

災害時を想定したアドホックネットワーク
構築手法の検討

**Study of Construction Methods for
Ad-Hoc Network under Disaster**

2025 年 3 月 4 日

東京都立産業技術高等専門学校

ものづくり工学科 情報通信工学コース

末廣 隼人

指導教員 高崎 和之

目次

1. はじめに	1
2. 理論	2
2.1. アドホックネットワークについて	2
2.2. ルーティングプロトコル	2
2.2.1. リアクティブ型	3
2.2.2. プロアクティブ型	4
2.2.3. ハイブリッド型	4
2.3. アドホックネットワークの技術的課題	5
2.3.1. 隠れ端末問題	5
2.3.2. さらし端末問題	5
2.4. Bluetooth	6
2.4.1. Bluetooth Classic	6
2.4.2. Bluetooth LE	6
3. 提案手法	8
3.1. シミュレーション	8
3.2. アルゴリズム	9
4. 結果	12
4.1. 人口密度が高い地域の場合	12
4.2. 人口密度が低い地域の場合	12
5. 考察	13
6. まとめ	13
参考文献	14

1. はじめに

・実際の環境でアドホックネットワークを構築することが難しいため、シミュレーションを通して有効的な経路構築方法が何か、また、安定した通信を行うにはどのような条件が必要なのかを確認した． ・地震等の大規模災害発生時に

2. 理論

2.1. アドホックネットワークについて

アドホックネットワークとは、中央の管理者やルータ、アクセスポイントなどの既存のインフラストラクチャを介さずに、端末（以下では、ノードと呼ぶ）同士が直接通信を行う一時的なネットワークのことである。電波が届かず直接情報を交換できないノード同士の場合、基地局を経由せずに途中のノードが中継するマルチホップ通信により情報交換が可能になる。

これらを踏まえると、ノードさえあればどのようなエリアでも即席にネットワークを形成することができるためとても便利だが、ノード移動に伴うネットワークトポロジや伝送品質の急激な変化、利用可能な無線周波数帯域の限界、バッテリー依存によるノードの消費電力などの制約といった厳しい条件がある。そのため、ルーティングやチャネルアクセスの制御、周波数帯域の有効活用、ノードの電力消費の節約等の多くの課題がある^[1]。

アドホックネットワークに関する研究の歴史は長く、アドホックネットワークの第一世代である PRNET(Packet Radio Network) は、1972 年に米国の国防高等研究計画局によって開発され、軍事利用を目的とした研究のために開始された。次に、第二世代である NTDR(Near-term Digital Radio) も、米国により軍事目的で研究が行われ、1980 年代頃に実用化された。そして、第三世代である MANET(Mobile Ad hoc NETwork) を含む現在のアドホックネットワーク技術は、IEEE802.11 や Bluetooth などの近距離無線通信技術を活用し、民間でも使用できるアドホックネットワークが 2000 年頃から誕生した。加えて、同時期から災害時用ネットワークとしての活用に期待が高まっていた。

2.2. ルーティングプロトコル

アドホックネットワークには、ネットワークトポロジの急激な変化や消費電力の増加など、経路の構築前、構築後での課題が多く残っている。そのため、アドホックネットワークを効率的に構築、運用するために、ルーティングプロトコルが用いられている。図 1 にルーティングプロトコルの分類とプロトコルの代表例を示す。

ルーティングプロトコルは、大きくリアクティブ型、プロアクティブ型、ハイブリッド型の 3 つに分類される。それぞれ、経路探索のタイミングや管理方法が異なり、スループットやオーバーヘッドなどに影響を与える。次項にそれぞれの特徴と簡単な概略図を用いて紹介を行う。

