

# アドホックネットワークにおける超高信頼ルーティングプロトコルに関する研究

A Highly Reliable Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks



加藤 寧 (Nei KATO Dr. Eng.)

東北大学大学院 情報科学研究科 教授

(Professor, Graduate School of Information Sciences,  
Tohoku Univ.)

米国電気電子学会(IEEE) 電子情報通信学会(IEICE)

受賞：石田實記念財団研究奨励賞(2003) 7th World Multi-conference on Systems, Cybernetics and Informatics 最優秀論文賞(2003) IEEE Communications Society 活動感謝状(2005) IEEE Communications Society Distinguished Contributions to Satellite Communications Award(2005) 船井情報科学振興賞(2007) 第23回電気通信普及財団 テレコムシステム技術賞(2008) 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究賞(2009) ACM 5th Wireless Communications and Mobile Computing Conference 最優秀論文賞(2009) IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content 最優秀論文賞(2009) IEEE Globecom, Wireless Networking Symposium 最優秀論文賞(2010) IEEE Globecom, Ad Hoc and Sensor Networking Symposium 最優秀論文賞(2010) 電子情報通信学会 2011年度衛星通信研究賞(2011) IEEE Wireless Communications and Networking Conference 最優秀論文賞(2012) KDDI財団 優秀研究賞(2012) 電子情報通信学会通信 ソサイエティ論文賞(2012) 電子情報通信学会 功労顕彰状(2012) 電子情報通信学会 活動功労賞(2012) IEEE Certificate of Appreciation as a Top Associate Editor(2012) 電子情報通信学会フェロー(2012) IEEE フェロー(2013) IEEE Vehicular Technology Conference 2013-Spring 最優秀論文賞(2013) IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing Conference 最優秀論文賞(2013) 2 電子情報通信学会 2012年度衛星通信研究賞(2013) IEEE Globecom 最優秀論文賞(2013)

研究専門分野：衛星・無人航空機ネットワーク 光と無線の融合ネットワーク コンテンツ配信・ストレージネットワーク モバイル・アドホック・センサネットワーク ネットワークの省エネルギー・周波数利用効率・セキュリティ・耐災害性

**あらまし** 近年、いつでも、どこでも、誰とでも通信可能なユビキタス社会への実現へむけ、アドホックネットワーク<sup>(\*)</sup>に注目が集まっている。特にモバイル端末で構成されるMANET (Mobile Ad hoc NETwork)<sup>(\*)</sup>は高い対災害性と柔軟性を持ち、緊急ネットワークの早期構築が可能であるとして注目されている。しかし、MANETには多くの課題が存在する。全体を管理

する機器が存在しないことによる自律分散的なネットワーク構築の必要性やモバイル端末の移動性の高さによるネットワークの変化への対応、各端末の演算性能の考慮、そして消費電力である。本稿では、アドホックネットワークにおいてこれらの課題を解決するトポロジ制御手法として、LTRT (Local Tree-based Reliable Topology) を提案する。さらに、LTRTを端末の移動性の高いMANETに適用するための手法も提案する。そして、シミュレーションによる性能評価を行いその有効性を示す。

## 1. はじめに

携帯電話やノートPC、タブレットPCなどのモバイル端末を直接ネットワークを構築する端末として利用することで、緊急ネットワークを早急に構築可能であるMANET (Mobile Ad hoc NETwork) は高い対災害性、柔軟性を持つネットワークとして注目されている。しかし、MANETの実現には、未だに多くの課題が存在する。MANETは従来の有線ネットワークや基地局を介す無線ネットワークと異なる特徴を持つため、それらを考慮する必要がある。例えば、全体を管理する機器が存在しないために、各端末がネットワークを自律分散的に構築する必要があること、一度ネットワークを構築しても各端末が移動を行うため、ネットワークが変化してしまうことなどは、MANETに特有の問題である。また、ネットワークを決定する中央サーバなども存在しないため、各端末の演算性能を考慮した構築方法が必要なことも、MANETの構築や通信に制限を与えている。さらに重要な問題として、消費電力がある。前述の通り、各端末は携帯電話やノートPC、タブレット端末などバッテリーによって駆動する機器であり、MANETはそれらによって構築される。そのため、各端末で消費される電力を小さく抑えなければ、ネットワークを構築しても通信できないなど本末転倒の状況になってしまう可能性がある。特に、無線通信ゆえの通信の不安定さからネットワークの冗長化を図る、マルチホップ通信による自身以外の端末のデータを送受信する必要があることなども消費電力の増加につながる。そのため、消費電力を考慮した効率的なネットワークの構築方法が必要不可欠である。

# アドホックネットワークにおける超高信頼ルーティングプロトコルに関する研究

## A Highly Reliable Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks

### 2. アドホックネットワークにおけるトポロジ制御

本章では、センサネットワークで用いられている消費電力削減技術であるトポロジ制御についてその概要を述べる。また、複数のトポロジ制御について比較を行い、MANETに適用するために最適なものを検討するとともに、それを利用した従来研究を紹介しその問題点を明確にする。

#### 2. 1 トポロジ制御の概要

トポロジ制御とは、センサネットワークやアドホックネットワークで消費電力を削減するために利用される技術である。最も簡単な消費電力量削減のアプローチとしては、MST (Minimum Spanning Tree) <sup>(\*)3</sup> や SPT (Shortest Path Tree) <sup>(\*)4</sup> を用いる方法が存在するが、ネットワーク全体を一括管理する基地局やノードの存在しないセンサネットワークでは、このような全体を把握して制御することは困難である。そのため、各ノードが数ホップ内に存在するノードの情報のみを利用して分散的に全体の連結性を保ちながら、トポロジを構築することが必要となる。

