

MANETによる携帯端末でのワンセグ視聴品質向上手法

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

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。一般的にワンセグ放送は移動受信に強いと言われているが、ショッピングセンターや駅構内、ビルの陰となる場所では、電波が遮られてしまう難視聴エリアが発生する。本研究では、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、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データ中継を行うことで難視聴エリアにいる端末でのワンセグ視聴品質を向上させる方法を提案する。本稿では、無線通信帯域の制約、リアルタイム性を損なわないための伝送遅延の制約を満たした上で、難視聴エリアにおいて救済される端末数を最大化する問題を定式化し、その問題を解くヒューリスティックアルゴリズムを提案する。また、これまでに得られたシミュレーションによる評価結果を報告する。

A Method to Improve Video Quality of One-Segment Broadcasting at Mobile Terminals with MANET

YUDAI NUNOKAWA,^{†1} HIROSHI HANANO,^{†1} WEIHUA SUN,^{†1}
KEICHI YASUMOTO^{†1} and MINORU ITO^{†1}

The 1-segment broadcasting service, a digital TV broadcasting service for mobile/cell phone terminals has been provided in Japan since 2006. In general, 1-segment broadcasting is likely to achieve stable radio reception at user terminals even with strong mobility. However, there are still some areas where it is difficult to view a high quality videos (e.g., in train stations, shopping centers, etc) due to weak radio wave attenuation in those areas. In this paper, we propose a method to salvage user terminals in those weak 1-segment radio wave areas by transmitting videos from terminals in good radio wave areas through wireless multi-hop paths. For this purpose, we first formulate the problem to maximize the number of salvaged terminals in weak radio wave areas under constraints of wireless bandwidth and latency in watching videos in real-time. We propose a heuristic algorithm to solve the problem, and evaluate the algorithm with computer simulations.

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。一般的にワンセグ放送は移動受信に強いと言われているが、ショッピングセンターや駅構内、ビルの陰となる場所では、電波が遮られて届かず受信品質が悪くなる地域が発生する。このような電波の不感地帯（以下、**難視聴エリア**と呼ぶ）に対する一般的な解決策として、ギャップファイラー^{*1}のような再送出装置を設置することが考えられるが、設置コスト等に問題がある。インフラに

依存しないで、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だけで解決できれば、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。

本研究では、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、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データ中継を行うことで難視聴エリアにいる端末の視聴品質を向上させる手法を提案する。

提案手法の最大の目的は、難視聴エリアにある端末を、出来る限り救済することである。提案手法を適用する環境として、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、ワンセグ放送を視聴する歩行者の多い環境を想定し、ユーザはIEEE802.11規格に基づいた無線LANを標準搭載した携帯端末を持っているとする。このような仮定のもと、提案手法では、携帯端末が、近隣エリアにいる端末群のワンセグ受信

^{†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} ギャップファイラー
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

状況を定期的に収集・更新することでワンセグ放送に対し、どの端末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に関する情報を交換する。そして、無線通信帯域の制約、リアルタイム性を損なわないための伝送遅延の制約を満たした上でビデオを転送可能な経路を探索する。

本稿では、まず難視聴エリアにおいて救済される端末数を最大化する問題を定式化する。本問題は、組合わせ最適化問題となるため、実時間で最適解を求めることをは困難である。そこで、高受信品質ノードを近隣情報から探索し、そのノードまでの経路をグリーディに求めるヒューリスティックアルゴリズムを提案する。

提案手法を評価するために広場、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を行った。結果、提案手法により、難視聴エリアの端末の80%以上を救済できることを確認した。

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ーシステム」が既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ーの設置においても電波利用料がかかるなどの問題がある。

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。

また、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、Prapat-saranon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ため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。

3. ワンセグ視聴品質向上のための問題設定

本章では、ワンセグの視聴品質を向上させる問題についての前提条件を与え、問題を定式化する。

3.1 前提条件

(1) 想定環境

想定環境は、ショッピングセンタや駅構内など、電波を遮断する建物が多く、かつ、ワンセグ放送を視聴する歩行者が多い環境とする。例えば、都市部の駅周辺などがそれにあてはまる。また、電波受信品質が悪く、ワンセグ放送が視聴不可能な地理的領域を難視聴エリアと呼ぶ。