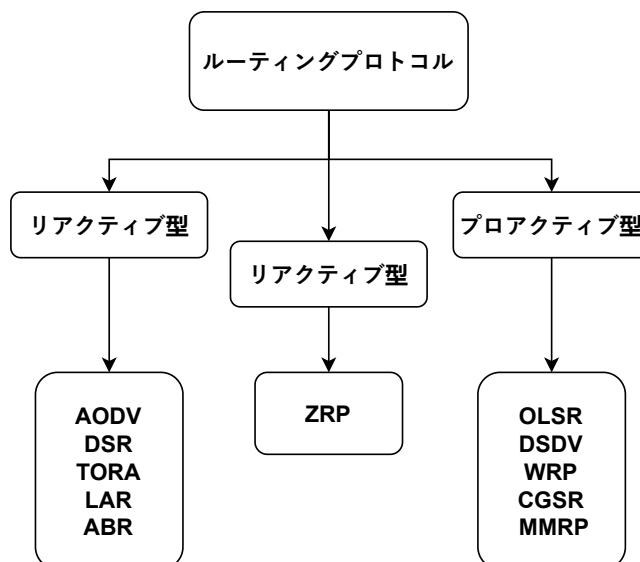


図 1 ルーティングプロトコルの分類

2.2.1. リアクティブ型

あるノードが通信要求を行なった時にルーティングプロトコルに基づいて電波をフラッディングし、近隣のノードとその場で情報のやり取りを行い経路生成を行う。通信要求がなされた時に作成されるため、実際に通信が開始されるまでにラグが発生する。

このようにする理由として、アドホックネットワークを構築するノードのデバイスがバッテリーなどで駆動することが多いため、むやみやたらに電波をフラッディングしてしまうと、電池の消費速度が速くなってしまふからである。加えて、ノードの移動により、ネットワークが動的に変化変化するため、数分前に構築された経路表の有効性が失われる場合が多い。したがって、通信直前に経路表を生成することで電波のフラッディング回数を減らし、駆動時間の長時間化が行われる。それゆえに、通信開始が遅くても良い環境で用いられている。

リアクティブ型での動作イメージを図 2 に示した。ノード A ~E が図のようにある時、ノード A と E が通信を行う場合を考える。次に、リアクティブ型での経路構築の手順を示す。

- ① ノード A が自身の ID と宛先ノードの情報を載せてフラッディングを行う。
- ② ① の情報を受信したノードは、送信元を記録してから、宛先を確認する。今回の場合、宛先が違うため①と同様の情報を載せてフラッディングを行う。
宛先のノードに辿り着くまで行う。
- ③ ② の情報を受信したノード E は、今回の宛先であるため、これまでの経路を逆順に辿って行き、発信元のノード A に経路が生成されたことを伝達し、経路表をもとに通信を行う。

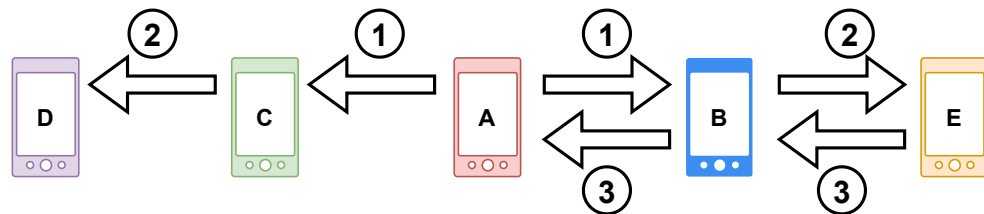


図 2 リアクティブ型の動作イメージ図

ノード C, D はノードが存在する限りフラッディングを行なってしまうため、現在の情報にフラッディングをする回数も同時に送信し、回数が 0 になったら、これ以上の探索は実施しないという対策が必要となる。

代表的なプロトコルとして AODV, DSR, TORA, LAR, ABR などがある。次にそれぞれの特徴について概説する。

- AODV(Ad hoc On-Demand Distance Vector)^[2]
- DSR(Dynamic Source Routing)^[3]
- TORA(Temporally-Ordered Routing Algorithm)^[4]
- LAR(Location-Aided Routing)^[5]
- ABR(Associativity-Based Routing)^[6]

2.2.2. プロアクティブ型

リアクティブ型では通信要求が発生してから経路表が作成されるのに対し、プロアクティブ型では近隣のノードと周期的に情報のやり取りを行い、通信要求が発生したらすぐに通信を開始することができる。しかし、リアクティブ型と比べ頻繁に情報のやり取りを行うため、電池の消費が早い。常に新鮮な経路表を保持しているためノードの入れ替わりが激しい環境では有効的である。

