

有線ネットワークにおける 無線ネットワークのデータ到達性エミュレーション技法

Data delivery nature emulation technique of wireless network on wired network

高島 大裕[†] 磯崎 直樹[†] 宮地 利幸[†] 知念 賢一[†] 篠田 陽一[§]
Motohiro Takashima Naoki Isozaki Toshiyuki Miyachi Ken-ichi Chinen Yoichi Shinoda

北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科[†] / 情報科学センター[§]
SCHOOL OF INFORMATION SCIENCE[†] / CENTER FOR INFORMATION SCIENCE[§],
JAPAN ADVANCED INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

概要

無線ネットワークの実験環境には、ソフトウェアシミュレーションや実機による実験環境がある。ソフトウェアシミュレーションは、実験対象がその実験環境で動作しても、実機で動作するとは限らない。また、実機による実験は、準備段階等でコストがかかる。そこで、ソフトウェアシミュレーションと実機による実験環境の中間として位置する無線ネットワークの実験環境を構築する必要がある。

本研究では、無線ネットワークを有線ネットワークによってエミュレートすることで、新しい実験環境の構築方法を提案する。そのために、有線ネットワークと無線ネットワークの違いの中でも、ノード間の距離によってデータの到着性が変化することに着目した。そのような状況を模倣する実験環境の設計を行い、その後実装、および評価を行った。

1 はじめに

近年、無線通信は広く普及し、携帯電話や無線 LAN のユーザ数が、著しく増加している。また、モバイルコンピューティングの発達により、自律的にネットワークが構成されるアドホック無線ネットワークが注目されている。そのため、多種多様な無線通信を用いたアプリケーションやプロトコルが、開発されている。これらの技術の開発のためには、技術を評価するための実験環境が必要となる。従来の無線ネットワークの実験環境として、ソフトウェアシミュレーションによる実験環境と、実機による実験環境が多く使用されている。以下にそれらの特徴をまとめる。

ソフトウェアシミュレーション実験環境

ソフトウェアシミュレータの代表例として、ns-2 [1] が広く使用されている。ソフトウェアシミュレーションは、実験環境を容易に構築できる利点がある。また、同じ実験環境で何度も実験が可能となる。しか

し、実環境で使用するアプリケーションとは別に、ソフトウェアシミュレーション用のアプリケーションの実装を行う必要がある。そのため、実験で得られたデータの信頼性は低い。

実機による実験環境

実機による実験環境では、実環境のプロトコルやアプリケーションが使用でき、信頼できるデータの測定が可能である。しかし、大規模な実験を行う場合、実験範囲が広大になり、無線ノードも実験台数分用意する必要がある。さらに、ノードの移動に関する実験を行う場合、ノードの移動のための装置等が必要となる。そのため、準備期間が長くなり、予算も多く必要とするなど実験環境の構築が困難である。また、実験をやり直したい場合、同じ実験環境を用意することができない欠点もある。これは同じ気象条件を用意できないためである。そこでこれらの中間として位置する無線ネットワークの実験環境を構築する必要がある。

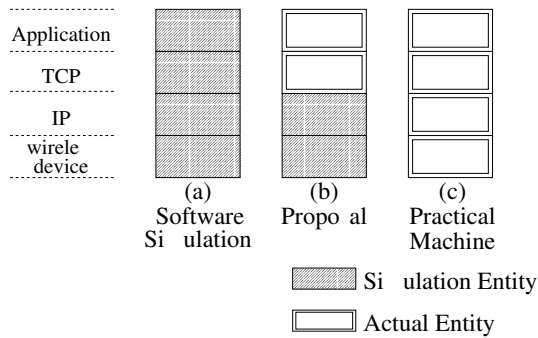


図 1: 各アプローチにおけるシミュレーション割合

ソフトウェアシミュレーションによる実験環境は、全ての TCP/IP の階層モデルのレイヤ（レイヤ）をシミュレーションによって構成している。実機による実験環境は、全てのレイヤを実機によって構成している。そこで、本研究では、無線デバイス層以下はシミュレーションによって実現し、IP 層以上を実機で実現する無線ネットワークの実験環境を構築方法を提案する。図 1 は、上記が示している従来使用されている実験環境と今回提案する実験環境のレイヤ別のシミュレーション割合を表す。網掛けはそのレイヤをシミュレーションによって実現し、白抜きは実機によって実現する。

