したユーザは，救済した相手から救済時間にかかる電力消費に応じて報償ポイントを獲得するというインセンティブの機構を導入する．各端末が所持するポイントの初期値は，電力残量 E に応じて決定する．提案するインセンティブ機構の概要は以下のとおりである．

- (1) 各ユーザ $u \in U$ は，電力残量 $u.E$ に応じた初期ポイント $p_0(u.E)$ を持つ．
- (2) 各ユーザ u の現在の所持ポイントを $u.p$ ， t 時間救済を行う (救済される) ことで得られる (支払う) ポイントを $P(t)$ と表記する．このとき，救済を行ったユーザの所持ポイントは， $u.p = u.p + P(t)$ とし，救済されたユーザ u' の所持ポイントは， $u'.p = u'.p - P(t)$ とする．また，2 ホップ以上のビデオ中継パスによる救済では，被救済ノードは，ホップ数 $\times P(t)$ のポイントを支払うものとする．
- (3) u の電力残量 $u.E$ があらかじめ決められた閾値 E_{th} を下回っている場合には他端末への救済と他端末からの救済を行わない．
- (4) 各ユーザ u について， $u.p$ が 0 になった場合，救済を受けることはできないが， u の電池残量 E が E_{th} 以上であれば救済は可能であり，ポイントを獲得できる．

5. 評価

提案手法により，各端末での受信品質悪化時間がどの程度の割合で救済されるかを，計算機シミュレーションにより評価した．シミュレーションには，Java により実装した独自のシミュレータを用いた．

5.1 シミュレーションの共通設定

シミュレーションで用いた共通設定を表 2 に示す．

ワンセグを視聴するモバイルユーザの移動モデル (以下，ワンセグ視聴モデルと呼ぶ) を，ランダムウェイポイントモデル (以下，RWP)¹¹⁾ に基づき定義した．RWP は，その単純さおよび可用性の高さから，様々なモバイルアドホックネットワーク向け通信プロトコルの

表 2 シミュレーションの設定
Table 2 Simulation settings.

フィールド	広場, 市街地 (1,000 m×1,000 m), 駅構内 (500 m×400 m)
ノード数	200, 350, 500
モビリティモデル	静止, ワンセグ視聴モデル (移動速度 1 m/sec)
無線通信範囲/衝突検知/減衰モデル	150 m/CSMA/CA/仲上分布
ワンセグビデオのビットレート/チャンネル数	416 kbps/3
最大ホップ数 (TTL)/経路組換えフェーズ	1, 2/無, 有
ノードのバッテリー残量初期値/閾値	100%/30%
報償ポイント	1 ポイント/10 秒

基本性能を評価するためのベンチマークモビリティモデルとして広く使用されており, 提案手法の基本性能を調査する目的にも有用であると考えられる. 本移動モデルでは, 各ノードは RWP に基づき, 目的地のランダムな選択とそこへの最短経路での移動を繰り返す. ただし, 本モデルでは, ワンセグ視聴のため, 目的地への移動の最中に「立ち止まる」という動作を追加している. 具体的には, 各ノードは, 移動中・静止中にかかわらず, 30 秒ごとに「移動」と「静止」の状態を均等確率で遷移する. 移動中に静止状態に遷移した場合は移動を中断し, 最大 120 秒間静止する. 静止状態においても, 30 秒ごとに移動が静止のどちらかに状態遷移する. 移動状態に遷移した場合, 即座に目的地への移動を再開する. 3 章で述べたように移動中ノードはワンセグ放送を視聴はしないが, 他ノードのためにデータの中継はできる. また, 視聴中ノードは止まってワンセグ放送を視聴している (中継も可能).

シミュレーションフィールドとして, 障害物のない広場モデル (図 4), 障害物のある都市環境に相当する市街地モデル (マンハッタンモデル, 図 5) を用意した. さらに, 提案手法の主な使用場面と想定される駅構内を模したモデルとして, 駅構内モデル (図 6) を JR 大阪駅を模して作成した. 駅構内モデルは, ユーザの存在エリアおよび難視聴エリアの分布が, 広場モデルと市街地モデルの中間的なものになっている. 無線通信の規格は IEEE802.11, 無線通信範囲は 150 m とし, 同一無線範囲内での利用可能通信帯域幅 (実効レート) は 5 Mbps とした. また, シミュレータには, MAC 層プロトコルとして CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) を実装しており, キャリア検出や衝突回避が自動的に行われる. また, 無線範囲でパケット送信が衝突しなかったときのパケットの伝送成功率は, 距離に応じて減衰する仲上分布¹⁰⁾ に従い決定した.

