

2-3 災害時における利用を想定した無線アドホックネットワークの性能評価

2-3 Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc Network for Disaster Communication

行田弘一 Hoang Nam Nguyen 羽田靖史 岡田和則 滝澤 修
GYODA Koichi, Hoang Nam Nguyen, HADA Yasushi, OKADA Kazunori, and
TAKIZAWA Osamu

要旨

大規模災害発生時には、携帯電話の基地局が物理的損壊などにより使用不能になることがあり、また基地局が使用可能な場合でも多くの通信要求が生じるため、輻輳状態となり通信を行うことが難しくなる。このような状況においても通信を可能にする手段として、無線アドホックネットワークの実用化が期待されている。無線アドホックネットワークは一方で、災害発生後に被災地の閉鎖空間を探索するためのロボットの通信に用いることも検討されている。本稿では災害発生時を想定し、無線アドホックネットワークを用いた市街地通信モデルおよび閉鎖空間内を探索するロボットの通信モデルを提案し、それぞれのモデルにおける通信性能をネットワークシミュレータにより解析し、評価した結果について示す。

The wireless ad hoc network is expected to be used as an alternative of the existing mobile communication network to make users communicate when a large-scale disaster occurs. It is also expected to be deployed to search robot rescue system in a closed space of disaster struck area. In this paper, we propose two communication models by use of wireless ad hoc network. One is a real city communication model considering the disaster occurs. The other is a search robot communication model in the closed spaces. We analyze and evaluate the communication performance of these two network models by using the network simulator.

【キーワード】

非常時通信, アドホックネットワーク, ネットワークモデル, シミュレーション
Emergency communication, Ad hoc network, Network model, Simulation

1 まえがき

現在用いられている通信ネットワークは、一般的に、ユーザ端末と最寄りの電話局または基地局などの間を接続するアクセスネットワークと、電話局または基地局などを相互に接続する基幹ネットワーク（バックボーン）により構成される。基幹ネットワークは従来マイクロ波回線などの無線が用いられることもあったが、近年は光ファイバを用いた有線によるものが主である。一方、アクセスネットワークは旧来の電話に用いられるメタル線や近年のFTTHサービスに用いられる光ファイ

バのような有線によるものと、携帯電話や無線LANなどのような無線によるものがある。特に、「いつでも、どこでも、だれとでも」通信を行うニーズの高まり、およびユーザ端末の高性能・高機能化ならびに通信方式の高度化により、アクセスネットワークとしては無線が広く用いられるようになった。

このような通信ネットワークは通常時には安定した高速な移動通信サービスを提供可能であるが、地震等の大規模災害が発生した場合、アクセスネットワークは通信可能であったとしても、基地局や基幹ネットワークが物理的な損壊や停電等

により機能を失うことにより、通信不能になることがある。また、基地局や基幹ネットワークに物理的な損壊や停電等がない場合でも、災害発生直後には安否確認等を目的として多くのユーザ端末が一斉に基地局に対して接続要求を行うため、輻輳状態となり、通信を行うことが難しくなる。携帯電話会社等の移动通信ネットワークサービス事業者は、基地局や基幹ネットワークの物理的な損壊や停電に備え臨時基地局や非常電源等のバックアップ体制を整備するとともに、一旦災害が発生した場合は早急な復旧を目指した作業を行うが、復旧までの間、通信不能な状態は続くことになる。また、災害発生直後の輻輳状態を回避するためには、基地局において接続可能なユーザ端末を制限する、いわゆる通話規制を行うことで対処しているが、規制がかかると多くのユーザ端末は通信不能となり、たとえ数時間であってもこの状態が続くことはユーザの不安につながる。

このような状況においても、ユーザが安心して通信を行うための手段として、無線アドホックネットワークを利用することが期待されている。無線アドホックネットワークはユーザ端末間の無線による通信を基本とする自律分散ネットワークであり、直接無線通信を行うことのできない端末との通信は、無線通信が可能な他のユーザ端末が中継を行うことにより実現することができる。基地局を必要とせず、通信経路は中継端末の負荷の状況や端末自体の通信範囲外への移動に応じて他の通信可能な端末を用いるよう自動的に再構成されるため、大規模災害発生時の既存移动通信ネットワークの代替手段として有効であると考えられる。

無線アドホックネットワークは前述のように既存移动通信ネットワークの代替手段として用いることができるため、災害発生現場における情報伝送にも有用である。一例として、災害発生直後の地下街や、崩壊した、もしくは崩壊の危険がある建物内などのいわゆる閉鎖空間を探索するためのロボットの通信に用いることが検討されている。閉鎖空間に残された被災者の救助のために、救助隊員が内部状況を把握せずに進入することは、二次災害が発生する恐れがあり危険である。そのため、消防庁では閉鎖空間内部の状況を把握するための化学センサやビデオカメラなどを搭載した探索ロボットを用いることを検討している。安全な

場所に設置した制御端末と探索ロボット間の通信としては、無線を用いることが望ましいが、電波の到達距離の点で制約が生じる場合がある。このため、複数の探索ロボットを用い、これらが無線アドホックネットワークを構成することで閉鎖空間内をくまなく詳細に探索することが期待されている。

本稿では、災害時における利用を想定し、無線アドホックネットワークを用いた2つの具体的なモデルを提案し、それぞれのモデルにおける通信性能をネットワークシミュレータにより解析し、評価した結果について示す。

第1のモデルは、大規模災害発生時の既存移动通信ネットワークの代替手段としての、大規模災害発生時を想定した市街地通信モデルであり、想定する通信は、通話やテレビ電話等のリアルタイム性の高いものとする。第2のモデルは、大規模災害発生後に地下街や地下鉄などの閉鎖された空間内を探索するロボットの通信モデルであり、想定する通信は、探索ロボットに搭載されたビデオカメラから制御端末に送信される映像データならびに探索ロボットの制御信号である。

2では、第1のモデルについて、提案した市街地端末移動モデルと、従来最も良く用いられてきたRandom Waypointモデルとの比較を通じてシミュレーションの妥当性を確認するとともに、性能向上のための方策について検討する。次に、実際に災害が発生した場合を想定した通信モデルについて、アプリケーションが扱うデータを動画像等とし、それに応じたデータ量の通信を行った場合におけるネットワーク性能の詳細について評価を行う。さらに、より実際の環境に近くなるよう、建物等の影響を考慮したネットワーク性能について評価を行うとともに、ネットワーク性能をさらに向上させるための方策として、領域内の中継端末数を増加させた場合についての評価を行う。

3では、第2のモデルについて、すべての探索ロボットおよび制御端末間通信を無線アドホックネットワークで実現することを最終的な目標とするが、それまでの現実的な解の1つとして、一部に有線を用いることで、有線と無線の長所を兼ね備えた有線・無線統合型アドホックネットワークを提案する。矩形の閉鎖空間内にこのネットワークを構成し、異なる2種類の探索ロボットの移動

シナリオを用いた場合の性能評価を行う。次に、閉鎖空間がクランク状に折れ曲がっている場合についても同様に性能評価を行う。

2 市街地災害時通信モデルにおける無線アドホックネットワークの性能評価

2.1 市街地通信モデルにおける性能評価

2.1.1 端末移動モデルの設定

無線アドホックネットワークは移動可能な端末で構成されているため、その性能を評価する場合には、ネットワークを構成する端末がどのように移動するかを無視できない。すなわち、端末の移動モデルとしてどのようなものを用いるかが重要である。

無線アドホックネットワークの性能評価に用いられる端末の移動モデルとして最も基本的で良く用いられるものは、Random Waypoint モデルと呼ばれるものであり、ネットワークを構成する端末の移動は以下のように規定される。

- 各端末の初期位置と目的位置を定められた領域内でランダムに決定する。
- 各端末は初期位置から目的位置に向かって一定速度で直線的に移動する。速度は0から最大速度の間でランダムに決定する。
- 目的位置に達すると、ランダムな時間休止した後、新たにランダムに決定された目的位置に向かって新たにランダムに決定された一定速度で移動する。
- シミュレーション時間中、上記動作を繰り返す。

Random Waypoint モデルはネットワークプロトコル自体の性能評価を目的としたプラットフォームとしては有用であるが、実際の利用を想定した無線アドホックネットワークの性能評価を行うためには、Random Waypoint モデルとは異なる、より実際に近い端末の移動を模擬したモデルを用いる必要がある。そのため、端末の移動モデルとして、実際の市街地における道路を模擬し、端末がこの道路に沿って移動するモデルを作成し、これを利用することを提案する。以後このモデルを Real City モデルと呼ぶ。

Real City モデルが模擬する対象となる市街地の選定にあたっては、文献[1]を参考に、Random

Waypoint モデルとの比較ならびにシミュレーションの容易さの面から以下の点に留意した。

- 一辺が約 500m の正方形の領域をもつこと。
- 道路がなるべく格子状に交差していること。

以上の点から、図1に示す宮城県仙台市青葉区の一部(黒枠内)を模擬した Real City モデルを作成した。

Real City モデルでは道路を「狭い」道路と「広い」道路の2種類にモデル化した。「狭い」道路では端末は道路の中央にのみ存在し両方向に移動可能であると定義し、「広い」道路では端末は15m間隔の平行線上を互いに異なる方向へ一方通行で移動するものと定義した。交差点およびT字路における端末の進行方向の選択確率については、都市部における移動通信の伝搬モデルとして標準化されているマンハッタンモデル[2]に基づき、図2に示す通りに設定した。端末移動度(端末移動速



図1 Real City モデルが模擬する市街地の地図

狭い道路同士の 十字路	狭い道路と広い 道路の十字路	広い道路と狭い道 路の十字路
広い道路同士の 十字路	狭い道路同士の T字路	広い道路と狭い道 路のT字路

図2 交差点およびT字路における端末の進行方向選択確率

度の最大値)は0m/秒、1m/秒、2m/秒、4m/秒、8m/秒、10m/秒の6種類とした。ここで、災害時における道路の状況や混雑等を考慮した場合、自動車や自動二輪でも徐行が必要等、様々な移動速度が考えられるため、各端末においては端末移動度の最大値以下のランダムな移動速度を初期値として与えられ、その速度で移動するものとした。具体的には、端末移動度の値はそれぞれ以下のような端末移動を想定している。