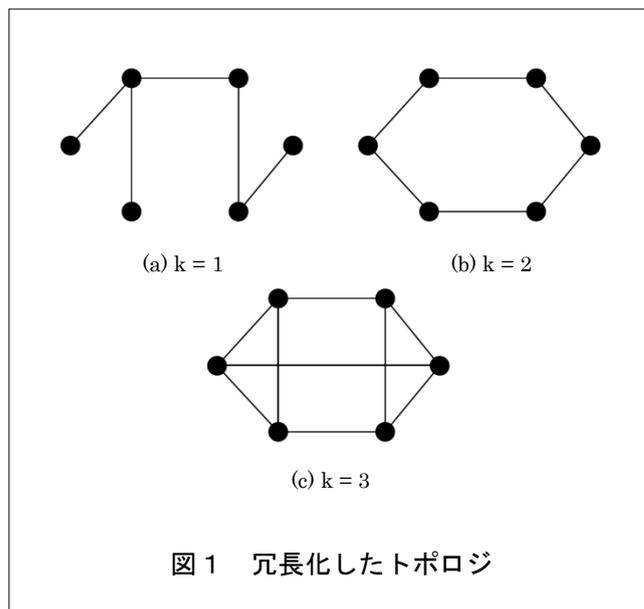
トポロジ制御は以下のような手順で進められる。

1. 各ノードは、自身を中心ノードとして考え、送信可能な最大通信半径で Hello メッセージと呼ばれる制御メッセージを送信する。
2. Hello メッセージを受信した周辺ノードは、自身の位置情報や移動速度情報などを含めたメッセージを中心ノードに対して返送する。
3. 中心ノードは、受信した周辺ノードの情報から各種トポロジ制御のポリシーに従ってトポロジを構築する。
4. 構築したトポロジを利用し、同様に各種ポリシーに従って通信半径を制御する。このときの通信半径は、最大通信半径よりも小さくなるため、消費電力を通常よりも削減することができる。

このようなトポロジ制御をセンサネットワークからMANETに適用させる場合、センサネットワークとは異なる環境での利用になるためいくつかの課題が生じる。MANETでは、各ノードはモバイル端末であるた

め常に移動を行っている。そのため、接続の不安定性や各ノードの移動に対応する必要がある。それらの課題を解決するアプローチが、ネットワークの冗長化とノードの離脱へ対応したトポロジの更新である。

ネットワークの冗長化とは、図1のように各ノード間に複数本のリンクを張ることで、リンクの断絶に対応させ信頼性を高める技術である。図1(a)では各ノードは1のリンクしか持たず、どれか1つでもリンクが断絶した場合に、ネットワークが2つに分断されてしまう。しかし、図1(b)や図1(c)のように、各ノードが2本、3本とリンクを持つことで、それぞれ1本、2本まではリンクが途絶しても、ネットワークが分断することはない。このようにして、不安定な無線通信リンクによるネットワーク分断へ対応する。特に、各ノードが常に移動していると考えられるMANETでは、基本的には2本以上のリンクを持ち、1つのノードが他のノードの通信半径から出ても、通信が可能な状況を維持する必要がある。

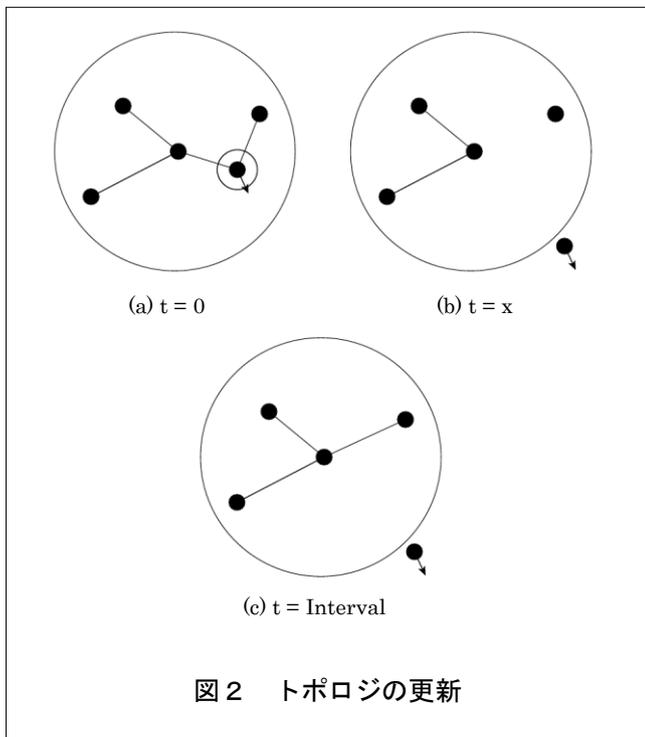


次にトポロジの更新について説明する。トポロジの更新とは、トポロジ構築後にある一定周期で再度トポロジを計算・構築することで、各ノードの移動に対応するものである。例えば、時間  $t = 0[s]$  に図2(a)のようなトポロジを構築した時を考える。このとき、図2(a)中で右下のノードが移動中のノードであった場合、時

# アドホックネットワークにおける超高信頼ルーティングプロトコルに関する研究

## A Highly Reliable Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks

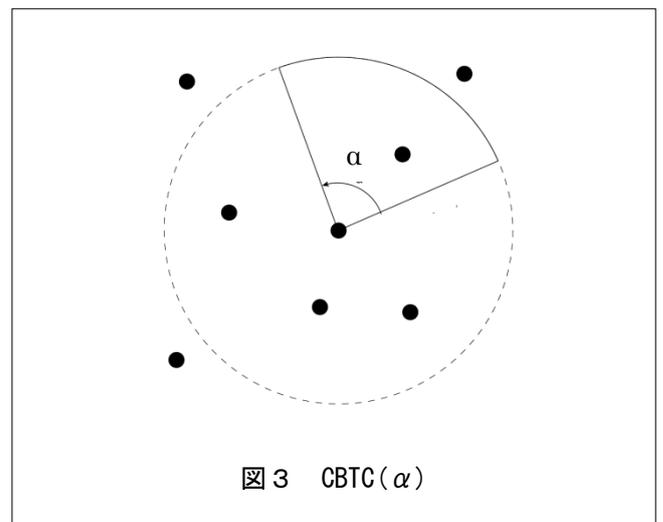
間  $t = x[s]$  に図 2(b) のように中心ノードの通信可能半径から出てしまい、トポロジが複数個に分断されてしまう。通常、トポロジ制御ではトポロジを再構築するまでの更新時間  $Interval$  を設定し、 $Interval[s]$  後にトポロジを再構築する。このようにしてトポロジを再構築することで、図 2(c) のように新たにトポロジを構築し、ネットワークの接続を維持することが可能になる。しかし、各ノードの移動速度はそれぞれ異なっており、更新時間をどの程度に設定するかという問題を別途考慮する必要もある。