ワンセグ映像転送のビットレートはワンセグ放送での実際の数値に基づいて 416 kbps とし, 本実験では, 受信品質の違いによるビットレートの変化は考慮しないものとした. 視聴

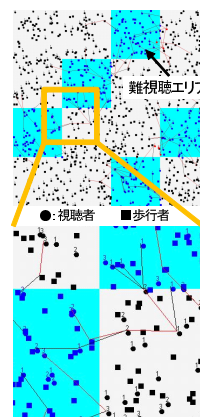


図 4 広場モデル
Fig. 4 Plaza model.

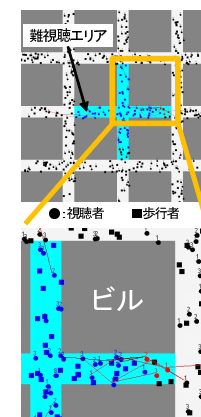


図 5 市街地モデル
Fig. 5 Manhattan model.

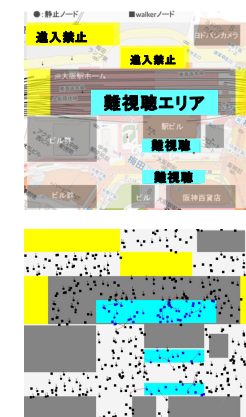


図 6 駅構内モデル
Fig. 6 Station yard model.

チャンネルは 3 種類とし, 各ノードはランダムで 1 チャンネル選択する. また, 救済パスが 1 ホップと 2 ホップの場合についてシミュレーションを行った.

本シミュレーション実験では, 特に断らない限り, すべて 4.2 節のインセンティブ機構を用いることとした. ノードのバッテリー残量 E を百分率で表現し, シミュレーション開始時は $E = 100$ とした. $E \leq 30$ のとき, 救済に関わる振舞いを停止することとした. ノード u の初期ポイントは $u.p_0 = 50$ とし, ノード間での報償ポイントのやりとりは $P(10) = 1$ とした. すなわち, 救済時間 10 秒につき 1 ポイント得られる (支払う) ことになる. なお本実験では, 簡単のため, 2 ホップによる救済では, 被救済ノードは救済元ノードに 2 倍の報償ポイントを支払うこととし, 中継ノードに支払うポイントは 0 とした^{*1}.

3 種類のフィールドモデルについて, モビリティが静止の場合とワンセグ視聴モデルの場合に分け実験した. また, シミュレーション時間は 20 分とした.

図 4~6 に各フィールドモデルにおける難視聴エリアの設定を示す. 電波塔からの放送波の方向を考慮して, 広場モデルでは, 局所的に複数の難視聴エリアを設定し, 市街地モデル

*1 本実験では, インセンティブ機構有りの場合に救済率がどれだけ下がるかに注目する. 被救済ノードは初期報償ポイントを使い果たすと, それ以降は救済を受けられなくなり救済率を下げる原因となるが, 救済元ノードおよび中継ノードは, インセンティブ機構により報償ポイントを獲得できるため, 救済率が向上する. よって, 中継ノードに支払うポイントを 0 にしても, 全体の救済率の低下にはつながらない.

では中央の位置に、そして駅構内モデルでは、駅ホームのビルの陰となる場所と、駅と百貨店に囲まれた道路に設定した。

5.2 実験の評価項目

3.3 節で定義した対象問題の目的は、被救済端末数の最大化である。しかし、実際の環境では、端末は移動し、難視聴端末数は時刻とともに変化する。したがって、各時刻において被救済端末数/難視聴端末数を最大化できることが望ましい。よって、評価実験では、システム実行時間全体における、被救済端末の延べ数/難視聴端末の延べ数を表す以下の救済率を評価メトリックとして定義する。

各端末 $u_i \in U$ においてワンセグ受信品質が悪かった時間の和を Tb_i とする。各被救済端末 $u_j \in U'$ において救済された時間の和を Tr_i とする。このとき、難視聴エリア全体における救済率 Ra を以下の式 (8) で定義する。

$$Ra = \frac{\sum_{u_i \in U'} Tr_i}{\sum_{u_j \in U} Tb_j} \times 100 \quad (8)$$

ここで、救済されたかどうかの判断は、受信品質の悪いノードが受信品質の良いノードからデータ転送を受け始めてから、 t 秒以上連続で視聴することができたかどうかで決める。実験では $t = 5$ とした。