以下にリアクティブ型での動作イメージを図 3 に示した。各ノードは常に近隣のノードと情報をやり取りしているため、通信の開始が早く、また、近隣のノードが接続が不可能になったとしても、すぐに新たな経路を生成することが可能であり安定した通信を行うことができる。

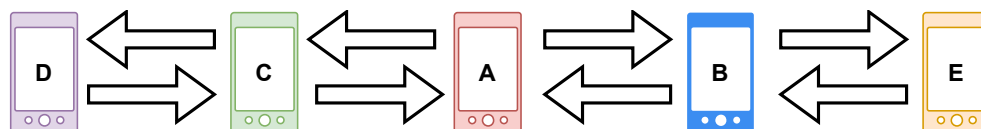


図 3 プロアクティブ型の動作イメージ図

代表的なプロトコルとして OLSR, DSDV, WRP, CGSR, MMRP などがある。

- OLSR(Optimized Link State Routing)^[7]
- DSDV(Destination-Sequenced Distance-Vector)^[8]
- WRP(Wireless Routing Protocol)^[9]
- CGSR(Cluster-head Gateway Switch Routing)^[10]
- MMRP(Mobile Mesh Routing Protocol)^[11]

2.2.3. ハイブリッド型

リアクティブ型とプロアクティブ型の長所を組み合わせたプロトコルである。代表的なプロトコルとして ZRP(Zone Routing Protocol)^[12] がある。

ZRP では、ネットワークをゾーンと呼ばれる単位で分割し、ゾーン内にあるノードに対してはプロアクティブ型のルーティングプロトコルで近隣の情報同士でやり取りを行い、ゾーン外にあるノードに対してはリアクティブ型のルーティングプロトコルで通信要求が発生した場合のみ動作しそのノードまでの経路を生成する。

メリットとして、ゾーン内では短距離通信の遅延が最小化され、ゾーン外では不要な情報のやり取りを減らすことが可能となる。また、ネットワークが大規模になったとしても全ての経路情報を保持しなくて良いため効率的に運用することが可能である。しかし、デメリットとして、ゾーン半径の設定が困難であることである。ゾーン半径が小さい場合、遠距離通信が頻繁に発生してしまい、また、ゾーン半径が大きい場合、ゾーン内に存在するノードが多数になり計算コストとメモリ消費が増大する可能性がある。

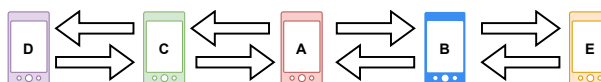


図 4 ハイブリッド型の動作イメージ図 (仮)

2.3. アドホックネットワークの技術的課題

2.1 節で述べた課題のほかに、隠れ端末問題とさらし端末問題があり、これらがアドホックネットワークが一般的に普及されていない原因の一つとも言える^[13]。次項にそれぞれの問題について説明する。

2.3.1. 隠れ端末問題

図 5 に隠れ端末問題を表した図を示す。図 5 では、スマートフォンがノード、その周りにある円がノードからの通信距離を表している。ノード B の円は見やすさの都合上省略している。

隠れ端末問題とは、ノード A と C がノード B に接続を行うとき、ノード A、C は互いに通信可能距離外にあるため互いの存在が隠れてしまい、ノード B が誰とも通信をしてないと判断してしまう。そして、ノード A、C が同時にデータをノード B に送信した場合、電波干渉やデータの衝突する問題が発生がある。

