

# アドホックネットワークソフトウェア開発基盤に関する研究

## Research on software development for Ad Hoc Networks

06D5102

笠松大佑

指導教授

太田理

### ABSTRACT

Ad hoc networks are expected as networks which do not need any existing network infrastructures. However, there are many problems in developing software systems for ad hoc networks. This paper focuses on broadcast storm problems and testing environment problems, and an effective broadcast algorithm and a high scalable emulator are proposed as the solutions. By simulating the proposed algorithm and developing the proposed emulator, and compared the results to existing algorithms or emulators, it was confirmed that these proposals are effective.

**Keywords:** ad hoc network, broadcast storm, emulator

## 1. まえがき

アドホックネットワークは、1994 年、David B. Johnson により「移動ノードの集合によって一時的に形成され、固定的なネットワークインフラや集中管理機構が必要ない、無線ネットワーク」と定義されている[1]。既存のネットワークインフラを使用する必要がないことから、即座にネットワークを構築する技術として期待されている。

最近では、ルーティングプロトコル[2]、気球を用いた災害復旧支援[3]、児童見守りシステム[4]など、アドホックネットワークのための様々なサービスソフトウェアの開発が行われている。しかしながら、経路探索処理や一斉通知処理を純粋なフラッディング技術で実現する場合には、全ノードが中継ノードとなることにより、ネットワーク負荷が増大する。この問題を、ブロードキャストストーム問題と言う[5]。また、サービスプログラム (APL) のデバッグ (試験) を、実際のアドホックネットワークを使って行くと、多くの端末、人、広大なスペースを必要とする。また、シミュレータでは、APL を実行することはできない。本研究では、上記問題の解決に取り組む。

ブロードキャストストーム問題に対して、これまで、数々の手法が提案されている[6]。しかし、それらのほとんどはノードの電池残量を考慮していないので、時間経過に伴い電池切れノードが多発し到達率が低下する恐れがある。一方、ノードの電池残量のみを考慮した手法[7]では、時間経過に伴い、各ノードの電池残量が平滑化されるため、多くのノードが中継ノードに選択される。このため、電池切れノードの数が急激に増加する。提案手法では、各ノードの電池残量と中継距離の両方を同時に考慮することで、高到達率、低ネットワーク負荷、低遅延でネットワーク全体へパケットを届けることを実現した[8]。また、試験環境の問題に対しては、これまで、実際のアドホックネットワークや端末を擬似する仕組みとして数々のエミュレータが提案されている[9]。しかしながら、エミュレータとして使える PC

が 1 台しか使えないために、十分なスケーラビリティを確保できない。このため、大規模なネットワークを想定した APL の試験が行えない。提案エミュレータでは、複数の PC を使用できることを可能にしたことで、高いスケーラビリティを実現した[10]。

## 2. 効率的なブロードキャスト手法

### 2.1 問題

高到達率、低ネットワーク負荷、低遅延を実現する上での問題を分析する。到達率を、ネットワークに存在する全てのノード(MN: Mobile Node) に対する実際にパケットを受信できた MN の割合と定義する。時間経過に伴う受信ノード数の減少を避けるためには、中継ノードの選択において、電池残量が少ない MN を中継ノードに選択しないように、各 MN の電池残量を考慮する必要がある。ネットワーク負荷は、ネットワークに送出されるすべてのパケット数で表すことができる。具体的には、ソースブロードキャストパケット数と、再ブロードキャストパケット数と、Hello パケット数の和である。ブロードキャストストーム問題を回避するためには、ネットワーク負荷を削減しなければならない。そのためには、冗長なパケットの転送を抑制しなければならない。遅延を、パケットを受信できる全ての MN に到達するまでに要する時間と定義する。ネットワーク負荷と遅延はホップ数に影響を受けるため、中継距離を長くとる必要がある。以上を考慮すると、以下の要求条件を同時に満足する必要がある。

- (1) 同一パケットの重複再ブロードキャストをできる限り行なわないようにする。
- (2) 電池残量が少ない MN はできる限り中継ノードに選ばれないようにする。
- (3) 中継距離が短い MN はできる限り中継ノードに選ばれないようにする。