能性も高くなるため、通信半径を抑えることができるが、角度  $\alpha$  が小さい場合、範囲内にノードを存在させるためには、大きな通信半径が必要になってしまう。ネットワークが連結であれば、角度  $\alpha$  が  $\alpha < 2\pi / 3$  の時にトポロジの連結性は保証される。またこの手法では、冗長なリンクが多くなってしまったため、連結性を保持しつつ各ノードの隣接ノード数を削減させ最適化させる手法も提案されている。その手法では、ノード  $u$  とその隣接ノード  $v, w$  が存在する場合、 $u$  から直接  $w$  に送信を行う消費電力よりも  $v$  を経由して送信する消費電力の方が少ない場合には、 $w$  を隣接ノードから取り除くことで、連結性を保持しつつ冗長なリンクを減らすことに成功している。

以上のように  $CBTC(\alpha)$  では、1 ホップの隣接ノード情報のみからトポロジの構築が可能であり、基本的には、冗長なメッセージのやりとりを必要としないといった特徴がある。しかし、得られるグラフが有向グラフであり、無向グラフとするためには、追加のメッセージが必要となる。

さらに、 $CBTC(\alpha)$  は冗長なネットワークの構築にも対応しており、 $k$ -連結性を保証することができる。文献[3]にて、 $CBTC(\alpha)$  は  $\alpha < 2\pi / 3k$  であるときに、 $k$ -連結性を保証可能であることが示されている。しかし、ノードが均一に分布していないネットワークでは、角度  $\alpha$  の範囲内にノードを存在させるためには、大きな通信半径が必要となってしまふ。



### 2. 2 各種トポロジ制御

本節では既存の主要なトポロジ制御を紹介する。

#### ■ $CBTC(\alpha)$ (Cone-Based Distributed Topology Control)

$CBTC(\alpha)$  は古くから存在するトポロジ制御である [1][2]。  $CBTC(\alpha)$  では、角度  $\alpha$  で区切られた送信範囲内にそれぞれ隣接ノードが存在するように、通信半径  $r$  を調整することでトポロジを構築する (図 3)。

角度  $\alpha$  が大きければ、範囲内にノードが存在する可

# アドホックネットワークにおける超高信頼ルーティングプロトコルに関する研究

## A Highly Reliable Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks

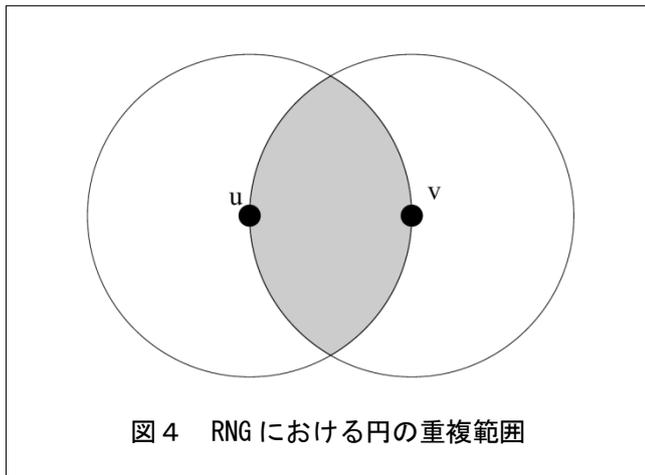
### ■ RNG (Relative Neighborhood Graph)

RNG は、全ての辺(u, v)においてその辺を半径とし、u, v の各点を中心とする 2 つの円が重複する範囲に、他の点が存在しない (図 4) という特徴を持つ[4]。つまり、ノード u に対して、2 つの隣接ノード v, w に対して消費電力が、

$$p(u, v) + p(v, w) < p(u, w)$$

となるノード w を隣接ノードから、全て取り除いたグラフのを RNG とするということである。

RNG の構築は、1 ホップの情報のみを用いて各ノードが分散的に行うことができる。そのため、RNG をトポロジ制御に用いることで、効率的にトポロジを構築する手法が提案されている[5]。加えて、RNG の構築に対して追加のメッセージを必要とせず、トポロジが構築可能であるといった特徴もある。



### ■ LMST (Local Minimum Spanning Tree)

LMST は、木構造に基づくトポロジ制御である[6]。LMST では、各ノードが 1 ホップの隣接ノード情報のみを利用して、MST (Minimum Spanning Tree) に基づくトポロジを構築する。各ノードが位置情報に基づいて独立して MST を計算し、その計算された MST 上の隣接ノードを LMST における隣接ノードとして保持する。LMST は完全な木構造ではないが、MST を部分グラフとして含んでいるため、MST に近いトポロジとなる[7]。LMST では、各ノードの隣接ノード数が常に 6 以下になることが示されており、MAC 層での衝突や干渉が軽減される。さらに、全ての片方向リ

ンクを取り除くことで、双方向リンクのみを用いて構築が可能である。

しかし、LMST で得られるトポロジは、CBTC( $\alpha$ )と同様に有向グラフであるため、無向グラフにするために、追加のメッセージ交換が必要になってしまう。また、LMST は MST を基にしたトポロジであり、構築されるトポロジも MST に近いものとなる。そのため、冗長化への対応が不可能であり、1 本のリンクが断絶するだけでネットワークが分断されてしまう。

### ■ IMRG (Incident MST and RNG Graph)

MST に基づいて構築されるトポロジである LMST だが、その近似率は数学的に保証されていない。辺の長さが MST の定数倍に収まるようなトポロジのことを Low Weight と表現するが、それを数学的に保証した初めての手法が IMRG[8]である。またこの中では、同時に RNG と LMST が Low Weight ではないことも示されている。IMRG は、2 ホップの情報を必要とするが、総コストは MST に対して  $O(n^{\alpha-1})$  となる近似率を示す。この時、 $\alpha$  はノードの数である。