この問題により通信制御のスループット (処理能力) の低下が発生し、通信に遅延が生じる。

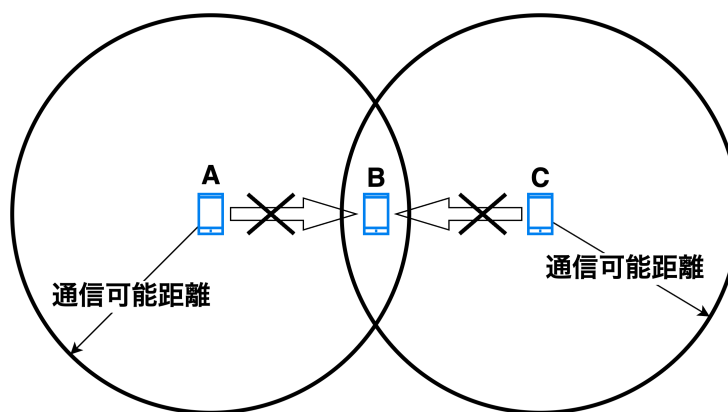


図 5 隠れ端末問題

2.3.2. さらし端末問題

図 6 にさらし端末問題の図を示す。図 6 で表されているスマートフォンや円は隠れ端末の場合と同様の意味である。

さらし端末問題とは、ノード A、D が通信を行っているとき、通信可能距離内にいるノード B はデータを送信して衝突しないようにするために通信抑制が頻繁に行われる問題がある。これにより伝送速度や通信品質の低下が発生してしまう。

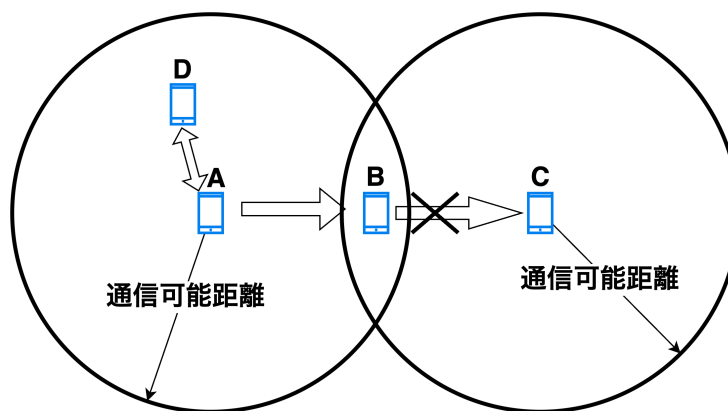


図 6 さらし端末問題

2.4. Bluetooth

Bluetooth とは、デジタル機器用の近距離通信規格の一つであり、数メートルから数十メートル程度での距離間で電波を用いて簡易的な情報のやり取りを行う。また、免許を必要としない 2.4GHz の周波数帯を使用するので PC のマウスやキーボード、ワイヤレスイヤホン、スマートウォッチなど生活の身近に使用されている。IEEE の規格名は IEEE802.15 である。

1994 年にスウェーデンの Ericsson 社が近距離無線通信規格の開発をはじめ、1998 年に Promoter5 社 (Ericsson, Intel, IBM, Nokia, 東芝) により Bluetooth SIG (Special Interest Group) が設立され、Bluetooth の規格策定が行われている。そして、現在まで公開されている仕様として、Bluetooth Classic と Bluetooth Low Energy (LE) の 2 種類に分けることができ、表 1 にそれぞれの特徴を示した。

表 1 Bluetooth Classic と BLE の特徴 ^[14]

	Bluetooth Classic	BLE
周波数帯	2.4GHz (2.402 ~2.480GHz)	
チャンネル利用	周波数ホッピングスペクトラム拡散 (FHSS)	
チャンネル数	1MHz 間隔で 79 チャンネル	2MHz 間隔で 40 チャンネル (3 つはアダプタイジング用チャンネル)
転送速度	3, 2, 1 Mbps	2, 1 Mbps, 500, 125 kbps
同時接続台数	最大 7 台	仕様上無限
消費電力	1W	0.01W ~0.5W
通信トポロジ	スター型	スター型, メッシュ型
主な用途	マウス, イヤホンなど	IoT センサ, スマートウォッチなど

2.4.1. Bluetooth Classic

Bluetooth Classic は、1997 年に一般公開された Bluetooth 1.0 から 3.0 までのバージョンを指している。

デバイスには、接続を要求する親機 (Master) と接続を受信する子機 (Slave) の 2 種類があり、Master はいわゆるスマートフォンで、Slave はワイヤレスイヤホン等のガジェットに相当するものである。この時、Master は同時に最大 7 台の Slave と接続が可能。また、Bluetooth で位置検出を行う研究が行われている ^[15]。

通信距離は Class1~3 のように電波強度で分類され表 2 のようになっている。

表 2 Bluetooth Classic の場合 ^[16]