(2) ノードおよび無線通信の機能

ノードは歩行者が持つワンセグ放送視聴可能な携帯端末とする。ノードのモビリティモデルとしてランダムウェイポイントを考え、移動速度は、ノードが歩行者が所有するモバイル端末であることから、 $0 \sim 4\text{km/h}$ とする。また、携帯端末の無線通信はIEEE802.11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。ノードは以下の5つの機能を持つと仮定する。

- (a) ワンセグのチャンネルを一つ選んで受信し映像を再生する機能
- (b) 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
- (c) ブロードキャストされたビデオデータを受信する機能
- (d) 受信したビデオデータを実時間再生する機能
- (e) 受信したビデオデータを実時間で再ブロードキャスト配信する機能

(3) 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 $CH = \{ch_1, ch_2, \dots, ch_k, \text{nothing}\}$ とする。各ノードは、一つのチャンネル $ch \in CH$ 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、 $u.ch = \text{nothing}$ の場合、ユーザはどのチャンネルも視聴しないものとする。なお、本稿においてチャンネルとは、周波数の意味ではなくワンセグ放送の映像ソースを指している。

(4) ワンセグの視聴品質

*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「対外電波の電磁的干渉転送」を特徴とする。

ユーザ端末 u が視聴しているチャンネル ch_i の受信品質を表す関数 Deg を以下のように定義する。

$$Deg(u, ch_i) = AnalogueValue, \\ \text{where } 0 \leq AnalogueValue \leq 1 \quad (1)$$

$Deg(u, ch_i)$ は、ユーザ u が視聴するチャンネル ch_i に対して電波受信強度を示すアナログ値 $AnalogueValue$ を返す関数である。 $AnalogueValue$ が 1 の場合、そのチャンネルの映像を最高の品質で観れていることを意味する。

ノード u は自身の電波状況が悪い時には、ある程度の視聴品質の向上が見込める同じ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。この時、配信を依頼する条件となる品質向上幅の最低値を THA とする。また、各ノードが他のノードの品質向上のため転送す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 $THcost$ とする。ワンセグ映像の受信状況 Deg の時のビデオの転送ビットレートを $bw(Deg)$ と表す。

3.2 問題設定

ユーザのモバイル端末の集合を $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ とする。また、モバイル端末 u と v との距離を $distance(u, v)$ とし、モバイル端末間の辺の集合を unit disk graph model に基づき、 $E = \{(u, v) \mid u, v \in U, distance(u, v) \leq r\}$ とする。ノード u の隣接ノードの集合 $N(u)$ を次のように定義する。

$$N(u) = \{v \mid (u, v) \in E\} \quad (2)$$

アプリケーションモデルとして、電波受信状況の悪いユーザが、観たいチャンネルのビデオ配信を他の端末に要求することを想定する。すなわち、チャンネル ch を視聴しているノード u は電波状況が悪くなった時、同じチャンネル ch を高品質で受信し視聴している最も近いノードにビデオ配信を要求する。

以上のような前提の下、各ユーザが要求するデータを他端末が協力して転送するための最適な経路を求めることが、本稿で対象とする問題である。全ユーザ端末 U のうち、救済されるべき端末の集合を $U' \subset U$ とする。また、救済元となる、ワンセグ映像を高品質で受信しているソースノードの集合を $S \subset U$ 、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 のノードを幾つか経由して、 U のノードに至る E の辺のリストを救済パスと呼び、ノード u への救済パスを $\langle u_{k_1}, \dots, u_{k_m}, u \rangle$ 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。この時、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。

$$\forall u \in U', \forall (u_{k_1}, \dots, u_{k_m}, u) \in Path, \\ (u_{k_1}, u_{k_2}), \dots, (u_{k_{m-1}}, u_{k_m}), \\ (u_{k_m}, u) \in E \quad (3)$$

$$\forall \langle u_{k_1}, \dots, u_{k_m}, u \rangle \in Path, \\ Deg(u_{k_1}, y_{k_1}.ch) - Deg(u, u.ch) \geq THA \quad (4)$$