### 2.2 提案手法

- (1) 要求条件 (1) の実現法

受信したパケットを再ブロードキャストすると重複再ブロードキャストとなるケースには、受信したパケットが既に送信したパケットと同一パケットの場合と、受信したパケットが再ブロードキャスト待ちにあるパケットと同一パケットの場合がある。前者の場合、受信したパケットを廃棄することにより重複再ブロードキャストを回避する。後者の場合、受信したパケットおよび再ブロードキャスト待ちにあるパケットを廃棄することにより重複再ブロードキャストを回避する。

(2) 要求条件(2),(3)の実現法

電池残量と中継距離の少なくともいずれかが0の場合に待ち時間が最大となり、電池残量が電池の容量と同じでかつ中継ノード間の距離が電波伝搬距離に等しい場合に待ち時間が最小となるように待ち時間を設定する。今、受信MNの電池残量を $C_c$ 、受信MNの最大電池容量を $C_m$ で表すものとする。また、中継距離を $d$ 、MNの電波伝搬距離を $r$ で表すものとする。電池残量か中継距離のいずれかが0の場合の最大待ち時間を $\alpha$ とする。電池残量と中継距離の少なくともいずれかが0の場合に待ち時間が最大となるように待ち時間を設定するためには、電池残量に比例する部分と中継距離に比例する部分の積をとる。電池残量と中継距離の重みについては、実際の処理プログラムの計算時間を短くするために設定しない。以上の検討により、受信したパケットの再ブロードキャストを待つ時間 $WAIT$ を式(1)として定義する。

$$WAIT = \left\{ 1 - \left( \frac{C_c}{C_m} \right) \times \left( \frac{d}{r} \right) \right\} \cdots (1)$$

式(1)によって算出される待ち時間を図1に示す。電池残量が多いほど、または中継距離が長いほど待ち時間が短くなっており、電池残量と中継距離の少なくともいずれかが0の場合、待ち時間は最大待ち時間である $\alpha$ になっている。このことから、条件(2),(3)を満足していることがわかる。この手法をBMDB (Broadcast Method considering Battery and Distance) と呼ぶ。

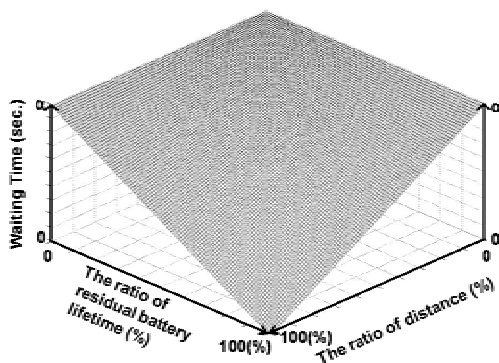


図1 式(1)による待ち時間

## 2.3 評価

### 2.3.1 評価条件

提案手法の評価を行なうために、サーベイ論文[6]で優位性がある手法として紹介されたSBA (Scalable Broadcast Algorithm)[6]とAHBP (Ad Hoc Broadcast Protocol)[6]、各MNの電池残量を考慮する手法FBC (Fair Battery Consumption)[7]との比較を行う。SBAとAHBPにおいて、MNは定期的にHelloパケットを交換することによって隣接するMNを知る。SBAでは、転送パケットを受信したMNは隣接MNがない場合は中継をキャンセルする。隣接MNがある場合にはランダムな時間待ち合わせ、その間に同一パケットを受信した場合には、そのパケットを受信していない隣接MNがある場合のみパケットを中継する。AHBPでは、パケットを送信するMNが一番遠い隣接MNを中継ノードに指定する。このため、SBAと異なりパケットを中継する前の待ち時間はない。FBCにおいては、転送パケットを受信したMNは、電池残量に反比例した長さの時間だけ中継を待ち合わせる。その間に同一パケットを受信した場合には中継をキャンセルする。

表1は、シミュレーションモデルのパラメータを示す。また、MN数は60、一様分布とした。ランダムウェイポイントモデルのパラメータについては、速度は毎秒10m、休止時間は0秒とした。ブロードキャストの発生率は、毎秒10パケットとし、各ソースはランダムに選択した。実験結果として、試行回数10回の平均値とともに、95%信頼区間を示す。