- (1) 0m/秒の場合：端末は移動せず固定
- (2) 1m/秒の場合：徒歩
- (3) 2m/秒の場合：徒歩と自転車等軽車両の混在
- (4) 4m/秒の場合：2m/秒の場合に加え極低速車両が混在
- (5) 8m/秒の場合：4m/秒の場合に加え低速車両が混在
- (6) 10m/秒の場合：8m/秒の場合に加え中速車両が混在

なお、Real City モデルにおいては一部道路について位置を変更もしくは実際にはない道路を追加しているため、実際の道路と完全には一致していない。

2.1.2 端末移動モデルの差異によるシミュレーション結果および考察

Random Waypoint モデルと Real City モデルを用いた場合のそれぞれについて、ネットワークシミュレータを用いて無線アドホックネットワークの性能評価を行った。シミュレーションでは、一般的に広く用いられている2.4GHz帯の無線LANの使用を想定し、無線LANのプロトコルとしてはIEEE802.11b/g(11Mbps)を用い、無線の到達距離は100mとした。

ルーチング(経路制御)プロトコルとしては、無線アドホックネットワークのルーチングプロトコルとして代表的なAd hoc On-Demand Distance Vector Routing Protocol (AODV) [3]およびOptimized Link State Routing Protocol (OLSR) [4]を用い、データ送受信のプロトコルとしては、リアルタイム性を考慮しUDPを用いることとした。性能評価のパラメータとしては、すべての端末で受信したデータ量の合計と、送信されたデータ量の合計の比であるデータ配信率を用いることとした。

ある端末 T_i が通信を開始する場合、 T_i を中心

とした無線到達距離を半径とする円の領域内にある他の端末 $T_2, T_3, \dots$ が通信可能とみなされる。最終的な通信相手端末 T_n が通信可能な端末であれば直接経路が作成されたものとし、通信可能な端末でなければ $T_2, T_3, \dots$ をはじめとする他の端末を経由した T_n への経路が作成された上で T_i と T_n の間でデータの送受信が行われる。端末の移動により経路は生成/変更/消滅を繰り返し、これにより T_n における受信データ量が増加するため、データ配信率も変化する。なお、2点間の伝搬損失 L_{dB} は、2点間の距離を d 、用いる周波数の波長を λ とすると、自由空間伝搬損失を求める式

$$L_{dB} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (1)$$

により決定されるので、本シミュレーションにおいて、通信可能となる伝搬損失の閾値は前述の条件より(1)式に $d=100\text{m}$ 、 $\lambda=0.125\text{m}$ を代入して得られる $L_{dB}=80\text{dB}$ である。

ネットワークシミュレータとしては、マサチューセッツ工科大学で開発され、1987年に初の商用ネットワークシミュレータとして登場以来、業界標準ツールとして世界中で使用されているOPNET [5]を用いた。

端末数を50とし、この50台の端末すべてが64バイト(=512ビット)のデータを0.25秒間隔でランダムな相手端末に対し900秒間送信した場合の、端末移動度に対するデータ配信率の変化を図3に示す。このとき、端末1台が送信するデータは2,048ビット/秒であり、ネットワーク全体で送信されるデータは102,400ビット/秒である。各端末から送出されるデータの衝突を避けるため、データの送出開始時間はシミュレーション開始時から1秒以内のランダムな時間とした。なお、シミュレーションは5種類の異なる端末の初期位置の場合について行い、データ配信率はそれぞれのシミュレーションで得られたデータ配信率の平均値とした。また、Real City モデルとの比較のため、Random Waypoint モデルにおいて、端末の休止時間は0とした。

図3から以下の事項が明らかとなった。

- 端末移動度が0m/秒の場合のデータ配信率は端末の移動モデルにかかわらず等しい。これは端末が移動しないため、端末間の通信可

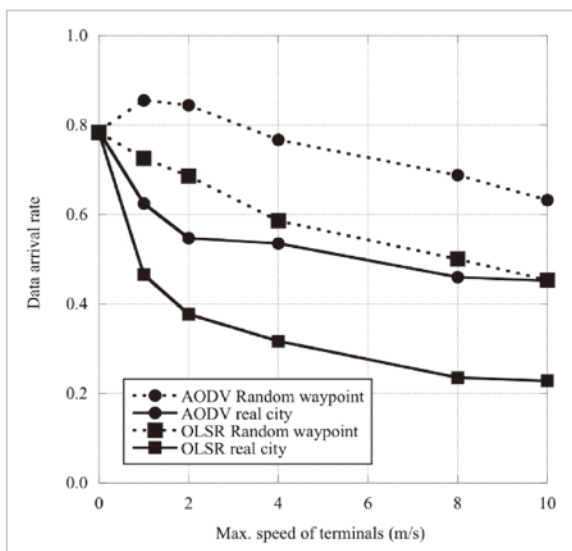


図3 端末移動度に対するデータ配信率の変化

- 能／不可能の関係が初期位置により決定され、かつ時間によって変化しないことによる。
- 端末移動度が0m/秒以外の場合、端末の移動モデルの差異にかかわらず、AODVよりOLSRの場合のデータ配信率が低い。これは、リアクティブ型プロトコルであるAODVに比べ、プロアクティブ型プロトコルであるOLSRが常に隣接端末情報をやりとりしているため、そのオーバーヘッドが大きいことによると考えられる。
 - 端末移動度が0m/秒以外の場合、端末移動度が増加するにつれてデータ配信率は低下している。これは、端末が移動することにより端末間の通信可能／不可能の関係が時間に応じて変化し、また端末の移動度が増加することにより、経路再構成の機会も増加し、これによりデータが不到達となる可能性が増えることによると考えられる。
 - AODV Random Waypointの場合のみ、端末移動度が0m/秒の場合より1m/秒および2m/秒の場合の方がデータ配信率が高い。これは、初期配置から端末が移動することにより形成された経路が、端末移動度が低い場合には比較的長く保持されることによるものであると考えられる。一方、同じ端末移動度におけるOLSR Random Waypointの場合、隣接端末情報を交換するためのオーバーヘッドがデータ配信率を低下させていると考えら

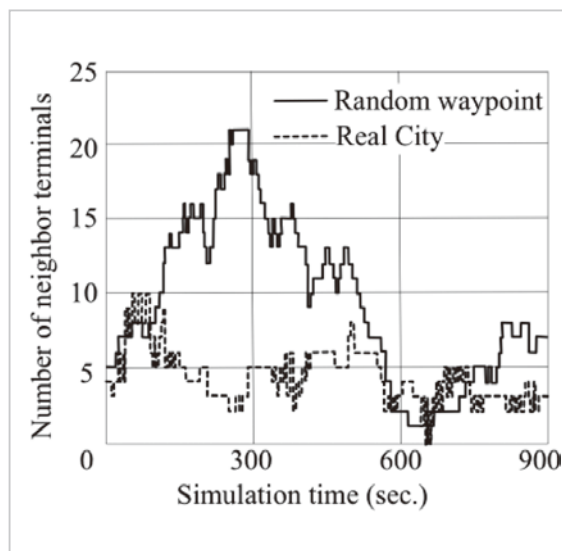


図4 通信可能な端末数の変化例

れる。

- 端末移動度が0m/秒以外の場合、AODV、OLSRいずれの場合においても、Random WaypointモデルよりReal Cityモデルの場合のデータ配信率が低い。この原因を解明するため、シミュレーション実行時に任意の1つの端末に注目し、その端末を中心とした周囲100m四方の領域内に存在する端末数を1秒おきに取得した。一例として、端末移動度1m/秒の場合のシミュレーション時間と領域内の端末数の関係を図4に示す。図4から明らかのように、Random Waypointモデルの場合の方がReal Cityモデルに比べ領域内端末数が多く、その結果データ配信率が高くなったと考えられる。なお、端末移動度が2m/秒、4m/秒、8m/秒の場合においても同様な傾向が見られた。

2.1.3 データ配信率向上のためのプロトコル属性値変更に関する検討

データ配信率の向上を目的とし、ルーチングプロトコルとして用いたAODVおよびOLSRのそれぞれについて、プロトコル属性のデフォルト値を変更してシミュレーションを行った。AODVについては、生成した経路の生存時間であるActive Route Timeout (ART)を変更し、OLSRについては近隣端末との接続状態を把握し更新するために必要なHello Interval、Topology Control Interval、Neighbor Hold Time、Topology Hold Timeの4つ

を変更した。変更前と変更後の各属性値を表1に示す。なお、シミュレーションは2.1.2同様、5種類の異なる端末の初期位置の場合について行い、データ配信率はこれらの平均値とした。プロトコル属性値変更後の端末移動度に対するデータ配信率の変化を図5に示す。図5と図3を比較すると、端末移動度が0m/秒以外の場合において、プロトコル属性値を変更することによりデータ配信率が向上している。これは、AODVではARTを小さくすることにより常に有用な経路が更新されるためであり、同様に、OLSRでも4つの属性値を小さくすることにより、近隣端末との接続状態の更新頻度が高くなるためである。しかし、それでもReal Cityモデルにおけるデータ配信率はAODVで0.7以下、OLSRで0.5以下にとどまる。また、一方でこれら属性値を変更することにより、経路制御用パケット数は増大するため、端末の消費電力が増大し、使用可能な時間が短くなってしまいう可能性がある。消費電力を抑えつつデータ配信率を向上させるための技術開発が必要であり、これらの検討については今後の課題である。

なお、端末移動度が0m/秒の場合、経路の時間的な変化はないが、プロトコル属性値を変更することにより経路更新や接続状態の更新のためのパケットが増大し、その結果データ配信率は低下する。低下の度合いはAODVでは約3%とわずかなであるが、OLSRでは約19%と比較的大きい。

2.2 災害時通信モデルにおける性能評価

2.2.1 災害時通信モデルの設定

2.1ではすべての端末が移動しながら通信することを想定し、すべての端末がランダムな相手端末に対し比較的少量のデータを送信した場合のネットワーク全体のデータ配信率について検討したが、ここでは実際に災害が発生した場合を想定した通信モデルについて、アプリケーションが扱うデータを動画等とし、それに応じた比較的大量のデータを送信する場合におけるネットワーク性能の詳細についてシミュレーションを行った。

通信モデルの一例として、市街地において大規模な災害が発生し、既存インフラネットワークが一時的に使用不能になった場合、無線アドホックネットワークを用いてレスキュー部隊等による被災現場での救援活動に必要なデータ通信を既存イ