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

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

ここで、

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

式 (3) は、 U' の各ノードへの救済パスが E の辺の連結となっている（無線マルチホップパスが存在する）ことを意味している。式 (4) は各救済パスにおいて、ソースノード u_{k_1} と救済ノード u のワンセグ受信品質の差が示す品質向上幅が THA 以上であることを意味している。式 (5) は、各ノード u の隣接ノード軍 $N(u)$ と自身が利用可能な無線通信帯域の上限を BW とした場合に、 u が送信するデータ量 $send(u)$ と u が受信するデータ量 $recv(u)$ の総和が BW 以下でなければならないことを意味している。式 (6) は、各ノードが他のノードの受信品質向上のために転送できるビデオのビットレートの合計が $THcost$ 以内でなければならないことを表している。

これらの制約をもとに、救済されるべきユーザ端末の集合 U' の要素数を最大化する目的関数を次のように与える。

$$\text{maximize } |U'| \quad (7) \\ \text{subject to constraints (3) - (6)}$$

制約式 (3)-(6) を満たし、目的関数式 (7) を最大化する救済パスの集合 $Path$ を求める問題は、組み合わせ最適化問題であり、実行時間で最適解を求めるのは難しい。よって、次章で本問題を解くヒューリスティックアルゴリズムを提案する..

4. 提案手法

本章では、前章で定義した問題を解くための基本方針を示し、提案するワンセグの視聴品質を向上させるための救済パスを求めるアルゴリズムを与える。

4.1 基本方針

基本方針は、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で、高受信品質ノードの割合を増やすことである。そのため、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探索が必要である。以下ではこれらの方法を近隣情報フェーズと経路探索フェーズからなる携帯端末の振る舞いとして記述する。

4.2 端末の振る舞い

(1) 近隣情報収集フェーズ

各ノードは、自身の無線範囲に存在するノードに対し、自身の情報および TTL 値を付加した HELLO メッセージを決められた周期（例えば 60 秒）でブロードキャストする。ただし、自ノード (u) の視聴チャンネル $u.ch$ が変化した場合、直ちに HELLO メッセージをブロードキャストするものとする。HELLO メッセージに含まれる情報は以下の通りである。

- ノードの ID
- 中継ノードの ID
- 視聴チャンネル
- ワンセグの受信状況を表すアナログ値
- 転送状況 (転送中ビデオの合計ビットレート, 転送先 ID, 転送中チャンネル)
- TTL

ここで、ノード ID は IP アドレスのような一意な値である。中継ノード ID は、マルチホップの送信の場合、宛先ノードに到達するまでに経由するノードの ID のことであり、HELLO メッセージが TTL が切れるまでに経由したノードの ID が記録される。ノードの視聴チャンネルは、HELLO メッセージ送信時に視ているワンセグのチャンネル番号のことであり、受信状況は 0 から 1 のアナログ値をとり、1 に近いほど電波の受信品質が高いことを表す。また TTL は HELLO メッセージを転送した後の有効ホップ数を表す。転送される度に 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更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、受信した情報を表 1 に示す HELLO テーブルと呼ばれる経路表に追加する。表のエントリは、チャンネル 2 を 0.8 の受信強度で受信しているノード v がノード x を介して、 u の 2 ホップ先に存在していることを表している。また、 v は既に 416kbps のチャンネル 2 のビデオをノード w に向け転送中であることを表している。

(2) 経路決定フェーズ

表 1 ノード u の HELLO テーブル

ソースノード ID	中継ノード ID	視聴 ch	受信状況	転送状況 (cost,id,ch)
v	x	2	0.8	416k,w,2
...

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にワンセグの視聴が不可能になるが、プロアクティブに得たトポロジ情報 (HELLO テーブルの内容) から視聴チャンネル $u.ch$ と同じチャンネルを視聴し、制約式 (3)-(6) を満たすようなあるノードに対して接続要求メッセージを送信し映像の配信を求める。

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、接続ができない場合、逐次 HELLO テーブルを参照してグリーディに選択した別のノードに接続要求メッセージを送信する。これらを繰り返した結果、接続が確立できれば探索成功となり、接続が確立できない場合は探索失敗となる。

図 1 は、HELLO メッセージの TTL が 2、全ノードが式 (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 の救済が出来ない。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。