Class 1	最大 100m (4dBm 超 ~20dBm)
Class 2	最大 10m (0dBm 超 ~4dBm)
Class 3	最大 1m (0dBm)

2.4.2. Bluetooth LE

Bluetooth LE とは、2009 年のに公開された Bluetooth 4.0 以上のバージョンを指し、このバージョンから低消費電力デバイス向けに、より省電力に特化した機能が追加された。

LE の場合のデバイスは、親機は Central, 子機は Peripheral と呼称が変わる。先ほどとデバイスの意味合いは同じだが、Central が同時に接続できる Peripheral の数は仕様上無限という違いがある。仕様上無限だが、Bluetooth チップ等のデバイスに依存する。また、Bluetooth 5 からは多対多のメッシュネットワークを構築できるようになり、アドホックネットワーク利用への期待が高まっている。

通信距離はデータ転送速度で異なり，表 3 のようになっている．

表 3 BLE(最大出力が 20dBm) の場合 ^[16]

2Mbps	最大 100m
1Mbps	最大 100m
125kbps	最大 400m

3. 提案手法

本研究では、人口密度に基づくアドホックネットワークの構築方法を提案する。

まず、アドホックネットワークを用いる場面として、地震等の大規模災害による基地局の損壊や停電等によりネットワークにアクセスができない場面だと考えられる。通信インフラが機能しない状況では、基地局の停電が復旧するまでの間、生き残っている基地局にアクセスが集中することで回線が混雑し、家族や知人の安否確認ができなくなったり、救助を必要としている人の声が救急隊まで届かない。さらに、ネットワークにアクセスができないため、現在の被災状況を知ることができないなど、被災者の精神的負担が大きくなってしまう。この事態を避けるために、被災地域限定でアドホックネットワークを通信インフラが復旧するまでの間利用することで、現在の被災状況や避難場所、安否確認等が行えれば、被災者の不安を和らげることが可能になると考えられる。

しかし、先ほどのような被災状況でアドホックネットワークを構築する際、重要になってくるのがノードの密度である。なぜなら、ノードの通信範囲内にノードが存在しなければネットワークを拡大することができないからだ。その上、自然災害は予測不能であり、被災地の通信環境は地域ごとに大きく異なる。特に、人口密度が低い地域の場合、ノード数が少なく、間隔も広がるため、アドホックネットワークを構築するのが困難になる。これを解決するために、初めに各都道府県に対して今回作成したシミュレーションを実行し、本研究内での人口密度が高い、低い地域を選定する。この結果を元に、人口密度が低い地域に対して、公共物である電柱にノードを追加したときのシミュレーションを実施し、その有効性について検証する。

3.1. シミュレーション

シミュレーションで使用するノードは、消費電力が少ない Bluetooth LE の接続目安距離である 30m を最大通信距離とした。加えて、実施する範囲は 1km 四方の平面上で、その範囲内にノードをランダムで生成する。生成するノード数は、2024 年 10 月 1 日現在の各都道府県の人口密度^[17]にスマートフォンの所有率 88.6% を乗じた数とした。表 4 に各都道府県の人口密度とノード数を左から降順に示す。

表 4 各都道府県の人口密度^[17]

地名	人口密度	ノード数	地名	人口密度	ノード数	地名	人口密度	ノード数
東京都	6451	5716	広島県	320	284	大分県	171	152
大阪府	4603	4078	宮城県	309	274	新潟県	167	148
神奈川県	3817	3382	長崎県	303	268	鹿児島県	167	148
埼玉県	1930	1710	群馬県	297	263	徳島県	165	146
愛知県	1443	1278	三重県	296	262	鳥取県	151	134
千葉県	1217	1078	栃木県	294	260	長野県	147	130
福岡県	1022	905	石川県	262	232	宮崎県	133	118
沖縄県	643	570	岡山県	257	228	福島県	126	112
兵庫県	635	563	富山県	234	207	青森県	121	107
京都府	547	485	熊本県	229	203	山形県	108	96
香川県	489	433	愛媛県	225	199	島根県	96	85
茨城県	461	408	山口県	209	185	高知県	92	82
静岡県	453	401	和歌山県	186	165	秋田県	77	68
滋賀県	349	309	岐阜県	180	159	岩手県	75	66
奈良県	348	308	山梨県	177	157	北海道	64	57
佐賀県	322	286	福井県	176	156			