### ■ FLSSk (Fault-tolerant Local Spanning Subgraph)

FLSSk は、CBTC( $\alpha$ )と同様に冗長化へ対応したトポロジ制御であり、k-連結性を保証することができる[9]。FLSSk は、CBTC( $\alpha$ )に比べて高い性能を示すが、トポロジ構築のための計算量が非常に大きい。ノード数を n、リンク数を m とした時、時間計算量は  $O(m(n+m))$  となり、また、MANET のようにノードの密度が大きいネットワークにおいては、 $m \approx n^2$  となるため、その計算量は  $O(n^4)$  になってしまう。このような計算量の大きなトポロジ制御は、MANET のような非力な端末を利用した高密度ネットワークには適さない。

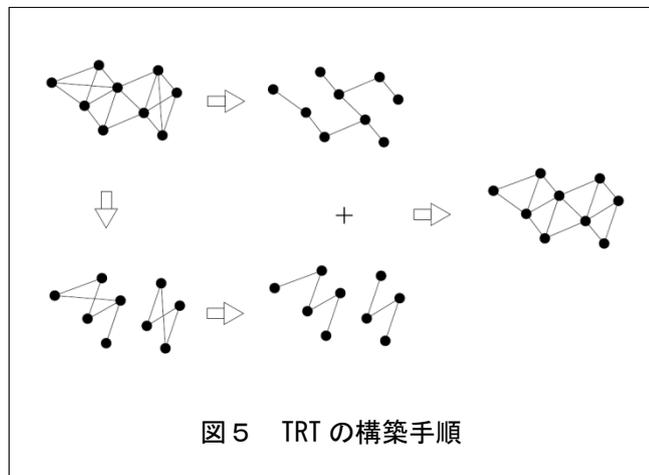
### ■ TRT (Tree-based Reliable Topology)

TRT は、センサネットワークでなく、有線ネットワークにて提案された 2-連結となる部分グラフを効率的に構築する手法である[10]。TRT では、与えられたネットワークが 2 辺連結である場合に、2-辺連結性を持つトポロジを RT (Reliable Topology) として定義し、RT を全域木の組み合わせによって構築する手法

# アドホックネットワークにおける超高信頼ルーティングプロトコルに関する研究

## A Highly Reliable Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks

である。TRT の構築手順を図 5 に示し、その手順を説明する。



1. ネットワークが分断されていないトポロジにおいて全域木を計算する。
2. 全ての全域木上のリンクを先のトポロジから削除する。この時、残りのトポロジは  $n(n \geq 1)$  個の連結した部分グラフとなる。
3. それぞれの部分グラフについて、それぞれ全域木を計算する。
4. はじめに計算した全域木と、それぞれ計算した部分グラフの全域木を重ね合わせる。

このような手順で構築されたものが TRT であり、2-連結性を持つ。文献[10]の中では、TRT の構築のために MST の組み合わせを用いている。この手法では TRT は 2-連結性しか保持していないが、全域木の計算とリンクの削除を繰り返すことによって、 $k$ -連結性を保持することが可能である。

以上を考慮した各トポロジ制御の特徴を表 1 に示す。MANET では、各種端末の性能はそれほど高くなく、また、バッテリーによって駆動しているため、計算量、省電力性能に対する依存が大きい。また、各端末は移動しているので冗長化への対応も必要になる。上記の特徴と表 1 から既存手法ではそれらに全て対応する MANET に、最適なトポロジ制御手法が存在しないことが分かる。本研究では、高信頼トポロジ制御に焦点を当て、既存手法の課題を解決する新たなトポロジ制

御、及びそれに適した通信方式を提案する。

表 1 各種トポロジ制御

トポロジ制御	計算量	冗長化への対応	省電力性能
CBTC( $\alpha$ )	$\Delta$	$\bigcirc$	$\Delta$
RNG	$\bigcirc$	$\times$	$\bigcirc$
LMST	$\bigcirc$	$\times$	$\bigcirc$
IMRG	$\bigcirc$	$\times$	$\Delta$
FLSS $_k$	$\times$	$\bigcirc$	$\bigcirc$
TRT	$\bigcirc$	$\Delta$	$\Delta$

### 3. 信頼性を考慮したトポロジ制御 : LTRT

従来のトポロジ制御の課題を解決する、新たな高信頼トポロジ制御 LTRT (Local Tree-based Reliable Topology) を提案する。LTRT は、LMST と TRT の考えを基に、LMST を冗長化に対応させたトポロジ制御である[11]。LTRT は、低計算量かつ高効率なトポロジコントロールであり、数学的に保証された信頼性を持つ。