無線デバイス層以下は、有線ネットワークによって無線ネットワークのエミュレートすることで実現する。これにより、実際に使用されている有線による実験ネットワークを使用することができ、予算や準備期間を少なくすることができる。大規模な無線ネットワーク実験を有線ネットワークで行いたい場合は、StarBED [2] や Netbed [3] 等のテストベッドがあり、これらのリソースを使用することで実現できる。また、IP 層以上は、実機によって実験するため、実際に使用する無線用のプロトコルやアプリケーションの動作も可能であり、IP 層以上の実験であれば、信頼性が高いデータの取得が可能である。

今回提案する手法の先行研究として、W-NINE [5] がある。W-NINE は、Dummysnet [6] や NIST Net [7] を使用することによってトラフィックを制御し、無線ネットワークをエミュレートしている。しかし、W-NINE の実験対象はアプリケーションを想定しており、ルーティングプロトコルなどネットワーク層で

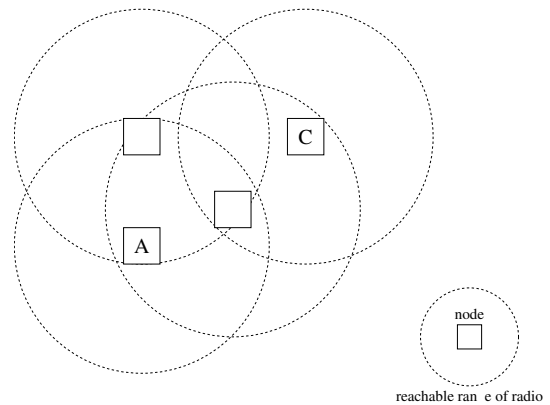


図 2: 無線ネットワークのトポロジ例

の実験を行うことはできない。

本研究では、無線デバイス層以下で有線ネットワークをエミュレートした無線ネットワーク実験環境の構築手法を検討する。そして、この検討を基に設計を行い、実装及び評価についても行う。これは、無線ネットワークの実験を行う場合の新たな選択肢の一つになると考えられる。

2 無線ネットワーク

本章では、本研究のシミュレーション対象である無線ネットワークについて述べる。さらに、有線ネットワーク上で無線ネットワークのエミュレーションを実現するための課題を挙げる。

2.1 想定する無線ネットワーク

今回想定する無線ネットワークは、現在普及している IEEE 802.11b とし、ネットワークの形態は、基地局等を必要としないアドホックネットワークを想定する。今回想定しているアドホックネットワークは、ノードとノードが無線で直接通信を行う。想定する無線ネットワークのトポロジの例を、図 2 に示し、以下に特徴を挙げる。

- ノード A の無線の伝送範囲にノード B, D が入っているので、ノード A からのデータはノード B, D にのみ届き、ノード C は、伝送範囲外なのでデータは届かない。表 1 は、図 2 の無線環境における各ノード間のデータの到達性を表す。送信ノードからデータが到達するノードは○、データが到達しないノードは×で表す。

表 1: ノード間のデータの到達性

	A	B	C	D
A	-		×	
B		-		
C	×		-	×
D			×	-

- ノード A の無線の伝送範囲内に存在するノード B, D のみ, ノード A からの ARP 等のイーサフレームを到着させる必要がある。これは、データの到達性がネットワーク層に関するのではなく、リンク層に関係することから必要である。
- ノードは移動が可能である。そのため、表 1 では、ノード A とノード C 間でデータは到達できないが、ノードが移動することで通信できる可能性がある。そのため、どのノード間の通信でも、データの到達できる距離になれば通信が可能になるシステムの実装が必要である。

2.2 有線ネットワークとの相違点

無線ネットワークのシミュレーション環境を構築するため、有線ネットワークとの相違点を考えねばならない。以下に相違点を示す。

- データの到達性の偏在
ノード間で通信する場合、距離や障害物等の要因によってデータの到達性が変化する。
- 帯域
無線通信に使用できる周波数は限られているため、実行帯域は比較的狭い。
- コリジョン
コリジョン検知・再送の方法が異なる。