3.2. アルゴリズム

ここでは、埼玉県的人口密度 1930 人/km²，ノード数 1710 個を用いてアルゴリズムの説明を行う。

前提として、全てのノードが周辺にいるノードと接続するようにアドホックネットワークを構築してしまうと、経路全体の複雑化や冗長化になり、通信速度や品質が低下してしまう。この課題を解決するためには、経路を単純化する必要がある。そこで、ノードの接続条件を次のように定めた。

- ① 上流ノードが下流ノードに対して hello メッセージと自身の MAC アドレスをフラッディングする。
- ② 受信した下流ノードは reply メッセージと自身の MAC アドレスを上流ノードに返す。但し、他ノードと接続済みの下流ノードは上流ノードの hello メッセージを無視する。
- ③ 上流ノードは hello メッセージの返信数で下流ノードの数を認識する。
- ④ 下流ノード数が閾値 X より大きいなら下流ノードの中からランダムで 1 つ選択し、そうでないならランダムで 2 つ、下流ノード数が 2 以下ならそのノードと接続する。

X はノード密度の閾値である。 X を大きくすると接続ノード数が増加し、小さくすると接続ノード数が減少する。

次に、先ほどの条件をシミュレーション化した場合でより具体的な説明を行う。

(1) 初期状態

図 7 にシミュレーションの初期状態を示す。

この図において、黄色の点はノード未接続ノード、赤色の点はスタートノードおよびターゲットノードを示している。また、中心に最も近い赤色のノードをスタートノード、中心から最も遠い位置にある赤色のノードをターゲットノードとし、接続の成功を判断する指標とした。