表1 AODV および OLSR の属性値(単位: 秒)

プロトコル	属性名	変更前 (デフォルト)	変更後
AODV	Active Route Timeout	3	0.25
OLSR	Hello Interval	2	0.5
	Topology Control Interval	5	1.25
	Neighbor Hold Time	6	1.5
	Topology Hold Time	15	3.25

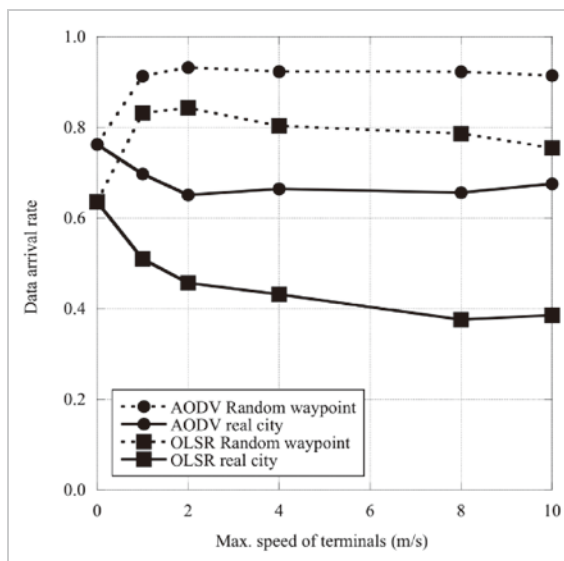


図5 ルーティングプロトコル属性を変更した場合の端末移動度に対するデータ配信率の変化

ンフラネットワークが利用可能な地点まで確保する場合を想定する。

被災現場が500m四方の領域のほぼ中央にあり、既存インフラネットワークが利用可能な地点がこの領域の右下角にあるとする。領域の中心と右下角にそれぞれ固定端末を配置し、この2台の端末間通信を実現するための無線アドホックネットワークを構成する中継端末は道路上を移動しているものとする。中継端末の移動モデルとしてReal Cityモデルを用い、無線LANの設定は2.1のシミュレーションと同一とする。また、2.1ではAODVとOLSRのプロトコル属性値を変更した場合について検討を行ったが、ここでは基礎データを得ることを目的とし、属性値はデフォルトとする。

アプリケーションが扱うデータとしてはリアルタイム性を考慮した動画等と想定し、2台の固定端末間では、それぞれ相手端末に対し、17,280

バイト (= 138,240 ビット) のデータを 1 秒ごとに UDP を用いて送信することとした。これは OPNET においてデフォルトで用意されているビデオストリームデータのうち、 128×120 ピクセルのフレームを 1 フレーム / 秒で送信することに相当するが、実際のビデオストリーム送受信に必要な初期化処理等については省略した。

2.2.2 端末初期位置の差異によるシミュレーション結果および考察

50 台の端末のうち、移動可能な 48 台の端末の初期位置のみをランダムに設定し、それ以外については条件を同じにした 5 種類のシナリオについて、端末移動度に対するデータ配信率の変化を図 6 に示す。なお、ここでは 48 台の移動端末は固定端末間の通信のためのデータを転送するだけで、自らはデータを発生させていないものとし、データ配信率はシミュレーション時間内に固定端末が受信したデータ量と送信されたデータ量の比とする。

最大移動速度が 0m/ 秒の場合についてはネットワークトポロジの初期値によって決定された固定端末間の経路の有無が時間によって変化しないことから、データ配信率は 1 (経路が形成された場合) または 0 (経路が形成されなかった場合) のいずれかの値をとるが、最大移動速度が 1m/ 秒以上になると、初期値では固定端末間の経路がない場合でも時間の経過により経路が形成され、これによってデータ配信が行われるので、データ配信率は 0 より大きな値をとる。また、無線アドホックネットワークプロトコルとして AODV を用いた場合の方が OLSR を用いた場合より同じ条件におけるデータ配信率が高い。しかし、データ配信率の絶対値は非常に低く、移動端末を中継端末として用いた場合に、映像データが十分配信可能であるとは言えない。

一例として、図 6 におけるシナリオ #2 について、最大移動速度が 1m/ 秒および 8m/ 秒の場合の領域右下端に置かれた固定端末における受信パケット数、受信パケットが通った経路のホップ数、ならびにパケット遅延の時間変化をそれぞれ図 7、図 8、図 9 に示す。

図 7 からは、1 秒毎に 138,240 ビットのデータパケットが受信される様子がわかる。AODV の場合は遅れて到着するパケットが存在し、その結果 1 秒あたりの受信パケットが倍の 276,480 ビットと

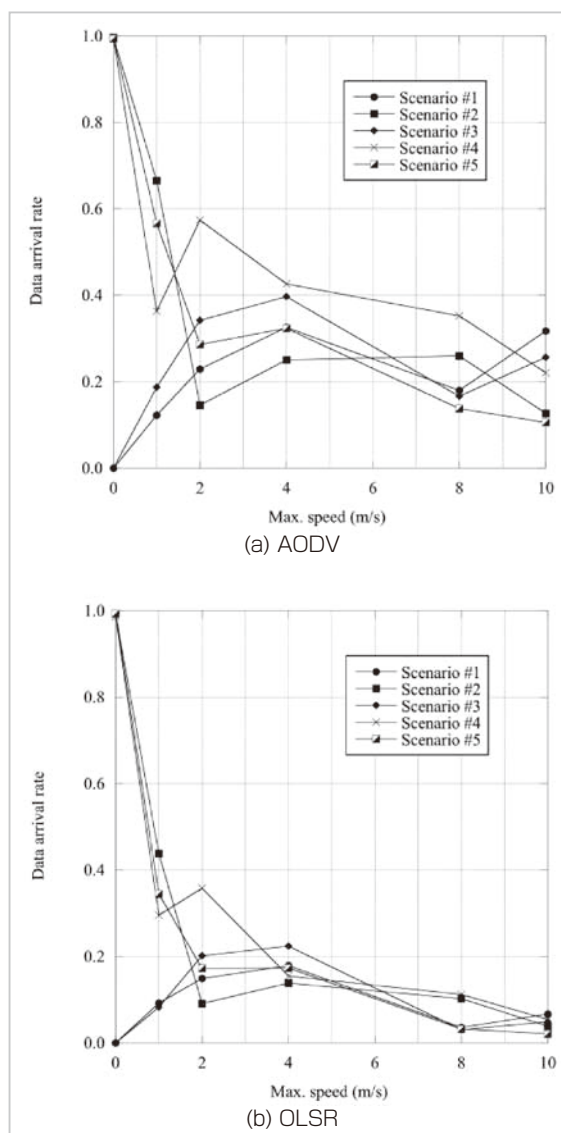


図 6 シナリオ毎の端末移動度に対するデータ配信率

なっている点が若干見られるが、OLSR の場合には見られない。いずれの場合も、端末の移動速度が大きくなるほど、受信データパケットが 0 となる (すなわち受信できない) 時間が増加している。図 8 からは、速度が 1m/ 秒の場合においても受信パケットのホップ数の変化が激しい様子が見て取れる。図中、ホップ数の一部が整数以外の値をとっているが、これはホップ数の定義を 1 秒間に受信したパケットのホップ数の平均としていることから、先に述べた AODV の場合に見られる、遅れて到着するパケットのホップ数と通常通り到着するパケットのホップ数が異なり、平均が整数にならないことによるものである。

図 9 からは、AODV の場合 0.1 秒を大きく超え

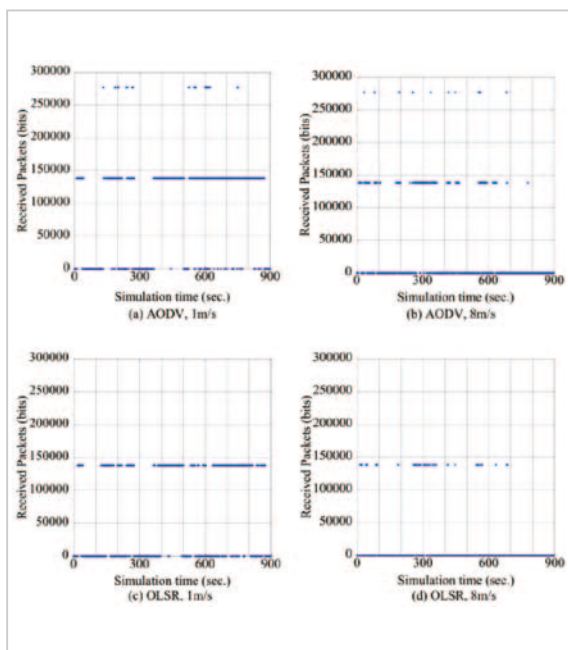


図7 シナリオ #2 におけるパケット到着量の変化

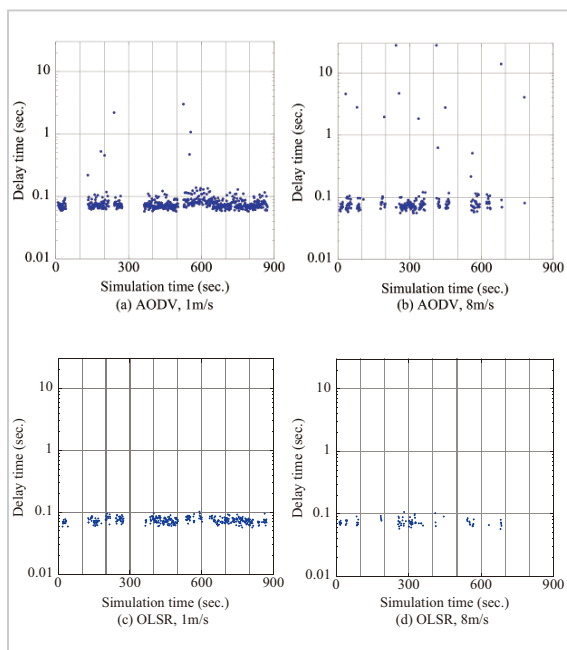


図9 シナリオ #2 におけるパケット遅延の変化

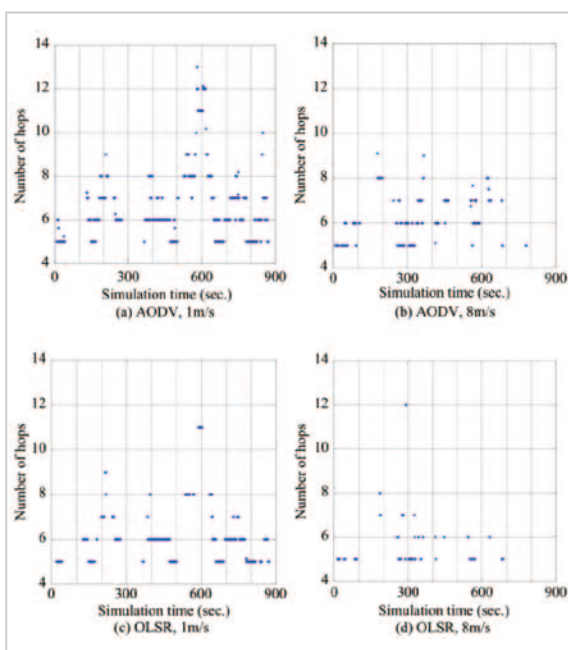


図8 シナリオ #2 における経路のホップ数の変化

るパケット遅延が存在するのに対し、OLSR の場合はほとんど 0.1 秒以内であることがわかる。即ち、パケット遅延については無線アドホックネットワークプロトコルとして OLSR を用いた場合の方が AODV を用いた場合より優れているが、一方で先に述べた通りデータ配信率では AODV の方が OLSR より優れているため、アプリケーションレベルで要求される通信品質により最適なプロ