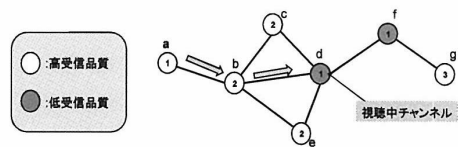


図 1 端末 d のトポロジ情報とデータ転送による救済

4.3 k -ステップ法

k -ステップ法とは、近隣情報収集フェーズと経路決定フェーズの 1 ループを 1 ステップと考え、これを k ステップ繰り返すことで、難視聴エリアのより広い範囲の視聴品質を向上させる手法である。1 ステップ目で救済されたノードは 2 ステップ目以降では高受信品質なノードとして振る舞う。そのため、長所としては、ステップ数を重ねることで HELLO メッセージの

TTLが小さい場合でも容易に難視聴エリア全体の品質向上が見込める。また、TTL=2または3でk-ステップ法を使わない場合と比べ、TTL=1のk-ステップ法はHELLOテーブルのサイズの削減が可能となる。

5. 実験

この章では、前章で述べた手法を用いたシミュレーション評価実験による結果を記述する。

5.1 シミュレーション実験の設定

シミュレーション実験の設定は以下の通りである。

- 想定環境：広場、マンハッタン、JR大阪駅周辺
- ノードのモビリティ：静止
- ノード数：500, 1000
- フィールドの大きさ：1000x1000m（広場、マンハッタン）、500x400m（JR大阪駅）
- ワンセグ受信強度：場所によってランダムに設定
- 端末の通信範囲：50m, 100m
- ワンセグ1チャンネルの転送ビットレート：416kbps
- チャンネル数：3
- ホップ数(TTL)：1, 2, 3

ノードの移動性は静止で行ったが、ノード毎にワンセグ放送の視聴の有無を分けるために静止の中で歩行中ノードと視聴中ノードを区別し、その割合を半々とした。歩行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おり、データ中継も可能である。想定環境は3種類用意し、障害物のない環境として広場モデル、障害物のある環境として都市環境（マンハッタンモデル）とJR大阪駅周辺モデルを選択した。表2に想定環境における各設定を示す。IEEE802.11gを用いることを想定し、通信範囲は50m、または100mとし、同一無線範囲内での利用可能通信帯域は54Mbpsとした。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416kbpsとし、本実験では、受信強度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。視聴可能チャンネルは3つとした。また、HELLOメッセージの転送におけるTTLは1, 2, 3の場合を想定し、それぞれ別々にシミュレーションを行った。

表2 各想定環境の設定

	広場	マンハッタン	JR大阪駅
ノード数	1000	500	500
フィールド	1000x1000	1000x1000	500x400
端末通信範囲	100	100	50

5.2 実験方法

実験には独自に作成したシミュレータを用い、3種類の想定環境モデルについて実験した。1ホップから順に3ホップまでを各ホップ毎に5回ずつシミュレーションを実行した。

難視聴エリアは各環境モデルによって位置が異なる。広場モデルはまばらに複数の難視聴エリアを設定し、マンハッタンモデルでは中央の位置に、そしてJR大阪駅周辺では、駅ホームの任意の場所と、駅と阪神百貨店に囲まれた道路に設定した。

難視聴エリア全体における救済率 r は、電波受信品質の悪い端末数 N_b のうち救済された端末数を N_r とすると式(8)で定義される。

$$r = \frac{N_r}{N_b} \times 100 \quad (8)$$

5回のシミュレーションで得られた救済率を平均し、各環境モデルで比較する。

5.3 実験結果

この章では、HELLOメッセージのTTLが2ホップの場合のシミュレーション結果を図で示し、全ての場合のシミュレーション結果の比較をまとめる。

(1) 各環境モデルの結果

広場モデル、マンハッタンモデル、そしてJR大阪駅周辺モデルの2ホップにおけるシミュレーション結果を図2, 3, 4に示す。広場とマンハッタンモデルについては一部を拡大した図とともに表示し、JR大阪駅周辺モデルについてはGoogleマップで得た地図に重ねた模式図も合わせて表示した。模式図には「難視聴エリア」、「ビル群」など内容が表記されており、ノード同士を結ぶ直線はデータストリーミングによる救済パスを表している。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。図から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ホップ以上で救済を受けているノードも存在することが見てとれる。