無線の実験を行う場合に、データの到達性の偏在による実験結果への影響が大きくなると考えたため、本研究では、データの到達性の偏在を扱う。

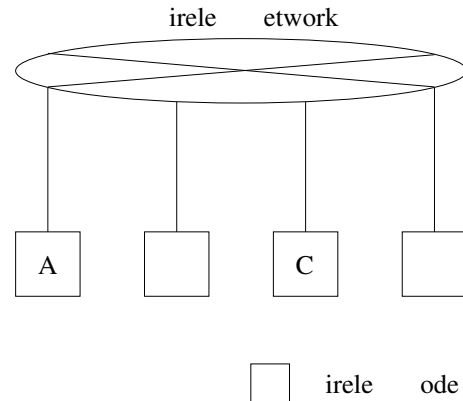


図 3: シミュレーショントポロジ

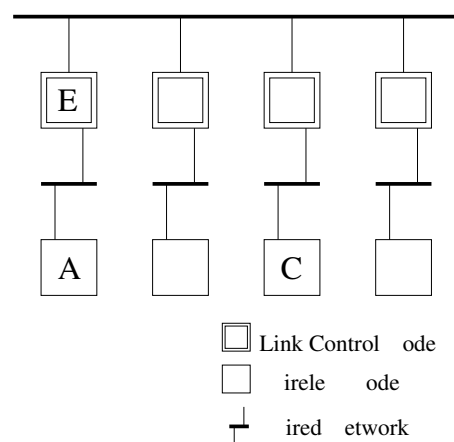


図 4: システムトポロジ

3 設計

有線ネットワーク上でデータの到達性を変化させる機構を設け、無線ネットワークのデータの到達性の偏在をエミュレートする。今回は、データの到達性の偏在に影響する原因の中でノード間の距離に着目する。その際のデータの到達性は、想定した無線ノード間の距離から算出する。具体的には、ノード ID と時刻と場所が書かれたデータを用意し、その時間に沿ったノード間の距離を計算する。ノード間の距離の計算方法は、ユークリッド距離によって行う。

データの到達性を変化させるためには、送信ノードと受信ノードの間でデータの到達性の制御を行う必要がある。データの到達性を制御する位置は、ノード内や送信ノードと受信ノードの間が考えられる。

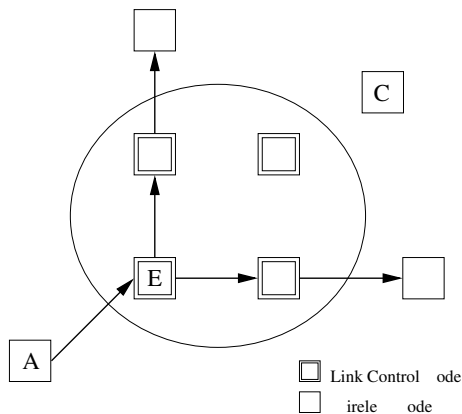


図 5: データの流れ

ノード内でデータの到達性を制御した場合、実験ノードのみでトポロジが構成でき、設計が容易である。しかし、データの到達性は、ノードの内的要因ではなく、外的要因であるため、ノード内で行うことは適切ではない。また、ノードを制御するためのプログラムが実験するアプリケーション等に影響を及ぼさないとは限らない。そのため、ノード外でデータの到達性を制御をする必要がある。

図 3 は、無線ネットワークのトポロジを表す。データの到達性の変化は、無線ノードである A-D と無線ネットワークの間にデータの到達性を制御する装置を置くことで実現する。上記のように無線ネットワークを有線ネットワーク上でエミュレートしたトポロジを図 4 に示す。図 4 の Link Control Node(LCN) は、データの到達性を制御する装置である。例えば、表 1 の場合、ノード A は、ノード B,D にはデータを送信できるが、ノード C にはデータを送信できない。LCN である E が、表 1 に基づいたノード A と他ノードとの到達性の情報を持ち、その情報に基づいてデータの転送を行う。この場合では、LCN E が LCN F, H を介してノード C 以外のノードにデータを送信する(図 5)。この処理を LCS で行うことにより、無線ネットワークのエミュレーションが実現される。