トコルは異なると言える。

2.3 建物等の影響を考慮した性能評価

2.3.1 建物等の影響を考慮した通信モデル

2.2 まで用いてきた Real City モデルでは、市街地における道路の形状(幅および配置)については考慮したが、領域内に存在する建物等の影響は考慮しておらず、シミュレーションにおいては、ある端末が通信を開始する場合、その端末を中心として半径が無線の到達距離の円形の領域内に存在する端末を通信可能な端末としていた。しかし、実際には建物等の影響により、この円形の領域内にある端末のすべてが通信可能であるとは限らない。ここでは、より実際に近い場合を考慮したモデルを作成し、検討を行う。

本モデルにおいては道路以外の全ての場所に建物等が存在すると仮定し、ある端末が通信を開始する場合、その端末の周囲に存在する端末について、その位置関係より伝搬損失を計算し、その値が定められた閾値より小さいもののみを通信可能な端末とした。伝搬損失は建物等による見通しの有無を判定した上で、見通しのない場合は建物等による回折を考慮し、自由空間伝搬損失を求める式(1)を拡張した式(2)–(4)により求めた[6]。

$$L_{dB} = 20 \log \left(\frac{4\pi d_n}{\lambda} \right) \quad (2)$$

$$\begin{cases} k_j = k_{j-1} + d_{j-1} \cdot q_{j-1}, & k_0 = 1 \\ d_j = k_j \cdot s_{j-1} + d_{j-1}, & d_0 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$q_j(\theta_j) = \left(\theta_j \cdot \frac{q_{90}}{90} \right)^v, \quad q_{90} = 0.5, \quad v = 1.5 \quad (4)$$

ここで、最大回折数 $n=3$ とした。

なお、本モデルでは端末が建物高に比べ低い位置にあることを想定し、見通し判定は二次元（水平面方向）のみで行い、高さ（垂直面）方向の回折は考慮しない。また、伝搬損失の閾値は 2.1.2 項と同様、80dB とした。

2.3.2 固定された 2 端末が通信を行う場合のシミュレーション結果および考察

2.2 では比較的大量のデータを送信する場合についてシミュレーションを行ったが、ここでは再び比較的小量のデータの場合についてシミュレーションを行う。50 台の端末のうち、1 台を領域中央に、1 台を領域右下に固定し、固定端末間同士は 64 バイトのパケットを 0.25 秒間隔で UDP を用

いて送信し、残る 48 台の移動端末は移動しながら固定端末間のパケット中継のみを行う場合を考慮する。この場合の、固定端末におけるデータ配信率（5つのシナリオの平均値）と移動端末の最大移動速度の関係を、建物等の影響を考慮しない場合の値と比較した結果を図 10 に示す。図 10 より、建物等の影響を考慮しない場合においてある程度のデータ配信率があっても、建物等の影響を考慮することにより AODV、OLSR とともにデータ配信率は非常に低くなり、ほとんどデータが配信されることがわかった。

2.3.3 データ配信率向上のためのプロトコル属性値変更に関する検討

データ配信率の向上を目的とし、ルーティングプロトコルとして用いた AODV および OLSR のそれぞれについて、プロトコル属性値を変更してシミュレーションを行った。変更前と変更後の各属性値は 2.1.3 と同様、表 1 の通りである。プロトコル属性値変更後の端末移動度に対するデータ配信率（5つのシナリオの平均値）の変化を図 11 に示す。図 10 と図 11 より、プロトコル属性値を変更することで建物等の影響を考慮しない場合においてはある程度データ配信率の向上が見られるが、建物等の影響を考慮した場合はプロトコル属性値を変更してもデータ配信率はほとんど変わらず非常に低いままであることがわかった。

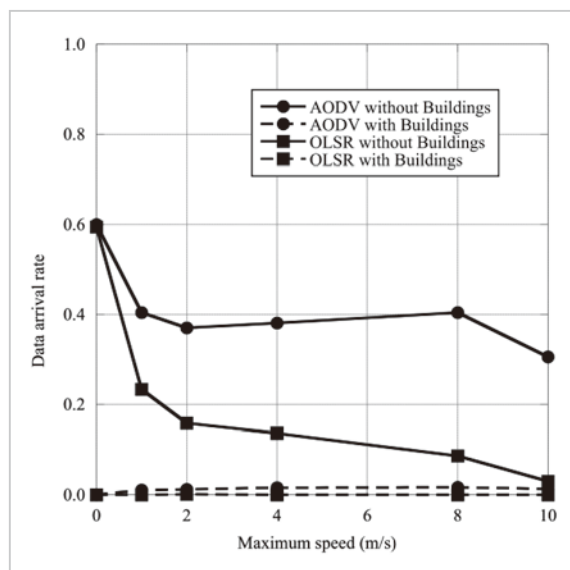


図 10 固定された 2 端末が通信を行う場合の端末移動度に対するデータ配信率の変化

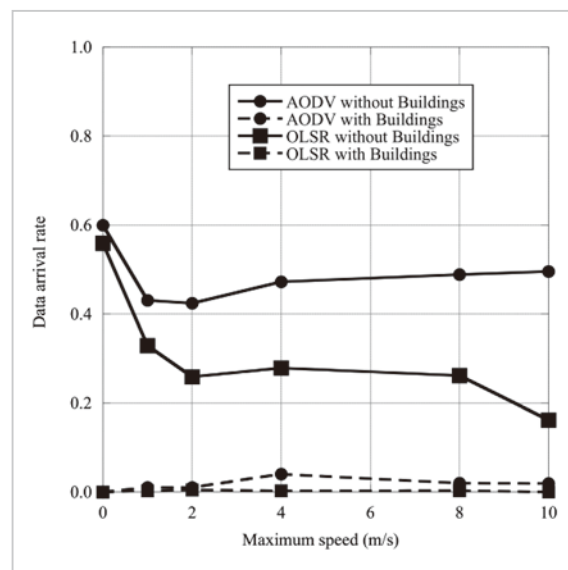


図 11 ルーティングプロトコル属性を変更した場合の端末移動度に対するデータ配信率の変化

2.4 端末数を増加させた場合の性能評価

2.4.1 固定された2端末が通信を行う場合のシミュレーション結果および考察

2.3 に示した通り、固定された2端末間の通信において、建物の影響を考慮した場合はルーチングプロトコル属性値を変更してもデータ配信率の向上は見られなかった。この原因としては、固定された2端末間の経路作成に寄与する中継端末の数が少ないことが考えられる。従って、領域内を移動する端末数を増加させることによりデータ配信率の向上が期待できる。

2.3 と同様な通信モデルにおいて、領域内の総端末数を 100、200、400 とした場合について、シミュレーションを行った。固定端末におけるデータ配信率と移動端末の最大移動速度の関係を図 12 に示す。ただし、OLSR の端末数 400 の場合については、シミュレーションに非現実的な実行時間を必要とするため結果が得られなかった。

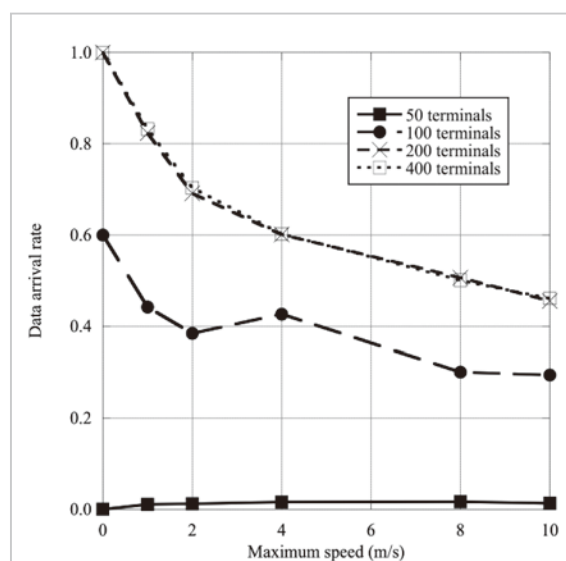
AODV の場合、端末数を 50 から 100 に増加させることによりデータ配信率は劇的に向上し、200 に増加させることによりさらに向上する。しかし、端末数が 400 の場合のデータ配信率は 200 の場合とほとんど変化がない。OLSR の場合においても端末数を 200 まで増加させることによりデータ配信率は向上するが、移動度が大きい場合についてはデータ配信率の絶対値は低いままである。