5.3 実験結果

5.3.1 各フィールドモデルにおけるシミュレーションの様子

広場モデル、市街地モデル、駅構内モデルにおいて $MaxHop = 2$ のときのシミュレーション中のスナップショットを図 4~6 に示す。図中のノード間を結ぶ直線はビデオ中継による救済を表している。図の白色のエリアは受信品質が良く、青色のエリアは受信品質が悪いことを表している。白いエリアにいるノードから青色エリアのノードへの転送が行われており、2 ホップ以内で救済されていることが見てとれる。

5.3.2 シミュレーション結果の比較

図 7, 図 8, 図 9 に、それぞれ、広場モデル、市街地モデル、駅構内モデルにおけるシミュレーション結果を示す。提案手法は、最も典型的な設定である、モビリティ有り・2 ホップ・代理受信有りの場合に、どのフィールドモデル、ノード数に対しても、60%以上の平均救済率を達成していることが分かる。

図 7~9 より、モビリティ有り・最大ホップ数 2・代理受信有りのとき、救済率は、駅構内モデルで 70%以上と最も良く、次が市街地モデルの 65%前後、最も悪い広場モデルで 60%前

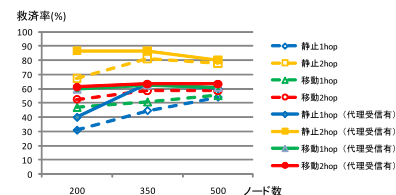


図 7 広場モデルにおける救済率
Fig. 7 Relief ratio (Plaza).

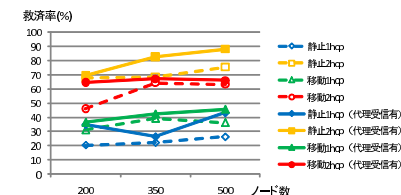


図 8 市街地モデルにおける救済率
Fig. 8 Relief ratio (Manhattan).

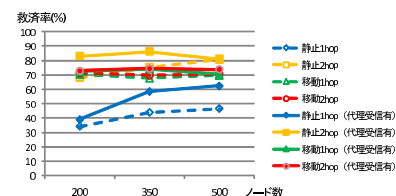


図 9 駅構内モデルにおける救済率
Fig. 9 Relief ratio (Station yard).

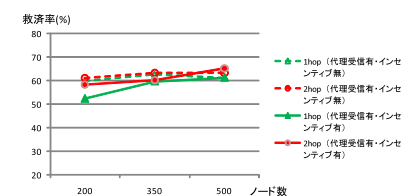


図 10 広場モデルにおけるインセンティブの効果
Fig. 10 Effect of incentive (Plaza).

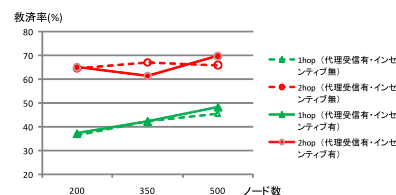


図 11 市街地モデルにおけるインセンティブの効果
Fig. 11 Effect of incentive (Manhattan).

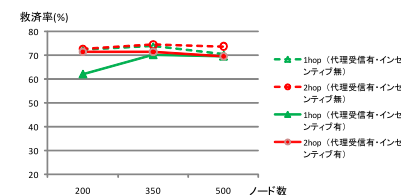


図 12 駅構内モデルにおけるインセンティブの効果
Fig. 12 Effect of incentive (Station yard).

後となった。一方、モビリティ無の場合には、最大ホップ数 2 にすることで、総じてモビリティ有りのときよりも高い救済率を達成している。ノードが移動しない場合は、シミュレーション時間全体を通して安定して救済を受けられるためと考えられる。

次に、最大ホップ数が 1 と 2 の場合を比べると、広場モデル、市街地モデルにおいて、2 ホップの場合に救済率が大きく向上している。モビリティがない場合に特に向上率が大きい。一方、駅構内モデルにおいて、モビリティがある場合には、最大ホップ数の増加による救済率の向上はほとんどないという結果となった。駅構内モデルでは、難視聴エリアの範囲

が小さく、多くの場所で1ホップでの救済を受けられるためだと考えられる。

また、いずれのフィールドモデルにおいても、ノード数が200, 350, 500と増加していくにつれ、救済率が緩やかに向上している。これは、ノード数の増加によりノード密度が増すため、救済パスが発見しやすくなるためである。この傾向はノードの存在エリアが均質な広場モデル、市街地モデルにおいて顕著である。