各MNの最大電池容量および1パケットを送信するのに消費する電力は、それぞれ9000J、700mWとした。初期時刻における各MNの電池残量の分布は50%から100%までの一様分布とした。なお、パケット送信による電池残量低下とパケット送信以外による電池残量の低下の比については具体的な数字が見当たらなかったため、携帯電話における通話中と待ち受け時の電池残量の低下の比を参考に、パケット送信による電池残量低下とパケット送信以外による電池残量の低下の比が、100対1、10対1、2対1の場合についてそれぞれシミュレーションを行った。到達率の評価では、電池切れノードの影響をみるために、シミュレーション時間を4000秒とした。

表1 シミュレーションモデルのパラメータ

Parameter	Value
Simulator	ns2 (2.1b7a)
Network area	350×350 (m <sup>2</sup> )
Radio propagation range	100 (m)
Mobility model	Random waypoint model
MAC	IEEE802.11a
Simulation time	100 (s)

### 2.3.2 評価結果

表2は、各手法の遅延を示す。提案手法は既存手法の中で最も良いAHBPよりも0.067秒遅い。しかし、提案手法の遅延時間は0.087秒であり、音声通信も可能な程小さな遅延でありサービス品質上大きな問題ではない。

表2 遅延

BMBD	FBC	SBA	AHBP
0.087 (s)	0.080 (s)	0.111 (s)	0.020 (s)
(0.016)	(0.015)	(0.002)	(0.001)

表3は、各手法における、2.1で述べた総送信パケット数を示す。提案手法が1番低く、AHBPの93%、FBCの76%、SBAの68%である。

表3 総送信パケット数

BMBD	FBC	SBA	AHBP
15600	20400	22800	16800
(1200)	(2400)	(600)	(600)

図3は、パケット送信による電池残量低下とパケット送信以外による電池残量の低下の比が100対1の場合の、各手法の時間経過に伴う到達率を示す。提案手法が最も長く高到達率を維持でき、他の手法に比べて1.5~1.8倍長い。パケット送信とパケット受信の比について、提案手法を1とすると、FBC、SBA、AHBPはそれぞれ、0.99、1.21、1.29であった。このため、SBA、AHBPについて、パケット送信による電池残量低下とパケット送信以外による電池残量の低下の比を10対1、2対1とした場合には、提案手法の優位性がさらに高くなる。このことを、シミュレーションで確認した。

MN数が20の場合には、各手法とも20%程度到達率がさがすが順位とその差は概ね変わらない。40の場合には各手法の順位とその差は60の場合とほぼ同様である。ネットワーク領域の影響について、ノード密度を同じとし、500m四方、1000m四方の場合のシミュレーションを行った。その結果、特に顕著な変化はなかった。

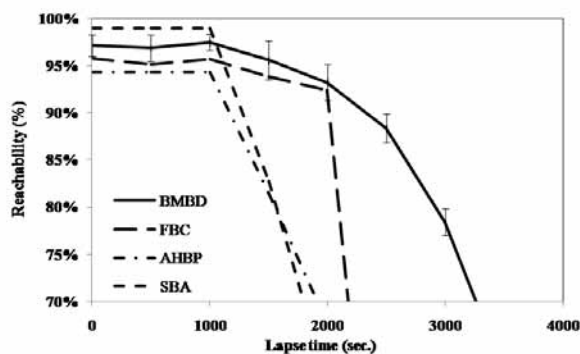


図3 時間経過に伴う到達率

### 3. エミュレータ

#### 3.1 要求条件と課題

要求条件は、デスク上の小スペースで、一人の試験者により、大規模な端末数や試験エリアの試験が可能であること。試験のための余計な工数や手戻りを増やさないために、APLを修正することなく、実端末（実際のMANETで用いられる端末）とエミュレータ間で移植できること。

要求条件の実現にあたって、1台の実機（仮想端

末を実装するマシン）で大規模な端末数を擬似する場合には、実機のCPUやメモリ等のリソースが不足する可能性がある。このため、複数実機を用いることでリソース不足の問題に対処する。しかしながら、複数実機を用いたエミュレーションを可能にするためには、エミュレータは仮想端末（実端末の振舞いをソフトウェアで擬似したもの）のIPアドレスと実機のIPアドレスとの相互変換を行なう必要がある。また、パケットを渡すべきAPLを識別するための識別子を、どのように相手の仮想端末に伝えるかが問題となる。