2.4.2 ルーチングプロトコル属性値の最適化

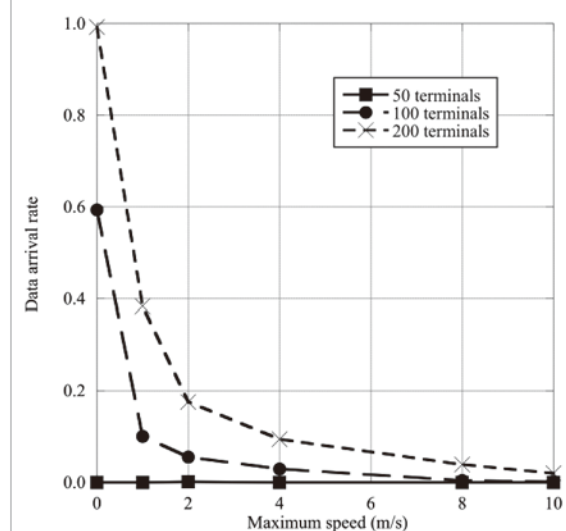
AODV および OLSR のそれぞれについて、プロトコル属性値を変更してシミュレーションを行った。変更前と変更後の各属性値はこれまでと同様、表 1 の通りである。プロトコル属性値変更後の端末移動度に対するデータ配信率 (5つのシナリオの平均値) の変化を図 13 に示す。AODV の場合、端末数が 50 の場合のデータ配信率は非常に低いが、端末数を増加させることにより、配信率は増加し、図 13(a) と図 12(a) との比較から明らかのように、プロトコル属性値変更前に比べても高い配信率となった。端末数を 200 とした場合、最大移動速度が 4m/秒以下において 9 割以上のデータ配信率が得られ、端末数を 400 以上とした場合、最大移動速度が 10m/秒以下において 9 割以上のデータ配信率が得られた。

総務省による平成 20 年通信利用動向調査報告書 (世帯編) [7] によれば、6 歳以上の個人における

携帯電話の利用率は 75.4% であり、我々が想定した区画が存在する宮城県仙台市青葉区における 6 歳以上の人口密度は仙台市の統計情報 [8] によれば平成 21 年 10 月現在で 861 人 / km² であることから、想定した 500m 四方の領域内に実際に存在する利用可能な携帯電話数は約 162 と見積もることができる。従って、普段人々が使用している携帯電話に無線アドホックネットワーク機能を実装することにより、ある程度の通信を行うことが可能であると予測できるが、非常時においてこれら



(a) AODV



(b) OLSR

図 12 端末数を増加させた場合の端末移動度に対するデータ配信率の変化

の携帯端末がすべて無線アドホックネットワーク構築に用いられたとしても、データ配信率は必ずしも十分高いとは言えない。データ配信率を向上させるためには、これらの携帯端末を利用するのみならず、予め中継に資する端末を準備しておく、非常時にこれらを稼働させる等の方策を取ることが考えられる。

OLSR の場合、端末数が 50 の場合のデータ配信率はいずれの最大移動速度においてもほぼ 0 であった。端末数を 100 とすることにより、端末数

50 の場合に比べデータ配信率を向上させることができ、図 13 (b) と図 12 (b) との比較から明らかに、移動度 0m/ 秒の場合を除きプロトコル属性値変更前に比べても高い配信率となった。しかし、端末数が同じ 100 の AODV の場合と比較すると、いずれの最大移動速度においても AODV の場合に比べ低い配信率を示した。端末数 200 および 400 の場合についてのシミュレーションは非現実的な実行時間を必要とするため結果が得られなかったが、OLSR の性質上、常にルーティング情報を交換するのに多大なパケット送受信を必要とするため、端末数をこれ以上増加させてもデータ配信率の大幅な向上は見込めず、AODV を上回るデータ配信率を得ることは難しいと思われる。

3 閉鎖空間探索ロボット通信モデルにおける有線・無線統合型アドホックネットワークの性能評価

3.1 閉鎖空間探索ロボット用有線・無線統合型アドホックネットワークの提案

探索ロボット (SR) による閉鎖空間内の十分な状況把握を可能とするための方法としては、複数台の SR でマルチホップ無線ネットワークを構成し、ロボットを制御する制御端末 (CT) まで電波の届かない閉鎖空間深部を探索する SR と制御端末間の通信を別の SR が中継することが考えられるが、遅延の問題などもあるため、現時点では十分な性能が得られない可能性が高い。別の方法として、SR-CT 間を有線ネットワークで接続することで高い通信性能を得ることはできるが、ケーブルが存在するため SR の活動の自由度は極端に低下する。将来的には無線アドホックネットワークのさらなる研究開発により、すべての SR-CT 間通信を無線アドホックネットワークで実現することを目指すべきであるが、我々はそれまでの現実的な解の 1 つとして、有線と無線の長所を兼ね備えた有線・無線統合型アドホックネットワークを提案する。このネットワークは無線端末を搭載した SR と、トレーラーロボット (TR) と呼ばれるロボットによって敷設されたアクセスポイント (AP)、および AP と CT を接続した有線 LAN ケーブルで構成される。TR は有線ケーブルおよび AP を敷設するのみで、探索は行わない。SR は TR によって敷設さ

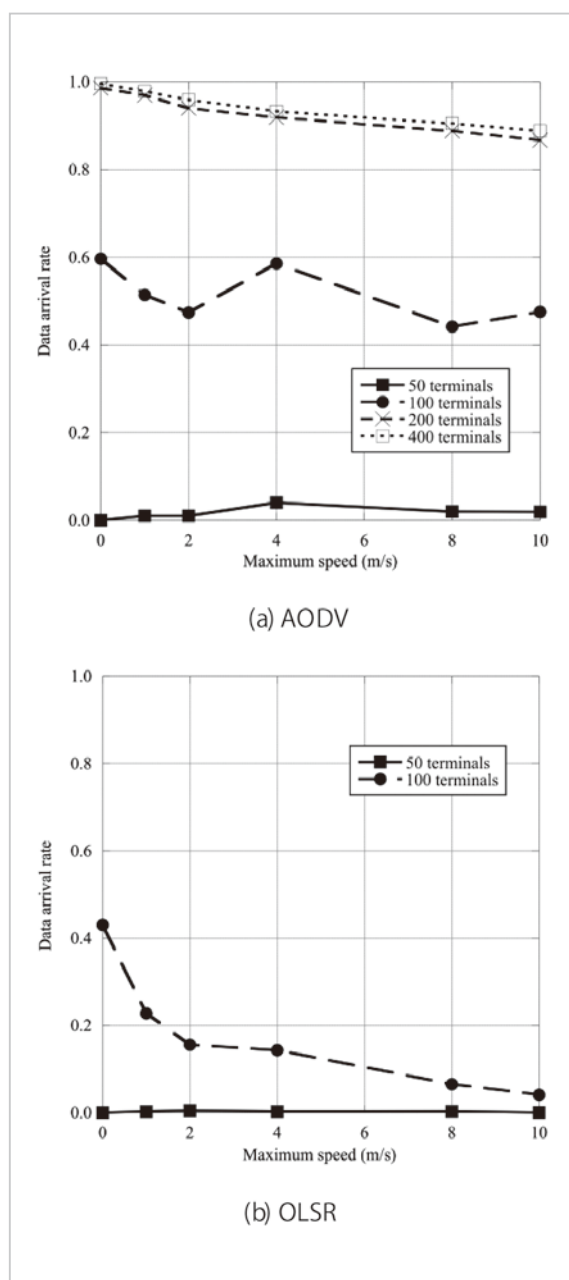


図13 パラメータ属性を変化させた場合の端末移動度に対するデータ配信率の変化

れた AP と直接無線により通信を行う。AP は無線 LAN のインターフェースと有線 LAN のインターフェースを持ち、有線 LAN 経由で制御端末との通信を行う。このネットワークを用いることで、SR の移動の自由度を確保しつつ、マルチホップ無線ネットワークよりも高い SR-CT 間通信性能が得られると期待される。

3.2 以降で、矩形およびクランク形の閉鎖空間における有線・無線統合型アドホックネットワークのモデル化を行い、2 種類の異なる SR の移動シナリオを用いた場合の性能評価について述べる。

3.2 矩形閉鎖空間探索のための有線・無線統合型アドホックネットワークのモデル化

矩形閉鎖空間における有線・無線統合型アドホックネットワークのモデルを図 14 に示す。このとき、閉鎖空間内に障害物は存在しないと仮定する。このモデルにおいて、探索のためのロボットの移動方法およびアドホックネットワークの構成方法を以下に示す。

- a) TR は図 14 中の開始点を出発し、等速度で直線上を移動しながら、50m おきに IEEE 802.11g 無線 LAN AP が接続された 700m の Ethernet ケーブルを敷設し、停止する。AP は開始点に設置する分も含め、合計 15 台設置される。開始点には制御端末(CT)が接続される。隣り合う AP では無線 LAN の周波数が重ならないよう、チャンネルが設定される。
- b) SR は開始点を出発し、後述するシナリオに従って移動する。SR は無線端末を搭載し、IEEE 802.11g 無線 LAN を用いて敷設された AP と無線通信を行う。SR は CT により有線および無線を通じて制御されるとともに、SR に搭載されたカメラの映像データを無線および有線を用いて CT へ送信する。SR は移動に伴い敷設された AP をローミングしながら通信を続け、カメラからの映像データを CT へ送信し続ける。SR の総数は 14 とする。

SR の移動シナリオとして、我々は「一斉シナリオ」と「順次シナリオ」の 2 種類を作成し、このシナリオを用いてシミュレーションを行った。これらの詳細について以下に示す。

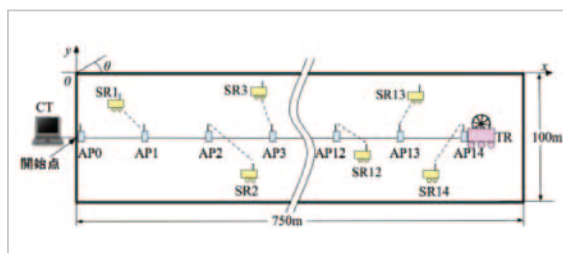


図 14 矩形閉鎖空間における有線・無線統合型アドホックネットワークモデル

3.2.1 一斉シナリオ

本シナリオでは、TR の移動開始と同時に、14 台の SR が開始点から一斉に移動を開始する。各 SR の移動は以下のシーケンスに従う。

- i) 時間 T_m の間、TR の進行方向 ($x > 0$) かつランダムに決定した角度 θ ($-90^\circ < \theta < 90^\circ$) の方向へある速度で移動する。
- ii) 時間 T_s の間、停止する
- iii) 時間 T_m の間、ランダムに決定した角度 θ ($-180^\circ < \theta < 180^\circ$) の方向へある速度で移動する。
- iv) 時間 T_s の間、停止する
- v) i) から iv) までを $(N_{SR} - 1) \times 10$ 回繰り返す。ここで N_{SR} は SR に付けられた番号であり、 $1 \leq N_{SR} \leq 14$ である。
- vi) iii)、iv) を繰り返す。