#### 3. 1 LTRT の構築手順

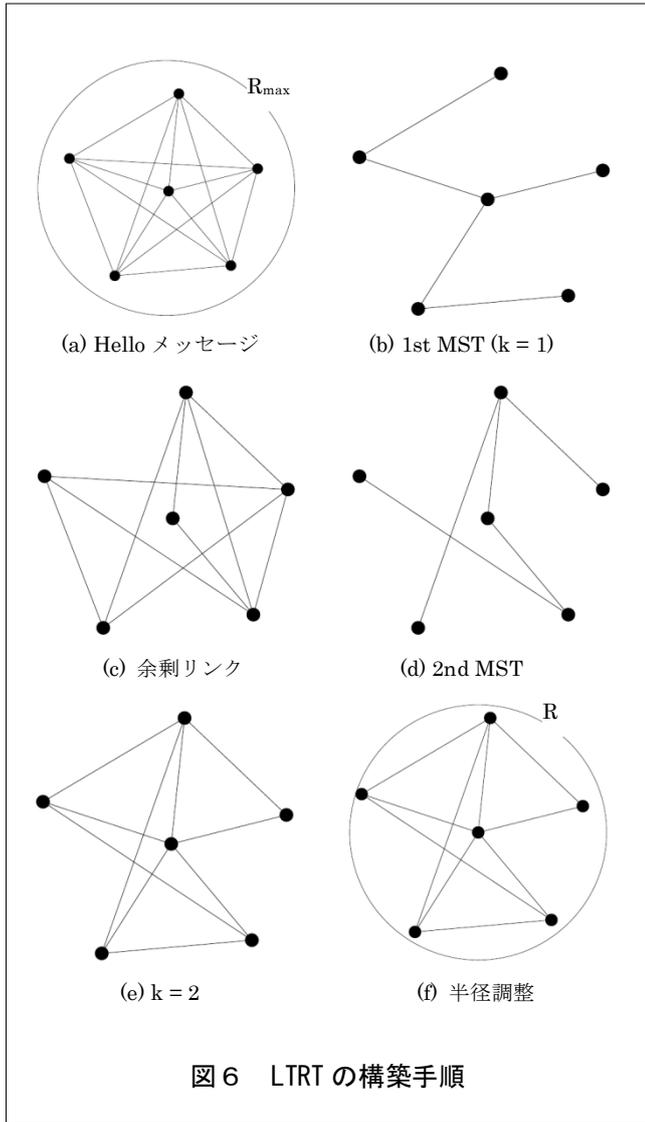
LTRT の構築手順を以下に示す。

1. 各ノードは周辺ノードの情報から完全木を構築する (図 6(a))。
2. 得られた完全木から MST を計算し、これを  $k = 1$  の時のトポロジとして保持する (図 6(b))。
3. 図 6(a)で得られた完全木から、図 6(b)で得られたトポロジを差し引いたグラフを考える (図 6(c))。
4. 図 6(c)で得られたグラフから、次の MST を計算する (図 6(d))。
5.  $k = 1$  のグラフ (図 6(b)) と図 6(d)で得られたグラフを重ね合わせ、これを  $k = 2$  の時のトポロジとして保持する (図 6(e))。

# アドホックネットワークにおける超高信頼ルーティングプロトコルに関する研究

## A Highly Reliable Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks

- 上記を要求された  $k$  を満たすまで繰り返す。
- $k$  を満たしたトポロジを構築後、1 ホップで通信可能な最も遠いノードまでの距離に合わせて通信半径を設定する。



この手順からわかるように、LTRTはTRTの考え方を基に、計算量の小さいMSTの計算を繰り返すことで $k$ -連結性を保証できるトポロジを構築するため、その計算量はCBTC( $\alpha$ )やFLSSkに比べて非常に小さくなる。さらに、TRTの冗長化を2-連結から $k$ -連結にまで発展させることで、TRTよりもより強固なネットワークの構築も可能になっている。

### 3.2 MANETに最適化したトポロジ制御

LTRTをMANETに適用するために、通信限界付近のノードを考慮してLTRTを改良する手法を提案する。提案手法では、ノードの移動に対応した非常に高い接続率を保証可能にすることと、その際の消費電力を最小化することを目的としている。この手法では、トポロジ制御にて設定される様々なパラメータを更新時に動的に決定することで、状況に合わせて最適な値を設定することで上記の目標を達成することができる。トポロジ制御中に設定されるパラメータは3つ存在する。通信半径、更新間隔、そして冗長性である。それぞれの特徴を以下に述べる。

#### ・通信半径

通信半径を動的に決定することで、ノードの移動に対応させることができ、接続率を向上させることができる。

#### ・更新間隔

更新間隔を動的に決定することで、ノードの離脱にいち早く対応できる。また、最適な値を決定することで、各ノードは頻繁なHelloメッセージの送信を行わないため、消費電力量を抑えることができる。

#### ・冗長性

冗長性を動的に決定することで、リンクの切断に対応し接続率を向上させることができる。また、周辺の状況次第ではあるが、消費電力量を抑えることもできる。

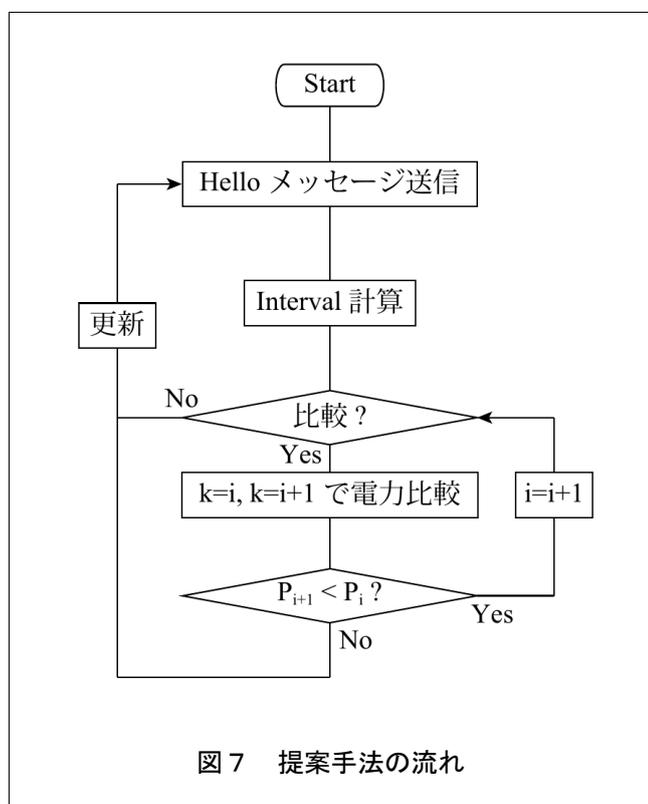
このように、それぞれのパラメータがトポロジ制御や各ノードに与える影響は様々である。提案手法では、3つ全てのパラメータを動的かつ同時に変化させることで、全てのパラメータが持つ特徴を活かすことができる。なお、冗長性を増加させれば通信半径も増加するので、実際に動的に決定するパラメータは更新間隔と冗長性である。