また、前章で述べたように、本実験環境の仕様として、送信ノードと受信ノード間をイーサフレームによって通信できるシステムにする必要がある。イーサフレームを全てのノードに届ける方法として、今回は UDP トンネルを用いた。イーサフレームが UDP

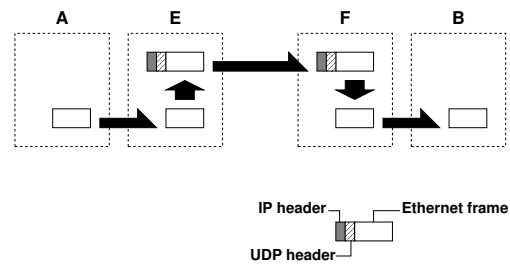


図 6: カプセル化

でカプセル化される様子を図 6 に示す。ノード A からノード B にデータを送信する場合、LCN E でイーサフレームを UDP でカプセル化し、LCN F へ送信する。LCN F で UDP ペイロードからイーサフレームを取り出し、ノード B にイーサフレームで送信する。これにより、イーサフレームによって全てのノードと通信できる。また、UDP トンネルは、特定のノードに向けて、データをユニキャストで送信する。そのため、特定のノードにのみデータの転送が可能となり、データが到達できるノードを変化させることができる。上記の LCN E と F での処理を行うプログラムをそれぞれ encap, decap と呼ぶ。シミュレーション全体では図 7 のような配置となる。encap でイーサフレームを UDP ペイロードにカプセル化を行い、decap で UDP ペイロードからイーサフレームを取り出す。これにより、ノード間でイーサフレームを送受信でき、またそのイーサフレームが受信できるノードを変化させる環境を構築できた。

次に、実験のシミュレーションの手順について示す。実験のシミュレーションの手順は以下のように行う。

1. 各時刻による各無線ノードの位置を決定
2. 位置から各無線ノード間の距離を時刻毎に算出
3. 算出した距離からデータの到達性を算出
4. 各 LCN へ通信ノードの到達情報を送信
5. 各 LCN の時刻を 0 にする
6. 各 LCN で decap を起動
7. 各 LCN の時刻を一つ進める
8. その時刻の到達情報をもとに encap を起動
9. 7 へ戻る。

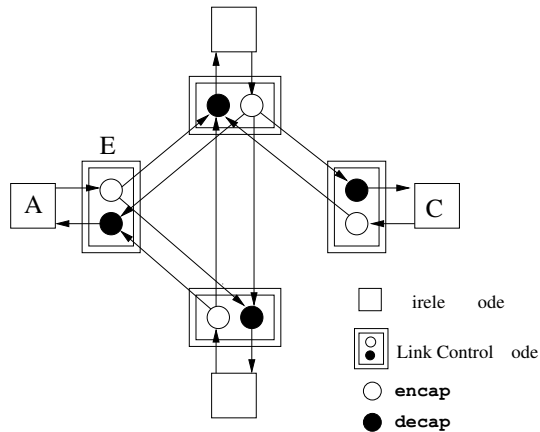


図 7: ソフトウェア

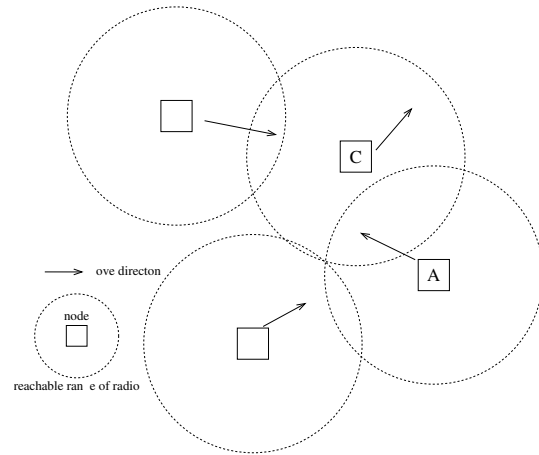


図 8: テストポロジ

これにより、ノードの到達性は、時刻ごとに変化させることができる。

4 実装

encap と decap は UNIX 上で開発を行い、C 言語を使用し実装を行った。イーサネットフレームの受信を行うために libpcap [9] を用いた。また、libpcap の拡張を行うことにより、libpcap でイーサフレームの送信を行えるようにした。なお、FreeBSD と Linux で動作の確認を行った。実ノードのシミュレーションの進行は、kuroyuri [8] を用いて行う。kuroyuri は、StarBED Project [8] により開発された実験支援システムの一つである。また、encap で使用するデータの到達性の情報を計算するプログラムを perl で作成した。