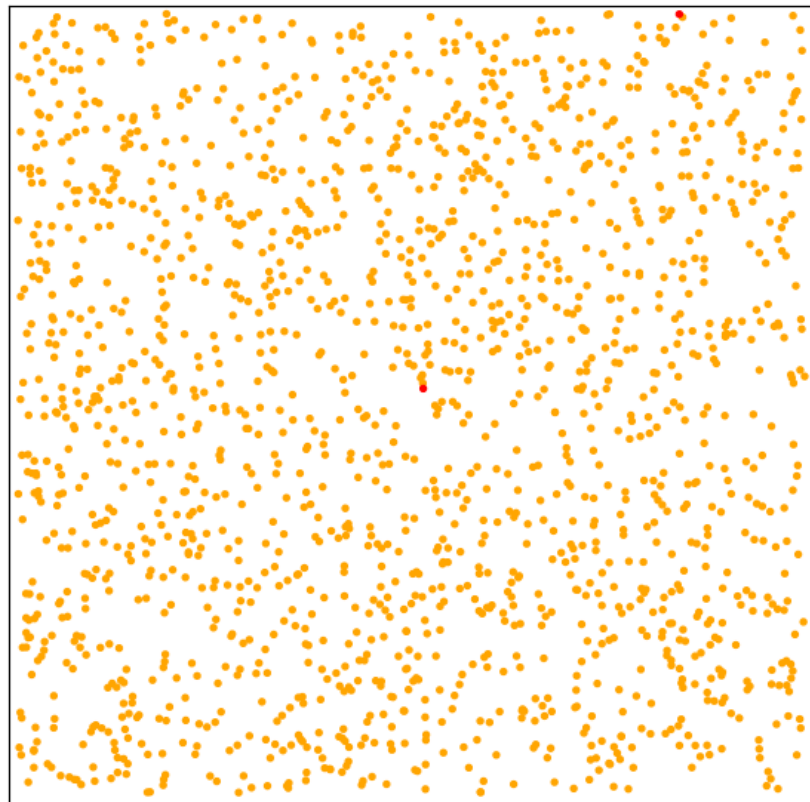


図 7 初期状態

(2) 接続可能ノードの探索

図 8 にスタートノードの接続半径を示す。

ノードの接続条件において、上流ノードはスタートノードに相当する。加えて、①のように、接続範囲内に存在するノードへ情報を送信している状態である。

シミュレーションでは、②、③の過程をこの時に同時に行っており、上流ノードは接続可能な下流ノードの数を保持している。

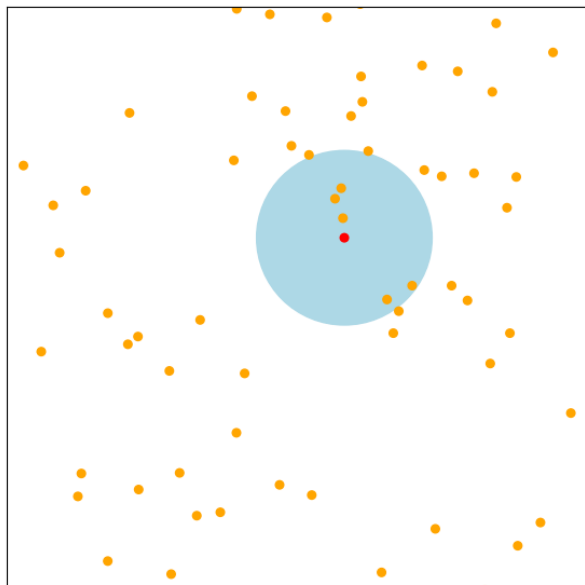


図 8 接続可能ノードの探索

(3) ノード接続

図 9 に上流ノードが下流ノードとランダムに接続した様子を示す。

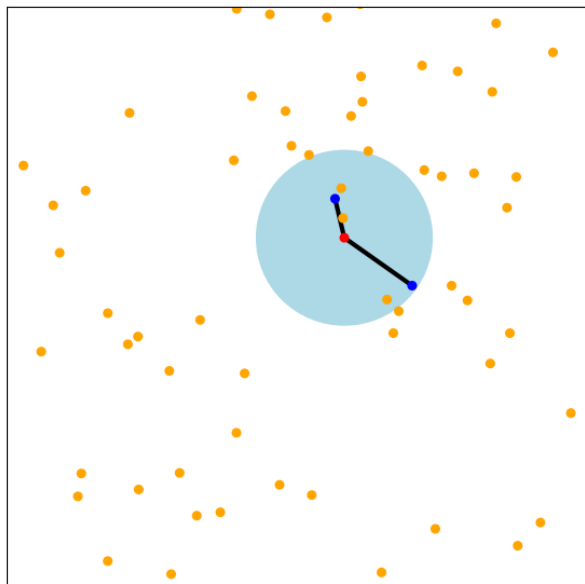


図 9 ノード接続

(4) 経路完成

図 10 にスタートノードからターゲットノードまでの経路が存在した時の様子を示す．経路完成時の通信成功割合の計算式を次に示す．

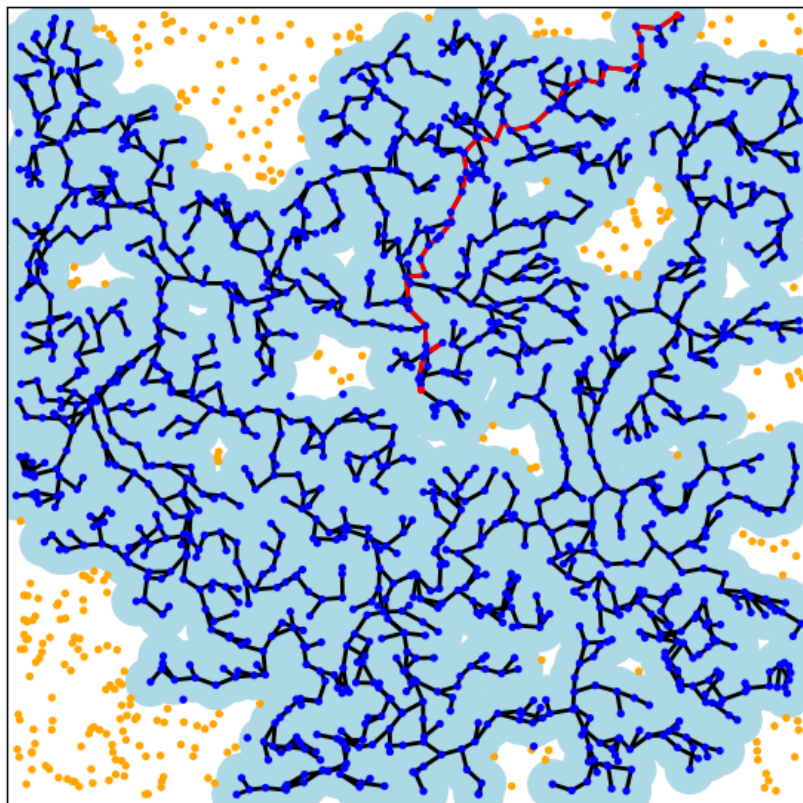


図 10 経路完成図

4. 結果

本研究内での、人口密度の高低をシミュレーションを通して定義する。3章の提案手法を元に全ての都道府県に対して閾値 $X = 5$ の条件で 10 回シミュレーションを行い、その平均を図 11 のグラフに示す。