各パラメータの動的な決定の手順を以下に示す。また、フローチャートを図7に示す。

# アドホックネットワークにおける超高信頼ルーティングプロトコルに関する研究

## A Highly Reliable Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks

1. まず、トポロジ制御を行う前に、初期条件となる冗長性  $k$  と更新間隔  $t$  を与える。
2. 次に、各ノードは通信可能な最大半径で Hello メッセージを送信し、周辺の Hello メッセージを受信したノードは、自身の位置情報や速度情報を含んだメッセージを送り返す。ここまでは通常のトポロジ制御と同じである。
3. 各ノードは、周辺ノードから受信した情報を元に LTRT を利用してトポロジを構築し、1 ホップで通信可能な隣接ノードの情報から、消費電力 (Hello メッセージ送信電力とデータ通信中の消費電力の和) を最小にするような  $t$  を計算する。
4. 初期値となる冗長性  $k = i$  を持つトポロジと  $k = i + 1$  の時のトポロジで、それぞれの消費電力  $P_i$  と  $P_{i+1}$  を計算し、それぞれを比較する。
5.  $P_i < P_{i+1}$  となるまで、 $k = i + 1$  として 4 番目の項目を繰り返す。
6.  $P_i < P_{i+1}$  の条件を満たした場合、その時の冗長性  $i$  を用いてトポロジを構築する。
7. 通信が終了するまで、2 から 6 の行程を繰り返す。



### 3.3 シミュレーションによる性能評価

本節では、第3章で提案した手法について、NS-2 (Network Simulator 2) を用いてその性能を評価する。

本シミュレーションでは、1,000m × 1,000m のエリア内に最大通信半径が 250m であるモバイルノードを 100 個配置して行う。各ノードは、RANDOM-WAYPOINT MobilityModel[12][13][14]に基づいた移動を行う。各ノードの移動速度の平均は 0m/s~25m/s とし、冗長性は 2~7 の間で変化するとする。また、全通信時間は 10,000s であり、トポロジの更新間隔は 1s~10s の固定および動的なものとする。上記の環境をまとめたものを表3に示す。

表2 シミュレーション環境

シミュレータ	NS-2
フィールドサイズ	1000m×1000m
ノードの数	100 個
最大通信半径	250m
全通信時間	10,000s
平均速度	0m/s~25m/s
更新間隔	1s~10s, Dynamic
冗長性	2~7, Dynamic

この環境で更新間隔を 1s~10s に 1s 刻みで変化させたものと、提案手法を適用し動的に変化させたもので比較を行う。

2 つの評価指標を用いて提案手法の性能を評価する。評価指標を下記に示す。

- ・接続率：トポロジの接続性能を評価

2 つのノード  $u, v$  が存在し、ノード間に存在するリンクが双方向リンクである場合、ノード  $u$  とノード  $v$  は接続していると定義する。  $n$  個のノード

# アドホックネットワークにおける超高信頼ルーティングプロトコルに関する研究

## A Highly Reliable Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks

が存在するネットワークの接続率は、式 4.1 のようになる。

$$C = \sum_{u,v} cuv / n(n-1) \quad (4.1)$$

ただし、

$$\begin{aligned} cuv &= 1 \quad (u \neq v, \text{かつ } u \text{ と } v \text{ が接続}) \quad (4.2) \\ &= 0 \quad (\text{それ以外}) \end{aligned}$$

・消費電力：各ノードの消費電力量を評価

消費電力を計算後、EER (Energy Expanded Ratio) を用いて評価する。EER は、常時最大通信半径で通信を行った場合の消費電力  $E_{max}$  と実際に消費した電力  $E_{total}$  から、次のように定義される。

$$EER = E_{total} / E_{max} \quad (4.3)$$

EER は、0~1 で出される値であり、消費電力が大きいほど 1 に近い値となる。そのため、小さいほど消費電力が少なく、性能が高いと言える。

接続率を示したグラフを図 8 に示す。縦軸が接続率を示しており、横軸は各ノードの平均移動速度を示している。このグラフからわかるように、各ノードの移動速度がどのように変化した場合でも、更新間隔を固定してトポロジ制御を行った場合に比べて、提案手法が高い性能を示しているのがわかる。なお、縦軸の値のスケールからわかるとおり、接続率は低い場所でも 99.8%以上を維持しているため、ほぼ 100%の接続率を維持できていると言える。