5 評価

5.1 データの到達性の変化

無線ノードの移動に伴った到達性の変化を確認する実験を行った。無線ノードを移動させ、その到達性を計測する(図 8)。ノードは、矢印の向きに移動し、ノード間の距離を変化させることでデータの到達性も変化する。実験諸元を表 2 に示す。

到達性の変化は、ノード A からノード B, C, D に ICMP を送信することで計測する。そのため、実験は、前述のシミュレーション手順に以下の ICMP を送出するステップを追加して行った。

9. 各通信ノードから全通信ノードへ向けて ping を

表 2: 実験諸元

ノード数	4 [台]
データの最大到達距離	150 [m]
移動範囲	500 x 500 [m]
ノードのスピード	0 ~ 5 [m/s]
移動モデル	random walk
実験時間	100 [s]

実行 (ICMP 送出): 10ms 間隔

10. ping の結果を記録

11. 7 へ戻る

図 9 は、送信ノード A から受信ノード B へ ICMP を送信した結果である。送信ノード A として、受信ノード C と受信ノード D に関する結果は、それぞれ図 10, 図 11 に示す。実線は想定値を示し、点線は測定値を示す。3 つの結果において、想定値と測定値がほぼ同じ値を示しているため、ノード間の距離による無線イーサネットの到達性変化のシミュレーションが成功したとみなせる。しかし、最初にノード B, C, D がノード A の伝送範囲内に入った時の想定値と実測値の時刻の間にずれがあった。これは、この時刻のずれの間 ping が届かなかったことを示す。この時刻のずれは、送信元ノードが ARP によるアドレス解決に要した時間である。想定している無線

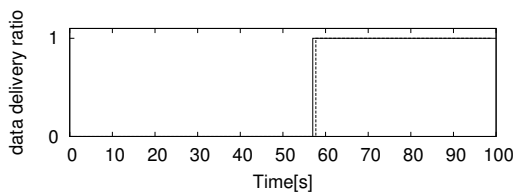


図 9: A-B 間の ICMP 応答

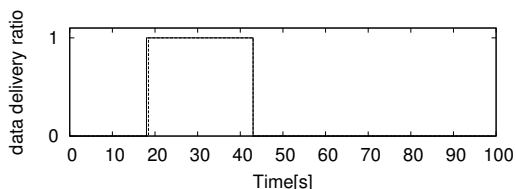


図 10: A-C 間の ICMP 応答

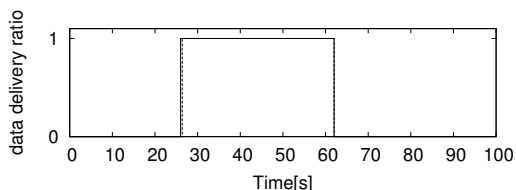


図 11: A-D 間の ICMP 応答

ネットワークでも ARP によって、受信先の MAC アドレスを探すので、到達時刻のずれを考慮した設計は必要ないと考えられる。

5.2 アドホックルーティングプロトコルを用いた実験

この実験では、今回提案した実験環境で、実際に使用されているプロトコルやアプリケーションの動作の検証を行う。アドホックネットワークのルーティングプロトコルは、AODV [10] を用い、図 12 のような、トポロジで実験を行う。また、表 3 は、実験諸元を表す。

本実験では、ノード A に FTP (File Transfer Protocol) サーバを起動し、ノード B からノード A のファイルを FTP によって取得する。ノード A は移動するため、最初はノード D を介してファイルを取得する。途中でノード D と接続が切れるため、経路が変わりノード C を介してファイルの取得を行う。全てのノードで、tcpdump を動作させ、結果を取得する。この結果よりファイルの取得経路の変化を確認した。