#### 3.2 解決策

APLの移植性を確保するために、送信仮想端末では、APLは送信先仮想端末を示すIPアドレスと送信先APLを識別するためのポート番号を指定してTCP/IPにデータを渡す。この処理を行なう為に、図4に示すようにAPLとTCPまたはUDP/IP層の間に変換プログラム(CNV)を設ける。CNV(図4ではCNV<sub>i</sub>)はAPLから送信要求を受け取ると、送信先仮想端末のIPアドレスから送信先実機のIPアドレスに変換する。次に、CNVはAPLから受け取ったデータをパケット化し、送信先APLの識別子であるポート番号をCNVヘッダに設定する。最後に、CNVは、送信先の実機のIPアドレスと、送信先仮想端末に対応するCNV(図4ではCNV<sub>j</sub>)の識別子に相当するポート番号を指定して、TCPまたはUDP/IP層にパケットを渡す。受信側実機のCNV(図4ではCNV<sub>j</sub>)はCNVヘッダ部にあるAPL識別用のポート番号に対応するAPLにパケットを渡す。

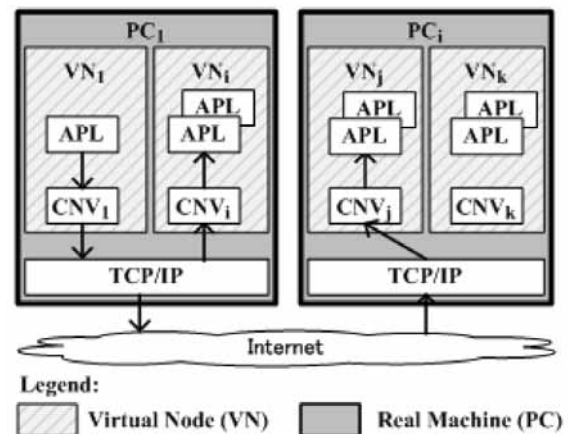


図4 仮想端末間の送受信の際のパケット処理

#### 3.3 評価

##### 3.3.1 実験条件

エミュレータの性能上のパケットロスや遅延を評価し、エミュレータの性能限界を判定する。性能限界の判定の仕方については、パケットロス率は0%、CPU使用率は80%とし、遅延は試験者が評価結果に基づいて実装端末数を決めるものとする。

### 3.3.2 実験結果

図5は、実機の数に対する実装限界端末数を示す。実機数を1台、5台、10台と増やすことで、実装できる仮想端末数を130台、410台、710台と増やすことができることを確認した。到達遅延についてもまた、実機数を増やすことで、抑えることができることを確認した。

パケット長の影響については、長くなるほど到達遅延とCPU使用率が増加することを確認した。パケットの送信周期の影響については、長いほどより多くの仮想端末を実装できることを確認した。なお、いずれの場合にもパケットロスは発生しなかった。

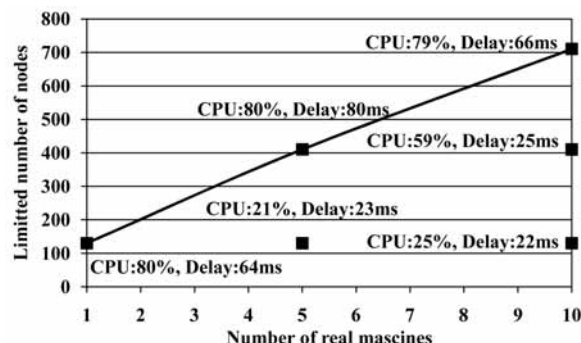


図5 実装限界端末数

### 3.3.3 比較結果

サーベイ論文[8]と新しい論文[11, 12]で提案されている既存のエミュレータ20台の中で、優位性を示しているエミュレータは、NEM, STS, MAS, VALであるため、これらの既存エミュレータと比較をした。しかし、いずれの論文においてもエミュレータの定量的な評価が行われていないことから、比較は定性的な比較とならざるを得なかった。以下に比較結果を述べる。