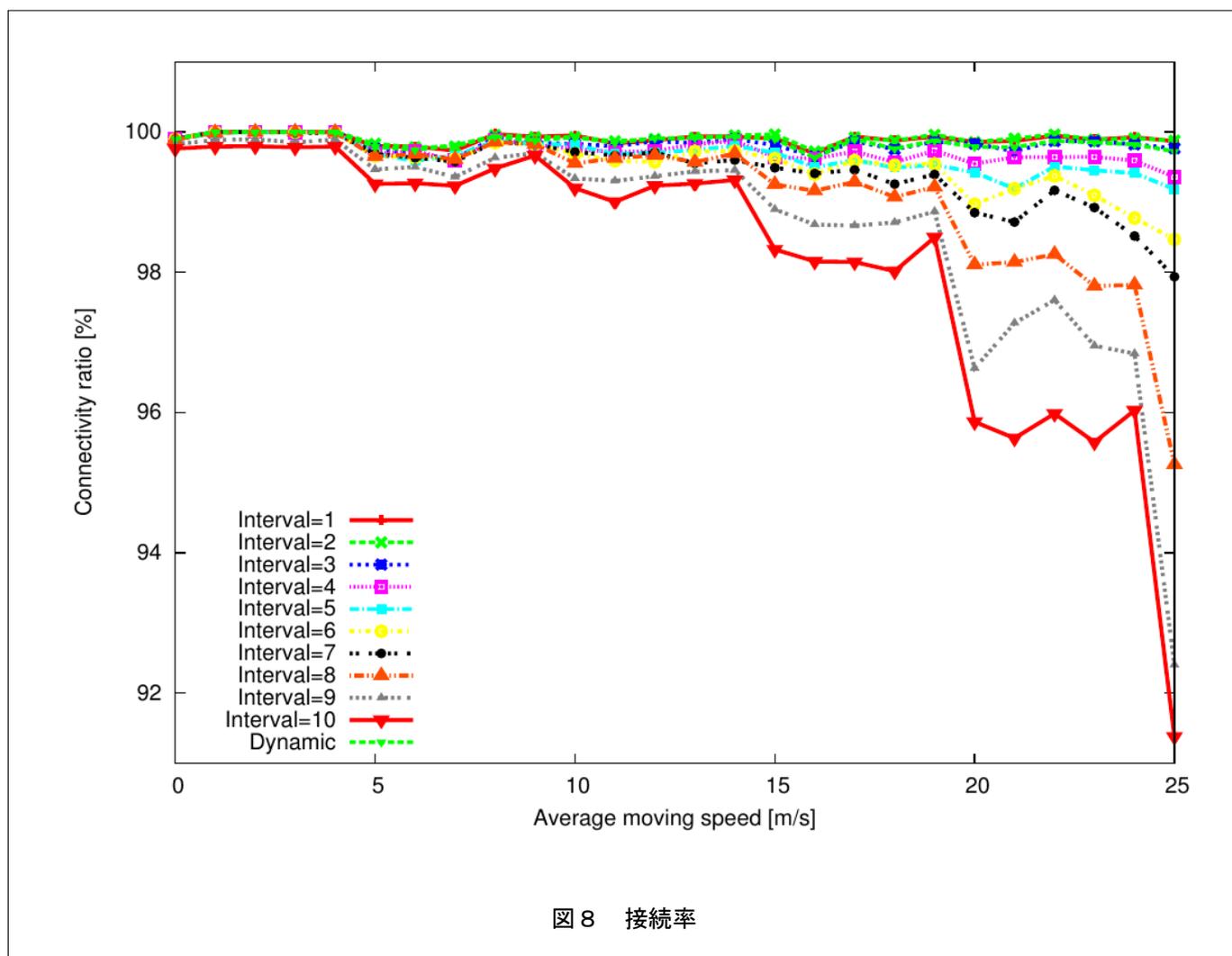


図 8 接続率

# アドホックネットワークにおける超高信頼ルーティングプロトコルに関する研究

## A Highly Reliable Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks

次に消費電力を示したグラフを図 9 に示す。縦軸が消費電力を示しており、横軸は図 8 と同様に各ノードの平均移動速度を示している。このグラフからわかるように、各ノードの移動速度がどのように変化した場合に対しても、更新間隔を固定してトポロジ制御を行った場合に比べて提案手法が高い省電力性を示しているのがわかる。

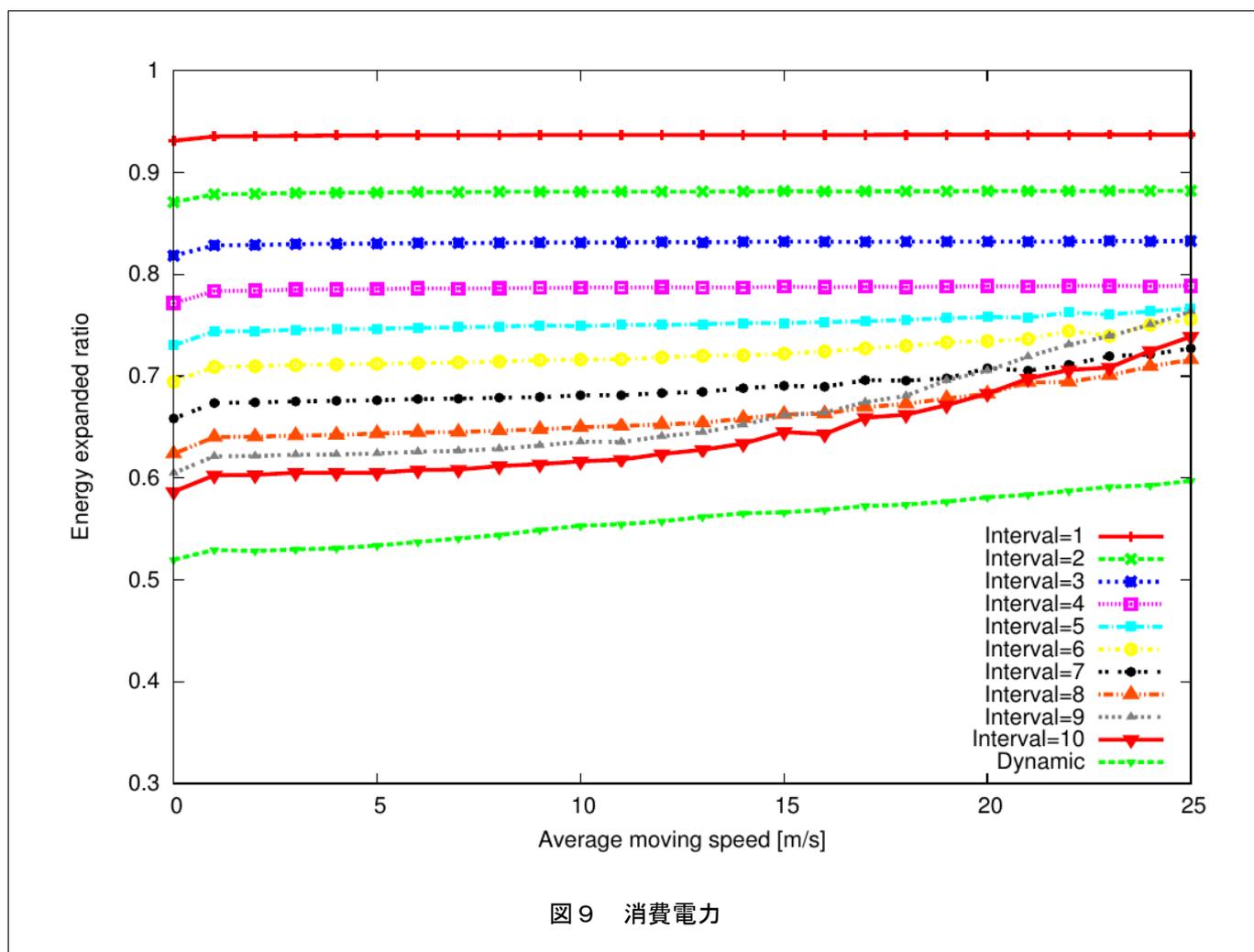


図 9 消費電力

### 4. おわりに

MANET は、固定的な基地局を必要とせず、自律分散的にネットワークを構築するセンサネットワークにおいて、ネットワークを構築する各端末が携帯電話やノート PC、タブレット端末などのモバイル端末から成るネットワークである。MANET は、その構築の容易性と高い柔軟性から、災害によって固定インフラが