3.2.2 順次シナリオ

本シナリオでは、TR の移動開始後 100 秒経過した時刻に 14 台の SR のうち 1 台が開始点から移動を開始する。さらにその 25 秒後に次の 1 台の SR が移動を開始する。以下 25 秒おきに SR が順番に開始点から移動を開始する。各 SR は番号付けられており、同様に開始点にあるものを除く 14 台の AP にも番号付けがなされている。SR は対応する番号を持つ AP の地点まで直線的に移動した後、以下のシーケンスに従って移動する。

- i) 時間 T_m の間、ランダムに決定した角度 θ ($-180^\circ < \theta < 180^\circ$) の方向へある速度で移動する。
- ii) 時間 T_s の間、停止する。
- iii) i)、ii) を繰り返す。

3.3 矩形閉鎖空間の場合のシミュレーション結果および考察

3.2 のモデルを用い、各シナリオについてシミュレーションを行った。シミュレーションに用いたパラメータを表2に示す。シミュレーションにはOPNET ver. 11.5を用いた。

性能評価の指標として、カバー率とデータ配信率の2つを用いる。カバー率とは、閉鎖空間の全面積に対する、シミュレーション時間内に移動した全てのSRが搭載するカメラが最低一度は撮影した領域の面積の割合である。ここで、SRが搭載するカメラは、SRの位置を中心とした半径5mの円の内部を撮影可能であるとする。カバー率は、閉鎖空間内をどれだけ探索したかを表す指標となると考えられる。データ配信率は、映像データと制御データのそれぞれのデータ配信率に分けられ、映像データのデータ配信率とは、SRが送信

した映像データ量に対する、CTがSRから受信した映像データ量の割合であり、制御データのデータ配信率は、CTとSRがそれぞれ送信した制御データ配信量に対する、SRとCTがそれぞれ受信した制御データ配信量の割合である。

シミュレーション時間内における各SRの移動軌跡を図15に示す。ここで、図中の黒い四角形はAPのある場所を意味する。全てのSRが搭載するカメラが最低一度は撮影した領域を図16に示す。図16において、灰色の線で囲われて着色された領域は、ロボットが一度でも通った領域を示し、領域内部の色は、ロボットがその場所を通った度数を表す。シミュレーション時間の経過に応じたデータ送受信量の変化を図17に示す。カバー率とSRの全送受信データ量から計算した配信率を表3に示す。

図16および表3から明らかなように、カバー率については、順次シナリオの場合に比べ一斉シナ

表2 シミュレーションに用いたパラメータ

パラメータ名		値
シミュレーション時間		900 秒
SRの移動時間 T_m		4 秒
SRの停止時間 T_s		1 秒
パケット送信レート	映像データ	1.4Mbps
	制御データ	10kbps
ローミング確認間隔		10 秒
SR-AP 間距離 d に応じた伝送レート	54Mbps ($0 \leq d < 7m$)	
	11Mbps ($7m \leq d < 25m$)	
	2Mbps ($25m \leq d < 39m$)	
	1Mbps ($39m \leq d < 150m$)	

表3 矩形閉鎖空間におけるカバー率およびデータ配信率

	カバー率 (A)	データ配信率			(A) × (B)
		映像デー タ (B)	制御データ		
			SRs to CT	CT to SRs	
一斉シナ リオ	0.594	0.296	0.759	0.834	0.176
順次シナ リオ	0.464	0.588	0.885	0.879	0.273

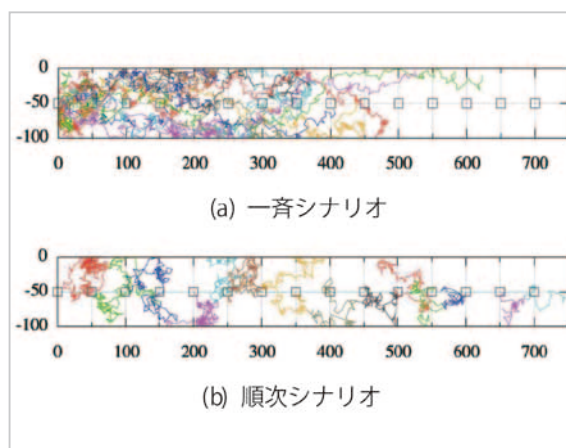


図15 矩形閉鎖空間における各SRの移動軌跡

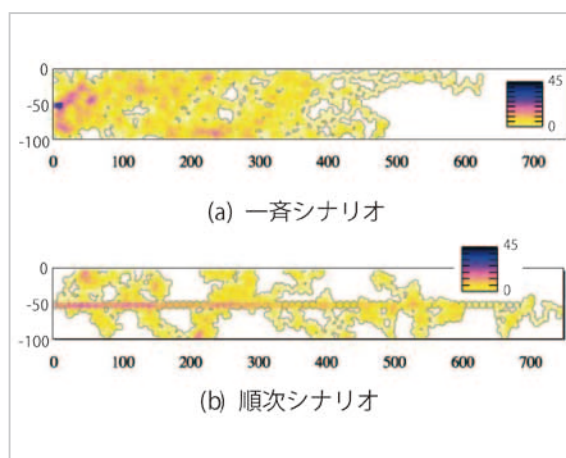


図16 矩形閉鎖空間においてSRが搭載するカメラが撮影した領域

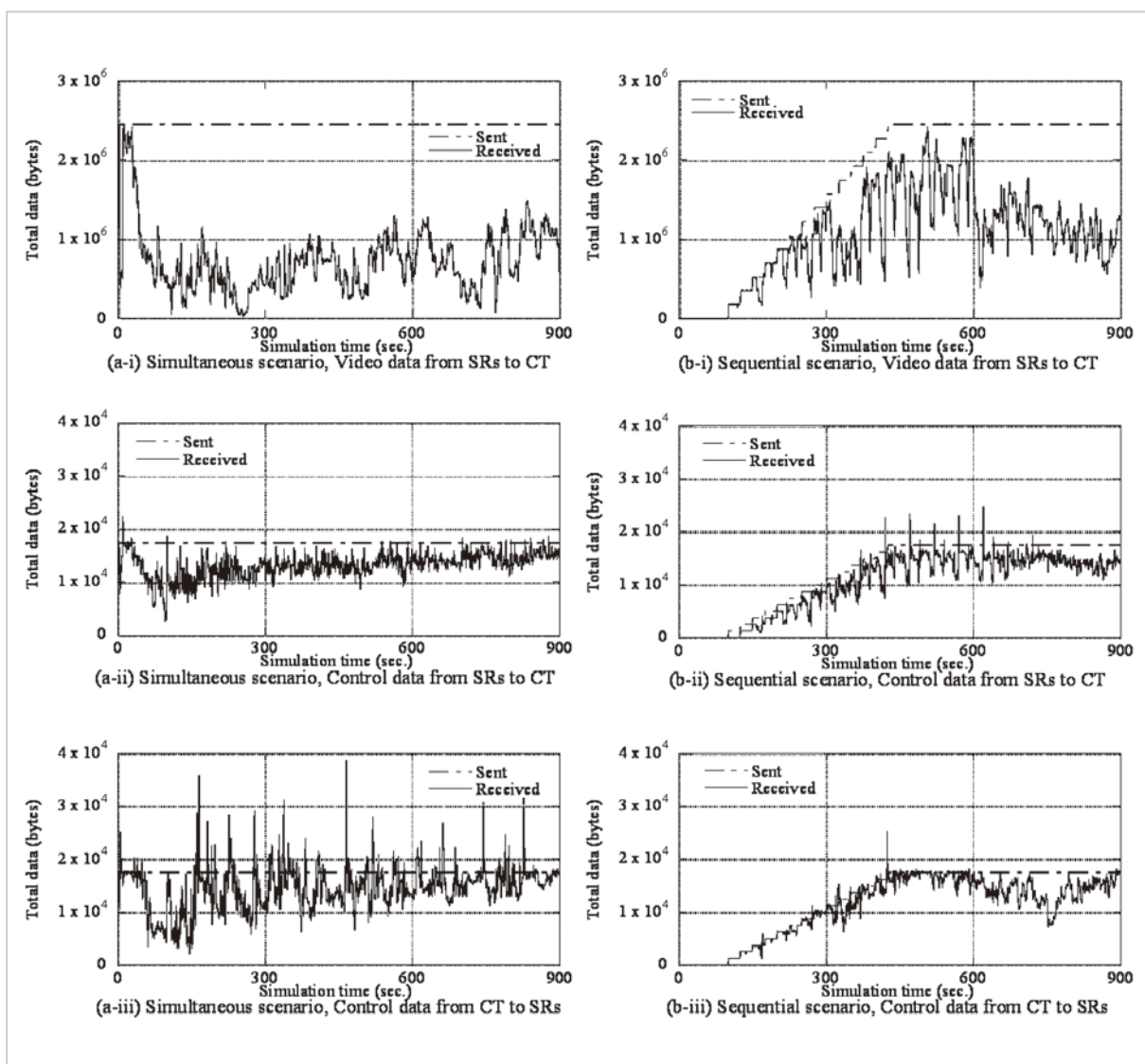


図17 矩形閉鎖空間における全データ送受信量の時間変化

リオの場合の方が高く、より広い範囲を探索できていると言えるが、一方、データ配信率については、特に映像データについて、一斉シナリオの場合に比べ順次シナリオの場合の方が高い値となっている。一斉シナリオの場合の配信率が低いことは図 17 (a-i) において、シミュレーション開始直後を除き、CT での受信データが非常に低い状態が続いていることから明らかである。この原因としては、一斉シナリオではシミュレーションが開始されると、多くの SR が同時に AP にアクセスするため、AP においてパケット衝突が起きているためであると考えられる。このことは、全ての SR が搭載するカメラが最低一度は撮影した領域を表す図 16 において、領域の色から開始点の付

近を何度も SR が通っていることから明らかである。順次シナリオの場合、図 16 における領域の色から SR が一斉シナリオの場合に比べて分散していることは明らかであり、その結果 AP におけるパケット衝突が一斉シナリオの場合に比べて少ないことが予想される。