(2) シミュレーション結果の比較

ここでは、全ての場合によるシミュレーション結果をまとめ、各環境モデルとの比較を行う。表3に各環境モデル毎の平均救済率を示す。表3より、ホップ数を重ねるにつれて平均救済率が向上することがわかり、3ホップの場合には全ての環境モデルで80%以上の救済率が達成されている。

6. おわりに

本稿では、近隣の複数携帯端末が形成したアドホックネットワークにおいて、ワンセグ放送の電波受信品

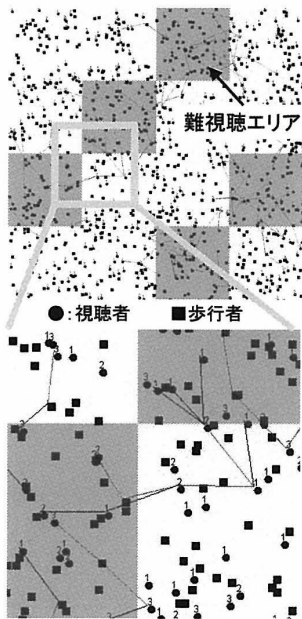


図2 広場モデル

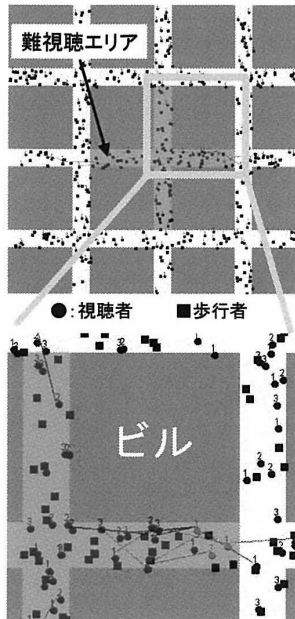


図3 マンハッタンモデル

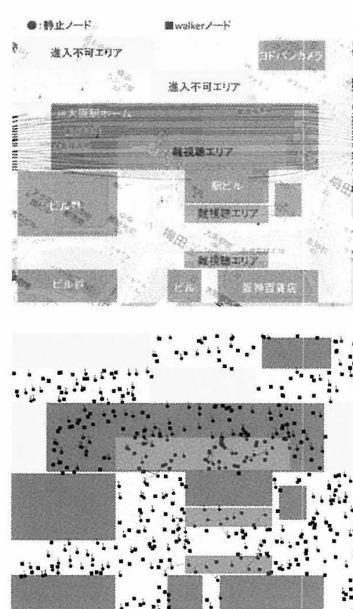


図4 JR大阪駅模式図

表3 シミュレーション結果

	広場	マンハッタン	JR 大阪駅
1hop	59.2	13.6	18.2
2hops	96.4	53.4	73.2
3hops	97.2	80.4	90.6

質の良い端末から悪い端末に対してデータ中継を行うことで視聴品質を向上させ、難視聴エリアを救済する方法を提案した。そして、提案手法を設計し、独自に作成したシミュレータを用いて評価実験を行った。結果、3ホップの転送においてはマンハッタンモデルで80.4%、JR大阪駅においては90.6%と良好な救済率を得た。

今後の課題として、 k -ステップ法の実装と評価、現実環境に近いパラメタ（電波強度、帯域、および難視聴エリア）を設定した評価実験を実施することがあげられる。また、救済率を向上させる新たな方法として、パスを構成する辺を組み換えることで救済パスの最適化を行う手法を考案する予定である。そして、将来的には実機を用いた実環境での実験を行うことにより、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) H.Luo, R.Ramjee, P.Sinha, L.Li and S.LU: “UCAN: A Unified Cellular and Ad-Hoc Network Architecture,” *Prof. of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking(Mobicom 2003)*, pp.353-367 (2003).

5) Tom Goff, Nael B. Abu-Ghazaleh, Dhananjay S. Phatak, Ridwan Kahvecioglu: “Preemptive Routing in Ad Hoc Networks,” *Prof. of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking(Mobicom 2001)*, pp.43 - 52 (2001).

6) Palap Prapatsaranon, Kultida Rojviboonchai, Hitoshi Aida: “Multi-path Routing Protocol with Preemptive Technique for Video Streaming over Ad Hoc Networks,” *IEICE Technical Report (2006)*.