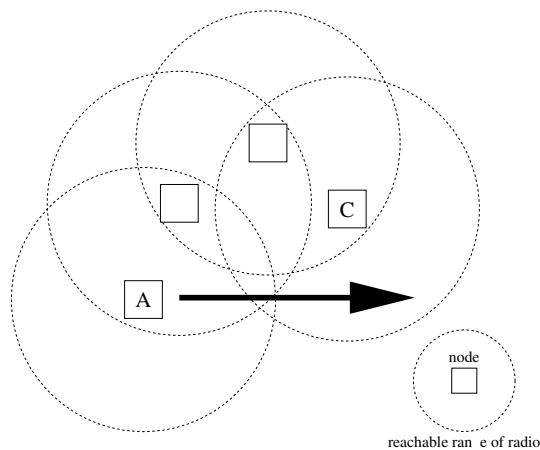


図 12: アドホックネットワークの実験トポロジ

表 3: アドホックネットワークの実験諸元

ルーティングプロトコル	AODV
ノード数	4 [台]
データの最大到達距離	150 [m]
ノードのスピード	4 [m/s]
実験時間	75 [s]

これにより、今回提案する実験環境で、ネットワーク層以上のプロトコルやアプリケーションの動作について、確認できた。

6 今後の課題

本論文では、電波の到達性の変化の要因を距離のみに限定したが、それ以外の要因として、フェージング、障害物、気象条件、移動に伴うドップラ効果が知られている。無線イーサネットは近距離の用途に限られるため、気象条件やドップラ効果は考慮する必要はないといえる。しかし、フェージングや障害物への対応は今後の課題である。しかし、今回の実験環境はネットワーク層以上の実験を行うことを想定しているため、フェージングや障害物の電波の到達性への影響のみを考慮するだけでよいといえる。また、帯域やコリジョンによる有線ネットワークと無線ネットワークの違いがある。帯域は、今後の課題であるが LCS の拡張により可能になると考えている。

7 まとめ

本研究では、無線ネットワークのシミュレーション方法のひとつとして、有線ネットワークでのエミュレーション環境の構築方法を提案した。有線ネットワークと無線ネットワークの差異について考察し、その中でもノード間の距離によってデータの到着性が変化する有線ネットワークの設計を行った。StarBED上でシステムの実装を行い、ノード間距離によってデータの到達性が変化することを確認した。また、そのシステム上でアドホックルーティングプロトコル、アプリケーションの動作の確認を行った。これにより、無線ネットワークの性能評価方法に新たな選択肢を設けることができた。

参考文献

- [1] L. Breslau, D. Estrin, K. Fall, S. Floyd, J. Heidemann, A. Helmy, P. Huang, S. McCanne, K. Varadhan, Y. Xu, and H. Yu, *Advances in Network Simulation*, IEEE Computer, 33(5), May 2000.
- [2] 北陸 IT 支援センター
<http://www.hokuriku-it.nict.go.jp>
- [3] B. White, J. Lepreau, L. Stoller, R. Ricci, S. Guruprasad, M. Newbold, M. Hibler, C. Bard and A. Joglekar, *An Integrated Experimental Environment for Distributed Systems and Networks*, *Proceedings of PADS '98*, May 1998.
- [4] *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High Speed Physical Layer Extension in the 2.4GHz Band*, *IEEE Std 802.11b*, 1999
- [5] T. Perennou, E. Conchon, L. Dairaine and M. Diaz, *Two-Stage Wireless Network Emulation*, *Proceedings of The 2004 Workshop on Challenges of Mobility*, April 2004.
- [6] L. Rizzo, *Dummynet: A Simple Approach to the Evaluation of Network Protocols*, *ACM Computer Communication Review*, 27(1), January 1997.
- [7] M. Carson and D. Santay, *NIST Net: A Linux-based Network Emulation Tool*, *ACM SIGCOMM Computer Communications Review*, 33(3):111-126, 2003.
- [8] KUROYURI, StarBED Project,
<http://www.starbed.org/>.
- [9] libpcap, Lawrence Berkeley National Labs Network Research Group, <http://ftp.ee.lbl.gov/>.
- [10] C. Perkins and E. Royer, *Ad-Hoc On-Demand Distance Vector Routing*, *Proceedings of 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, February 1999.