また、シミュレーション時間が 600 秒以降において、順次シナリオの場合の映像データ配信率が低下が見られる。この理由を明らかにするため、シミュレーション時間の経過に対する、SR と AP 間の無線 LAN の伝送レートの変化を調査した。無線 LAN の伝送レートは表 2 に示す通り、SR と AP 間の距離に応じて 1 Mbps から 54Mbps まで段階的に変化する。それぞれの伝送レートを使っ

3.5 クランク形閉鎖空間の場合のシミュレーション結果および考察

クランク形閉鎖空間の場合についても、矩形閉鎖空間の場合と同様にシミュレーションを行った。閉鎖空間の形状以外のパラメータは矩形閉鎖空間と同一である。また、SR の移動方向を決定する θ を与えるためのランダムシード値も同一とした。シミュレーション時間内における各 SR の移動軌跡を図 20 に示し、全ての SR が搭載するカメラが最低一度は撮影した領域を図 21 に示す。図 15 と図 20 を比較すると、各 SR の軌跡は特に順次シナリオの場合、閉鎖空間の形状にかかわらず類似している。これは SR の移動方向を決定する θ を与えるためのランダムシード値に同一のものをを用いたためと考えられる。

シミュレーション時間の経過に応じたデータ送受信量の変化を図 22 に示す。カバー率と SR の全送受信データ量から計算した配信率を表 4 に示す。これらを矩形閉鎖空間の場合と比較すると、一斉シナリオの場合については、閉鎖空間の形状の違いはカバー率と映像データ配信率の両方に影響を与えている。一方、順次シナリオの場合につ

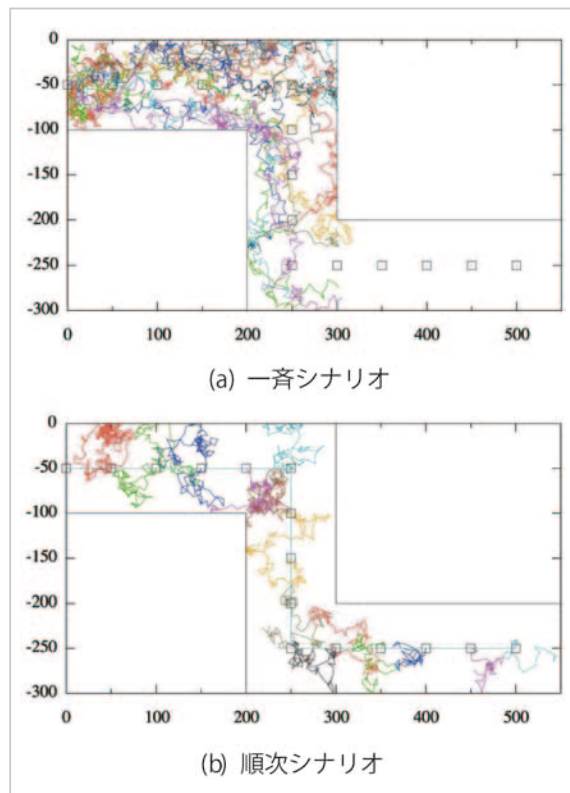


図20 クランク形閉鎖空間における各 SR の移動軌跡

いては、閉鎖空間の形状が異なっても、カバー率と映像データ配信率はほぼ同じ値となっている。これは、SR の移動方向を決定する θ を与えるためのランダムシード値として同一のものをを用いたため、SR と AP の相対位置が閉鎖空間の形状によらずほぼ同じであったことによるものであると考えられる。

シナリオの性能比較をするための、カバー率とビデオデータ配信率の積を表 4 に示す。この値から、クランク形閉鎖空間においても、順次シナリオの方が一斉シナリオに比べ性能が高いと言える。

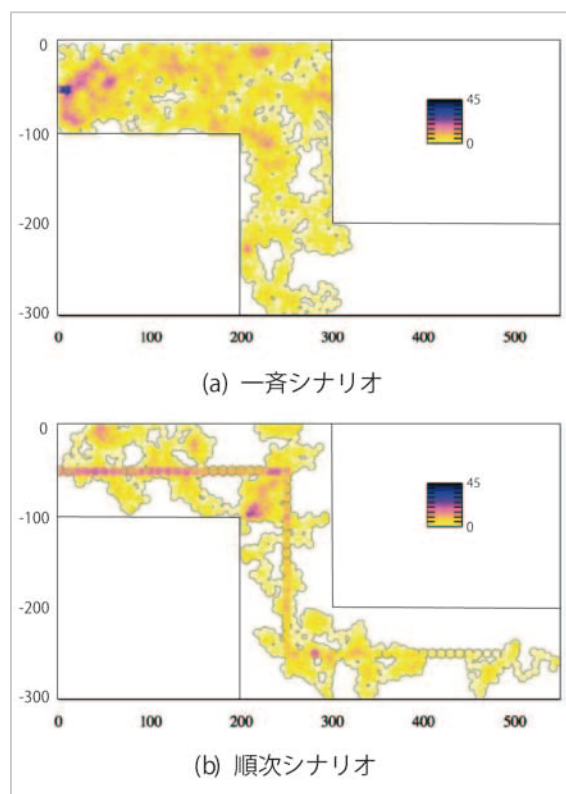


図21 クランク形閉鎖空間において SR が搭載するカメラが撮影した領域

表 4 クランク形閉鎖空間におけるカバー率およびデータ配信率

	カバー率 (A)	データ配信率			(A) × (B)
		映像データ (B)	制御データ		
			SRs to CT	CT to SRs	
一斉シナリオ	0.574	0.336	0.773	0.854	0.193
順次シナリオ	0.424	0.587	0.863	0.872	0.249

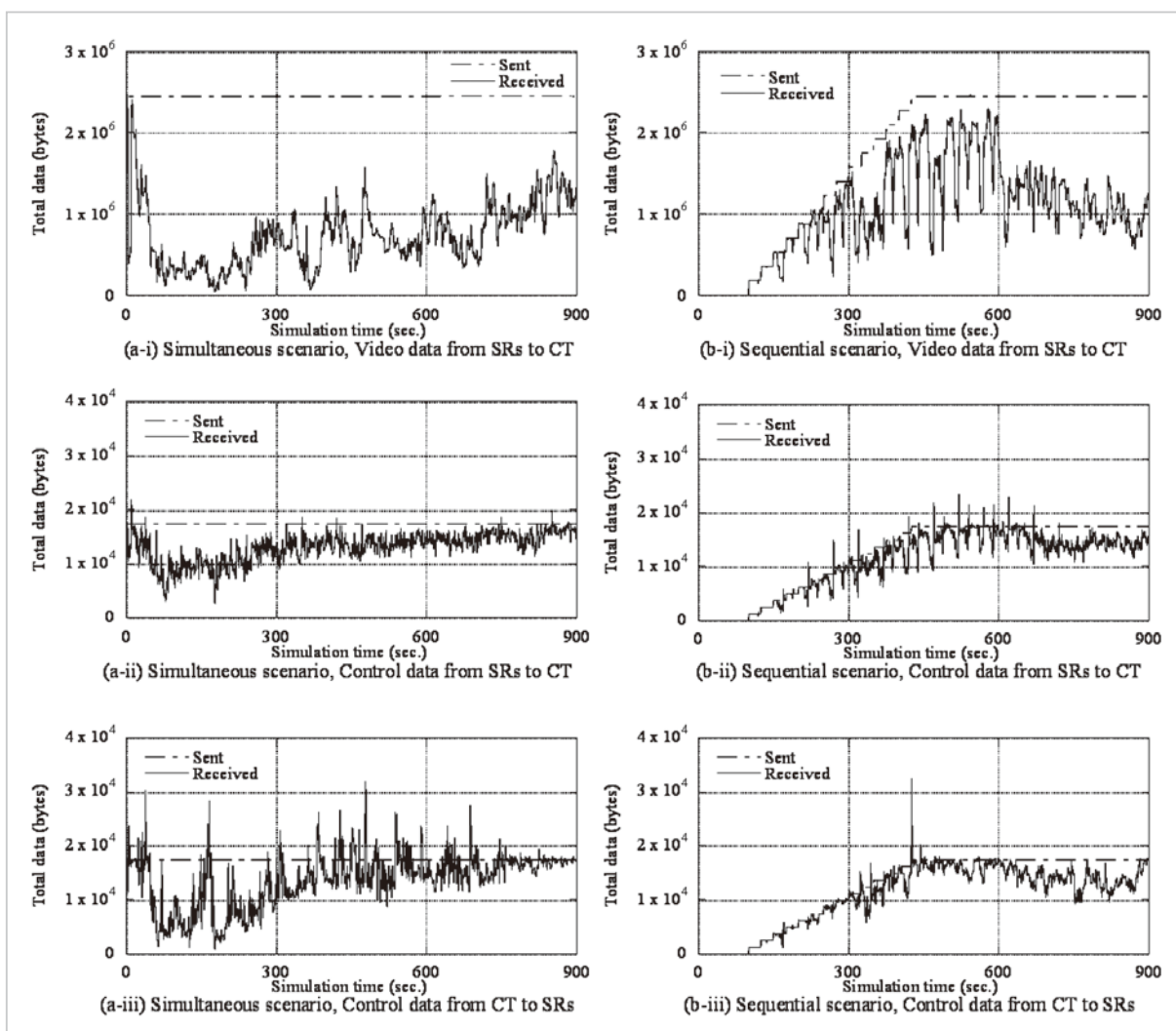


図22 クランク形閉鎖空間における全データ送受信量の時間変化

3.6 SRの移動方向を決定するランダムシード値を変化させた場合のシミュレーション結果および考察

前節の結果より、SRの移動方向を決定する θ を与えるためのランダムシード値がシミュレーション結果に重要な影響を与えていると考えられるので、ここでは、ランダムシード値として別の値を用いてシミュレーションを行った。矩形およびクランク形のそれぞれの閉鎖空間について、一斉シナリオを用いた場合のSRの移動軌跡を図23に示し、全てのSRが搭載するカメラが最低一度は撮影した領域を図24に示す。カバー率とSRの全送受信データ量から計算した配信率を表5に示す。表5と表3および表4との比較より、ランダムシード値を変化させた場合、特にクランク形閉鎖空間においてカバー率および映像データ配信率

に大きな違いが見られた。これは図20(a)と図24(b)を比較すれば明らかなように、ランダムシード値を変更することにより、SRの移動軌跡が大きく異なることによるものである。