いずれのフィールドモデルにおいても、代理受信アルゴリズムを適用することにより、救済率が数パーセントから数十パーセント改善されていることが分かる。特に市街地モデルにおいてノード密度が低い(ノード数200)場合に効果が大きいことが分かる。逆に、ノード密度が高い(駅構内モデルまたはノード数500)場合は、代理受信アルゴリズムを適用しなくても救済パスを発見できる確率が高いことが分かる。

5.3.3 インセンティブ機構の効果

4.2節で導入したインセンティブ機構の効果を調べるため、インセンティブ機構の有無によるシミュレーション実験を行った。なお、すべての実験で代理受信機構を用いた。広場モデル、市街地モデル、駅構内モデルの実験結果を、それぞれ、図10, 図11, 図12に示す。

これらの図より、フィールドモデルやノード数、救済パスが1ホップか2ホップかに関係なく、インセンティブ機構がある場合はない場合に比べ、救済率が若干低下していることが分かる。これは、初期ポイントを使いきったノードはそれ以上の救済を受けられなくなるためである。しかし、救済率の低下度合いは数パーセントであり、提案手法はインセンティブ機構がある場合でも過度に救済率を低下させることなく機能することが分かった。

5.3.4 全ノードの救済状況

図13に、フィールドが市街地モデル、ノードのモビリティがワンセグ視聴モデル、救済パスが2ホップ以内、代理受信有り、ノード数が350の場合の、全ノードの救済状況を示す。図の横軸は経過時間であり、縦軸はノードIDである。図13(a)の色のついていない線分は、本手法適用前の各ノードのワンセグ難視聴時間帯を表し、図13(b)は、本手法適用後の各ノードのワンセグ難視聴時間帯を表している。本手法の適用により、色のついていない線分の大部分が消え、救済されていることが分かる。なお、本手法適用前の難視聴時間の合計は56,073秒、このうち救済された時間の合計(連続で5秒以上の救済のみ)は35,675秒であり、救済率は63.6%である。

6. おわりに

本論文では、ワンセグ放送の電波受信品質の良い端末から悪い端末に対して無線マルチ

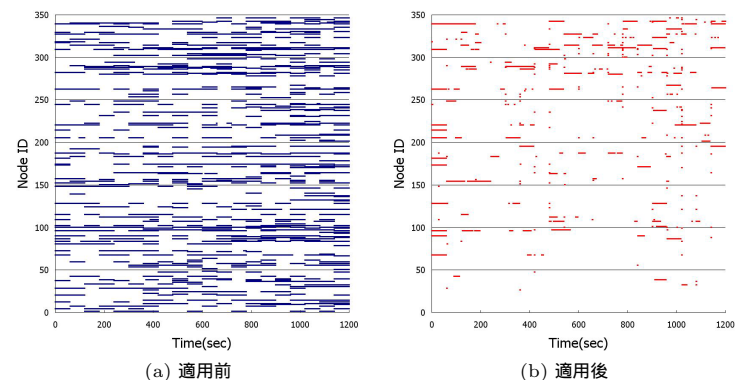


図13 全ノードの難視聴状況の改善効果(市街地, ノード数350)
Fig. 13 Relief status of all nodes (Manhattan, 350 nodes).

ホップ通信によりデータ中継を行うことで視聴品質を向上させ、難視聴エリアの端末を救済する方法を提案した。そして、提案手法を設計し、典型的なフィールドモデルを想定したシミュレーション実験を行った。結果、代理受信アルゴリズムと最大ホップ数が2の救済パスを用いて60%以上の救済率を達成できた。

今後、IEEE 802.11の様々な規格に基づいた端末の混在、端末間の通信距離に基づくマルチレート制御、障害物によるマルチパスフェージングなどを想定したより現実に近い環境での性能評価を行うことを計画している。今後の課題として、実際の市街地で計測したユーザの移動軌跡データや各道路で実際に計測した歩行者密度をベースに再現する現実に近いモビリティモデル¹²⁾を用いた性能評価を行い、提案手法の適用可能性を調査したい。さらに、携帯端末の電力モデルを用いた評価実験や、実機を用いた評価実験を実施し、提案手法の有効性を確かめたい。

参考文献

- 1) 吉田征彦, 田丸修実, 中原俊二, 大崎公士, 土田健一, 高田政幸, 小林和正, 春日博志, 丸山祐司, 那須嘉彦: 地下街等電波遮蔽空間における地上デジタル放送信号の再輻射実験, 映像学資, Vol.60, No.5, pp.686-689 (2006).
- 2) 久利敏明, 堀内幸夫, 中戸川剛, 塚本勝俊: 光・無線融合技術をベースとする通信・放送システム, 電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J91-C, No.1, pp.11-27 (2008).
- 3) 3GPP2, C.S0024: cdma2000 High Rate Packet Data Air Interface Specification.