壊滅した被災地などでの実現が期待され、その実現に向けた研究が盛んに行われている。このネットワークの大きな課題は、限られている資源をどのように利用してネットワークを構築するかという点である。モバイル端末ゆえのバッテリー問題や無線通信ゆえの信頼性の問題など大きな制限の元で、それらを効率的に

# アドホックネットワークにおける超高信頼ルーティングプロトコルに関する研究

## A Highly Reliable Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks

利用することが求められる。加えて、モバイル端末の移動を考慮してネットワークを構築しなければならないといったことも課題の1つである。

消費電力の抑制と信頼性の向上の両方を満たすことは、非常に重要な課題となっており、すでにいくつもの研究が行われてきた。これらの課題に対応するためには、トポロジ制御における複数の項目についての考慮が必要であった。そこで本研究では、センサネットワークを対象として提案されていたトポロジ制御技術を MANET 特有の問題を考慮して改良することで、高い信頼性を維持しながら消費電力を最小に抑える手法を提案した。特に、各端末の移動とネットワークの冗長化に関して、消費電力という1つの指標から考慮することで、移動に対応させ冗長化を行い信頼性を高めれば、消費電力が増加するという問題の中にトレードオフの関係を見つけ、その最適化を行った。

現在は次世代の端末間通信として、MANET だけでなく DTN を併用した通信方式[15][16]の研究開発を行っている。この通信方式においても、信頼性を高めるための研究開発を展開することが重要である。

### 用語解説

(\*1) アドホックネットワーク：

移動体通信において、基地局などの固定ネットワークを必要とせず、各端末自身が自律的にルーティングを行い、マルチホップ通信を行うネットワーク。

(\*2) MANET (Mobile Ad hoc NETwork)：

携帯電話やラップトップ PC など、携帯可能な端末で構築するアドホックネットワーク。

(\*3) MST (Minimum Spanning Tree)：

グラフ理論において、あるグラフの部分グラフのうち、すべての頂点を含む木（閉路を持たない単連結な無向グラフ）＝スパニング木（極大木、全域木）であり、かつ、辺の重みが最小となるもの、最小木。

(\*4) SPT (Shortest Path Tree)：

スパニング木のうち、ある頂点から別の頂点への移動コストが最小となるもの。最短経路木。

### 参考文献

- [1] R. Wattenhofer, L. Li, P. Bahl, and U. -M. Wan, "Distributed topology control for power efficient operation in multihop wireless ad hoc networks," in Proceedings of Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2001), "vol.3, Apr. 2001, pp. 1388–1397.
- [2] L. Li, J. Y. Halpern, P. Bahl, Y. Wang, and R. Wattenhofer, "Analysis of a cone-based distributed topology control algorithm for wireless multi-hop networks," in Proceedings of Twentieth ACM Symposium on Principles of Distributed Computing (PODC 2001), Aug. 2001, pp.264–273.
- [3] M. Bahramgir, M. Hajiaghayi, and V. S. Mirrokni, "Fault-tolerant and 3-dimensional distributed topology control algorithms in wireless multi-hop networks," Wireless Networks, pp. 179–188, Mar. 2006.
- [4] G. T. Toussaint, "The reliable neighborhood graph of a finite planar set," Pattern Recognition, vol. 12, pp. 261–268, 1980.
- [5] J. Cartigny, D. Simplot, and I. Stojmenovic, "Localized minimum-energy Broadcasting in ad-hoc networks," in Proceedings of Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications (INFOCOM 2003), vol. 3, Mar. 2003, pp. 2210–2217.
- [6] N. Li, J. Hou, C. Sha, and L. Sha, "Design and analysis of an MST-based topology control algorithm," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 4, no. 3, pp.1195–1206, May. 2005.
- [7] X. -Y. Li, Y. Wang, and W. -Z. Song, "Applications of k-local mst for topology control and broadcasting in wireless ad hoc networks," IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol.15, no.12, pp.1057–1069, Dec.2004.

# アドホックネットワークにおける超高信頼ルーティングプロトコルに関する研究

A Highly Reliable Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks

- [8] X. -Y. Li, Y. Wang, P. -J. Wan, W. -Z. Song, and O. Frieder, "Localized low-weight graph and its applications in wireless ad hoc networks," in Proceedings of Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2004), vol. 1, Mar. 2004, pp.431–442.
- [9] N. Li and J. C. Hou, "Localized fault-tolerant topology control in wireless ad hoc networks," IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 17, no. 4, pp. 307–320, Apr. 2006.
- [10] N. Ansari, G. Cheng, and R. N. Krishnan, "Efficient and reliable link state information dissemination," IEEE Communications Letters, vol. 8, no. 5, pp.317–319, May 2004.
- [11] Kenji Miyao, Hidehisa Nakayama, Nirwan Ansari, and Nei Kato, "LTRT: An Efficient and Reliable Topology Control Algorithm for Ad-Hoc Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 8, No, 12, pp. 6050–6058, Dec. 2009.
- [12] D. Johnson and D. Maltz, "Dynamic source routing in ad hoc wireless networks," Mobile Computing, vol.353, pp. 153–181, 1996.
- [13] J. Broch, D. Maltz, D. Johnson, Y. Hu, and J. Jetcheva, "A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols," in Proc. of International Conference on Mobile Computing and Networking, Dallas, USA, Oct. 1998.
- [14] T. Camp, J. Boleng, and V. Davies, "A survey of mobility models for ad hoc network research," Wireless Communications and Mobile Computing, vol.2, no. 5, pp.483–502, Sep. 2002.
- [15] Masaya Ito, Hiroki Nishiyama, and Nei Kato, "A Novel Communication Mode Selection Technique for DTN over MANET Architecture," International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC 2014), Honolulu, Hawaii, USA, Accepted.
- [16] Masaya Ito, Hiroki Nishiyama, and Nei Kato, "A Novel Routing Method for Improving Message Delivery Delay in Hybrid DTN-MANET Networks," IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) 2013, Atlanta, Georgia, USA, Accepted.
- この研究は、平成21年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成22～24年度に実施されたものです。