表5 一斉シナリオにおいてランダムシード値を変化させた場合のカバー率およびデータ配信率

	カバ ー 率 (A)	データ配信率			(A) × (B)
		映像デー タ (B)	制御データ		
			SRs to CT	CT to SRs	
矩形 閉鎖空間	0.537	0.299	0.745	0.719	0.161
クランク形 閉鎖空間	0.531	0.298	0.753	0.787	0.158

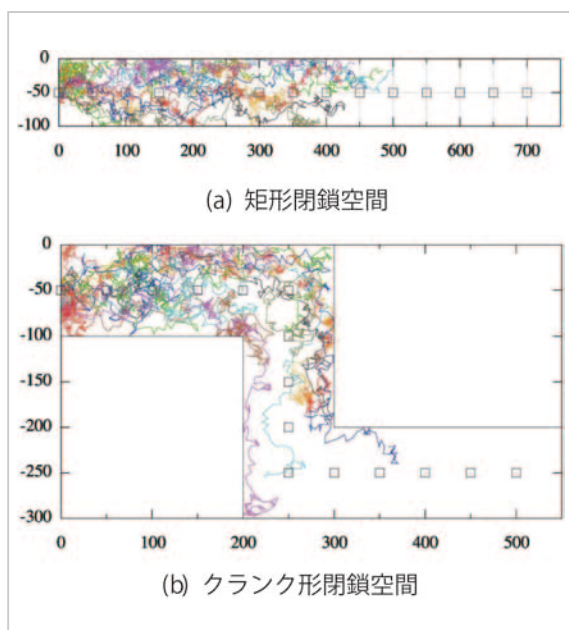


図23 一斉シナリオにおいてランダムシード値を変化させた場合の各SRの移動軌跡

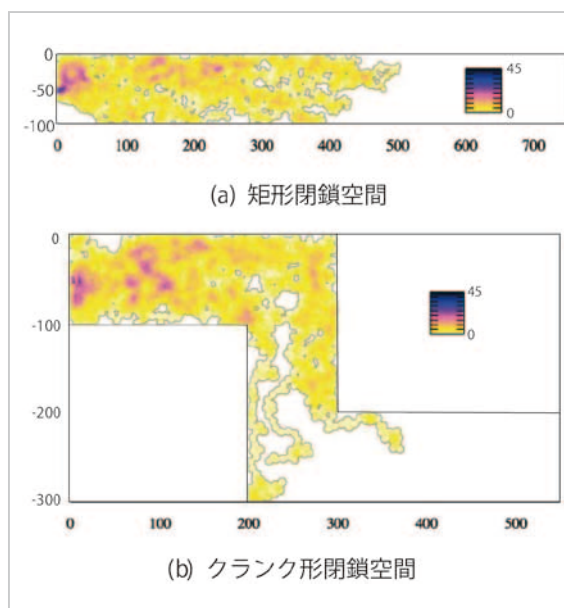


図24 一斉シナリオにおいてランダムシード値を変化させた場合のSRが搭載するカメラが撮影した領域

4 むすび

災害時における利用を想定した無線アドホックネットワークについて、2つの具体的なモデルを提案し、それぞれのモデルにおけるネットワーク性能をネットワークシミュレータにより解析し、評価した結果について示した。

第1に、大規模災害発生時を想定した市街地通信モデルとして、実際の市街地における道路を模擬し、端末がこの道路に沿って移動するReal Cityモデルを提案し、従来最も良く用いられてきたRandom Waypointモデルとの比較を行った。Real Cityモデルのデータ配信率がRandom Waypointモデルのデータ配信率より低い値となることを示すとともに、ルーチングプロトコル属性値をデフォルトから変更することによりデータ配信率の向上が可能であることを示した。次に、Real Cityモデル上で、災害が発生した場合を想定しアプリケーションが扱うデータを動画像等とし、それに応じたデータ量の通信を行った場合におけるネットワーク性能の詳細について評価を行った。さらに、より実際の環境に近くなるよう、建物等の影響を考慮したネットワーク性能について評価を行い、この状況下でネットワーク性能を向上させるには、

中継に資する移動端末数を増加させることが有効であることを明らかにした。しかし、シミュレーション結果からは、普段人々が使用している携帯電話に無線アドホックネットワーク機能を実装したとしても、現時点では既存通信網並の品質の通信を行うことは難しいと言える。より高い品質の通信を実現するためには、ルーチングプロトコル属性値についてさらなる検討を行い、状況に応じた最適値を求めると同時に、予め中継に資する端末を準備しておき、非常時にこれらを稼働させることにより、安定した経路を確保する方策が必要であると考えられる。

第2に、大規模災害発生時に地下街や地下鉄などの閉鎖された空間内を探索するロボットの通信モデルとして、一部に有線を用いることで、有線と無線の長所を兼ね備えた有線・無線統合型アドホックネットワークを提案し、矩形の閉鎖空間内にこのネットワークを構成し、異なる2種類の探索ロボットの移動シナリオを用いた場合の性能評価を行った。シミュレーション結果からは、探索ロボットが一斉に移動を開始するシナリオよりも順番に移動を開始するシナリオの方が高い通信性能を得られること、およびデータ配信率は探索ロボットとアクセスポイント間の距離に大きく関係

することが明らかになった。閉鎖空間がクランク状に折れ曲がっている場合についても同様に性能評価を行った。通信性能は閉鎖空間の形状に若干影響を受けるが、形状よりはむしろ SR の移動方向を決定するためのランダムシード値に大きな影響を受けていることがわかった。このことは、ランダムシード値を変化させてさらにシミュレーションを行った結果からも明らかになった。

本稿を執筆途中の 2011 年 3 月 11 日に、国内観測史上最大のマグニチュード 9.0 を記録した東北地方太平洋沖地震による東日本大震災が発生した。この震災により、携帯電話・固定電話とも大きな被害を受け、NTT ドコモの場合、地震翌日の 12 日には東北 6 県にある基地局 9,900 局の約 4 割が停波し、KDDI (au)、ソフトバンクモバイルも含めると東北・関東で 13,000 局を越す基地局が停波した。固定電話についても NTT 東日本によると東北・関東で一時、加入電話 879,500 回線が不通になった^[10]。まさに 1 に記した事態が現実

のものとなったことは大変衝撃的である。また、被災地でのロボットを用いた救援活動についても、検討はされたものの具体的な活動や成果は現時点では明らかではない。震災で亡くなられた方々のご冥福をお祈りし、被害に遭われた方々にお見舞いを申し上げるとともに、既存移動通信ネットワークの代替手段や災害発生時の情報伝送手段としての無線アドホックネットワークの実用化に向けてさらなる研究開発を推進していく決意を述べて本稿のむすびとしたい。

謝辞

シミュレーションにご協力頂いた (株) 情報工房に感謝する。本研究の一部は総務省戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE) および (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクトの支援を受けて実施した。

参考文献

- 1 小牧省三編, “無線 LAN とコピキタスネットワーク,” pp. 175–180, 丸善, 2004.
- 2 ARIB IMT-2000 Study Committee, “Evaluation Methodology for IMT-2000 Radio Transmission Technologies (Version 1.1),” pp. 35–37, Sep. 1998.
- 3 C. Perkins, E. B. Royer and S. Das, “Ad Hoc On Demand Distance Vector (AODV) Routing,” IETF RFC 3561, Jul. 2003.
- 4 T. Clausen and P. Jacquet, “Optimized Link State Routing Protocol (OLSR),” IETF RFC 3626, Oct. 2003.
- 5 OPNET Technologies Website, <http://www.opnet.com/>
- 6 J.-E. Berg, “A Recursive Method For Street Microcell Path Loss Calculations,” Proc. of PIMRC’ 95, Vol. 1, pp. 140–143, Sep. 1995.
- 7 総務省通信利用動向調査報告書 (世帯編),
http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/statistics/pdf/HR200800_001.pdf
- 8 仙台市町名別年齢 (各歳) 別住民基本台帳人口データ,
<http://www.city.sendai.jp/kikaku/seisaku/toukei/jinkou/kakusai/h2110.xls>
- 9 正木俊幸、手嶋正雄、宮坂敏樹, “ノート PC 用無線 LAN アンテナの配置,” 東芝レビュー, Vol. 58, No. 11, pp. 21–24, 2003.
- 10 岡林佐和, “電話復旧 メド立たず 施設打撃 移動基地も不足,” 朝日新聞東京 14 版, p. 7, 2011 年 3 月 25 日.

(平成 23 年 3 月 30 日 採録)



ぎょうだこういち
行田 弘一†1

芝浦工業大学工学部通信工学科准教授 /
元情報通信セキュリティ研究センター
防災・減災基盤技術グループ主任研究員
(2006年4月～2008年3月)
博士(工学)
アンテナ工学、非常時無線通信ネット
ワーク構築技術、災害現場探索ロボッ
ト間通信技術、災害時等における情報
伝達



Hoang Nam Nguyen†2

情報通信セキュリティ研究センター防
災・減災基盤技術グループ専攻研究員
(2006年4月～2011年3月)
Ph.D.
Communication Networks for
Emergency and Crisis
Management: Issues of System
Models, Security, Capacity and
Quality-of-Service



はだやすし
羽田 靖史†3

情報通信セキュリティ研究センター防
災・減災基盤技術グループ専攻研究員
(2007年4月～2011年3月)
博士(工学)
ロボット工学、知能システム、ユビキ
タスネットワーク



おかだかずのり
岡田 和則†4

情報通信セキュリティ研究センター防
災・減災基盤技術グループ主任研究員
(2006年4月～2011年3月) / 電
気通信大学大学院情報システム学研究
科客員教授 博士(工学)
通信ネットワーク、移動通信、非常時
通信



たきざわ おさむ
滝澤 修†5

情報通信セキュリティ研究センター防
災・減災基盤技術グループグループ
リーダー (2006年4月～2011年
3月) / セキュリティ基盤グループグ
ループリーダー (2008年5月～
2010年3月) 博士(工学)
非常時防災通信、コンテンツセキュリ
ティ

†1 現在、芝浦工業大学工学部通信工学科 教授

†2 現在、国立ベトナム大学工業技術大学 講師

†3 現在、工学院大学工学部機械システム工学科 准教授

†4 現在、ワイヤレスネットワーク研究所宇宙通信システム研究室 主任研究員

†5 現在、社会還元促進部門技術移転推進室 マネージャー