- 4) Luo, H., Ramjee, R., Sinha, P., Li, L. and LU, S.: UCAN: A Unified Cellular and Ad-Hoc Network Architecture, *Proc. 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom 2003)*, pp.353-367 (2003).
- 5) Goff, T., Abu-Ghazaleh, N.B., Phatak, D.S. and Kahvecioglu, R.: Preemptive Routing in Ad Hoc Networks, *Proc. 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom 2001)*, pp.43-52 (2001).
- 6) Prapatsaranon, P., Rojviboonchai, K. and Aida, H.: Multi-path Routing Protocol with Preemptive Technique for Video Streaming over Ad Hoc Networks, *IEICE Technical Report*, 105 (628), pp.317-322 (2006-2).
- 7) Chow, C.O. and Ishii, H.: A Novel Approach to Supporting Multipoint-to-Point Video Transmission over Wireless Ad Hoc Networks, *IEICE Trans. Communications*, Vol.E90-B, No.8, pp.2046-2055 (2007-8).
- 8) Liu, Y. and Hefeeda, M.: Video Streaming over Cooperative Wireless Networks, *Proc. 1st ACM Multimedia Systems Conf. (MMSys2010)*, pp.99-110 (2010).
- 9) 岩波保則：ゾーン検出方式及び周波数の違いによる人体の電波伝搬特性への影響に関する追加技術試験報告書，総務省東海総合通信局人の動態把握等のためのユビキタスネットワークに関する調査検討会報告書 (2007).
- 10) Killat, M., Schmidt-Eisenlohr, F., Hartenstein, H., Rössei, C., Vortish, P., Assenmacher, S. and Busch, F.: Enabling Efficient and Accurate Large-Scale Simulations of VANETs for Vehicular Traffic Management, *Proc. 4th ACM Int'l Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET2007)*, pp.29-38 (2007).
- 11) Bettstetter, C., Hartenstein, H. and Pérez-Costa, X.: Stochastic Properties of the Random Waypoint Mobility Model: epoch length, direction distribution, and cell change rate, *Proc. 5th ACM Int'l. Workshop on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM2002)* (2002).
- 12) Maeda, K., Uchiyama, A., Umedu, T., Yamaguchi, H., Yasumoto, K. and Higashino, T.: Urban Pedestrian Mobility for Mobile Wireless Network Simulation, *Ad hoc Networks*, Vol.7, No.1, pp.153-170 (2009).

(平成 22 年 4 月 9 日受付)

(平成 22 年 11 月 5 日採録)

推薦文

本論文は，ワンセグ放送の電波受信品質の良い端末から悪い端末に対して無線マルチホップ通信によってデータ中継を行うことで視聴品質を向上させて，難視聴エリアの端末を救済する方式を提案している．受信品質の高いノードを知る方法とノードまでの経路探索についてヒューリスティックな分散アルゴリズムを使うことを提案し，その手法を様々な環境モデ

ルに対してシミュレーションによる有効性を示している．本論文の提案手法は，ワンセグ放送の難視聴エリアを救済する手法であって，またシミュレーションによって有効性も示されていることから推薦に値する．（マルチメディア通信と分散処理研究会主査 串田高幸）



布川 雄大

2008 年立命館大学情報理工学部卒業．2010 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了．現在，KDDI 株式会社勤務．



孫 為華（正会員）

2003 年大阪大学基礎工学部卒業．2008 年同大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了．同年より現在，奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教．博士（情報科学）．モバイルアドホック，車間通信，DTN に関する研究に従事．IEEE 会員．



安本 慶一（正会員）

1991 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業．1995 年同大学大学院博士後期課程退学後，滋賀大学経済学部助手．2002 年より現在，奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科准教授．博士（工学）．モバイル・ユビキタスに関する研究に従事．ACM，IEEE，電子情報通信学会各会員．



伊藤 実（正会員）

1977 年大阪大学基礎工学部卒業，1979 年同大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了．1979 年大阪大学基礎工学部助手，1986 年同講師，1989 年同助教授を経て，1993 年より現在，奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授．工学博士．データベース理論，効率的なアルゴリズム開発等の研究に従事．ACM，IEEE，電子情報通信学会各会員．