スケーラビリティについて、STS, MAS, VALは、一台の実機でひとつの実端末しか擬似していない。一方、NEMは、一台の実機しか使用できず、最大擬似端末数は100台である。移植性について、NEMを除いては、実端末上で走行するAPLをエミュレータに移植した場合、修正は不要である。視覚化について、VALを除いては実現しているが、試験後の再現性を実現したのは、本提案のみである。柔軟性について、試験前及び試験中に一人の試験者で試験環境の設定ができることと、シミュレータで試験環境の設定に用いたファイルをエミュレータに設定できることの両方を実現したのは本提案のみである。擬似対象の範囲について、NEMを除いてはAPLのデバッグに必要なMAC層以下の現象を擬似対象としているが、端末の移動と端末の電池切れの擬似の両方を実現したのは本提案のみである。

以上に基づいて、既存エミュレータと提案エミュレータとを比較した結果を表4に示す。は満足、は部分的に満足、×は不満足を示す。移植性以外の項目では提案手法がいずれに対しても優れている。

表4 比較結果

	本提案	NEM	STS	MAS	VAL
スケーラビリティ			×	×	×
移植性					
視覚化					×
柔軟性					
擬似対象	×				

## 4. むすび

本研究では、ソフトウェア開発基盤が抱える問題として、ブロードキャストストーム問題と試験環境の問題に取り組んだ。前者の問題に対しては、各MNの電池残量と中継距離の両方を同時に考慮するブロードキャスト手法を提案し、シミュレーションにより既存手法と比較することで、提案手法が優れていることを確認した。後者の問題に対しては、複数のPCを用いたエミュレーションが可能なエミュレータを提案し、有効性を確認した。また、既存エミュレータと比較することにより、提案エミュレータが優れていることを確認した。

今後は、アドホックネットワークにおける通信の信頼性の問題とこれまで取り組んできた研究成果を基にした実環境システムの開発に取り組む。

## 参考文献

- [1] D.B. Johnson, D.A. Maltz and J.Brock, "The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks (DSR)," Internet Draft, July 2004.
- [2] Mobile ad-hoc networks (manet) charter, <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>
- [3] 兼子陽市郎, 梅木智光, 岡田啓, 大和田泰伯, 間瀬恵一, "気球を用いたアドホック通信システム「スカイメッシュ」の紹介," 電子情報通信学会技術研究報告, AN2007-41, pp. 43-45, Oct. 2007.
- [4] 伊藤篤, 大田知行, 井上伸二, 角田良明, "携帯電話とアドホックネットワークを利用した児童見守りシステム," 電子情報通信学会 第3回ネットワークソフトウェア研究会, pp.35-42, Feb. 2008.
- [5] S.Ni, Y.Tseng, Y.Chen, and J.Sheu, "The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network," Proc. ACM/IEEE International Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), pp.151-162, 1999.
- [6] B. Williams and Tcamp, "Comparison of Broadcasting techniques for Mobile Ad Hoc Networks," Proc. The ACM/IEEE International Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM), pp.194-205, 2002.
- [7] T. Koide and H. Watanabe, "A versatile broadcasting algorithm on multi-hop wireless network: WDD algorithm," IEICE Trans. Fundamentals, vol.87-A, no.6, pp.1599-1611, June 2004.
- [8] 笠松大佑, 篠宮紀彦, 太田理, "MANETにおける距離と電池を考慮したブロードキャスト手法," 電子情報通信学会論文誌, Vol.J91-B, No.4: pp.364-372, 2008.
- [9] W. Kiess and M. Mauve, "A Survey on Real-World Implementations of Mobile Ad Hoc Networks," Elsevier's Ad Hoc Networks, 5(3), pp.324-339, 2007.
- [10] 笠松大佑, 河田公次, 岡田大樹, 篠宮紀彦, 太田理, "アドホックネットワークサービスプログラムの試験用エミュレータ," 電子情報通信学会論文誌 Vol.J92-B, No.4, 2009. 掲載予定.
- [11] M. Puzar and T. Plagemann, "NEMAN: A Network Emulator for Mobile Ad-Hoc Networks," In Proc. of the 8th International Conference on Telecommunications, pp.155-161, 2005.
- [12] Atsushi Kawano, Tomoyuki Ohta, Kaori Maeda, Kenji Ishida, and Yoshiaki Kakuda, "Development of a topology controllable testing environment for mobile ad hoc network software," IEICE Transactions on Communications, vol.E90-B, no.11, pp.3104-3107, November 2007.