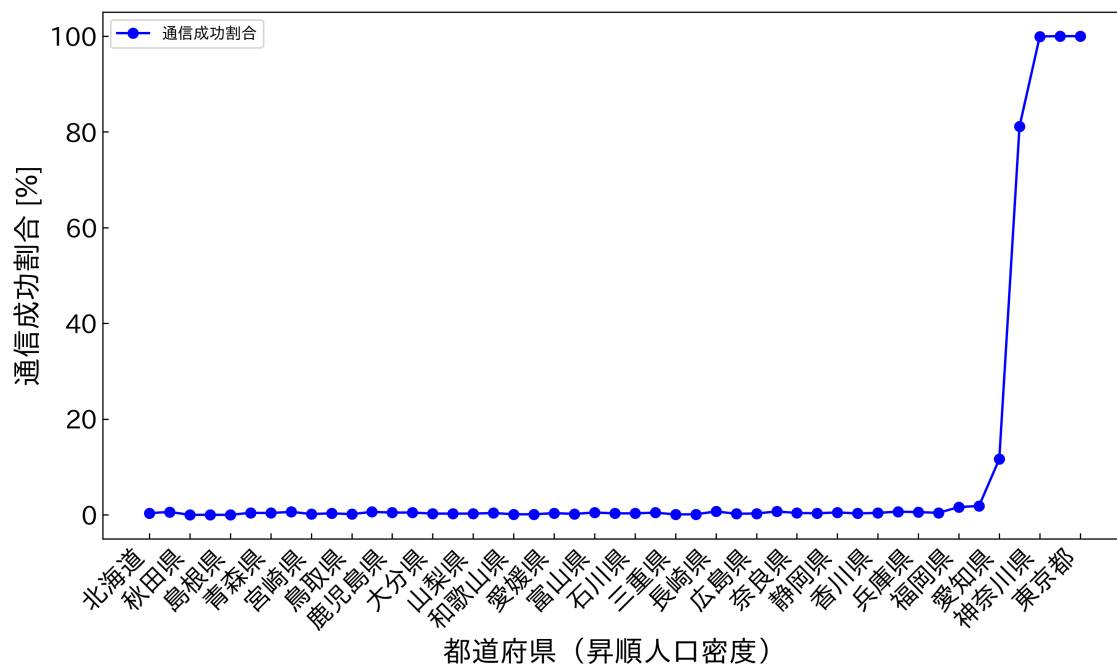


図 11 各都道府県の通信成功割合

4.1. 人口密度が高い地域の場合

・人口密度が高い地域に対して閾値 X の値を変化させ、通信成功割合が最も高い X を確認する。・おそらく、人口密度が大きくなると X の値が増加する方向にシフトすると思われる。

4.2. 人口密度が低い地域の場合

5. 考察

6. まとめ

参考文献

- [1] 間瀬憲一, 中野敬介, 仙石正和, 篠田庄司. アドホックネットワーク. 信学誌, Vol. 84, No. 2, pp. 127–134, 2001.
- [2] Samir R. Das, Charles E. Perkins, and Elizabeth M. Belding-Royer. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. RFC 3561, July 2003.
- [3] Yih-Chun Hu, Dave A. Maltz, and David B. Johnson. The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4. RFC 4728, February 2007.
- [4] Vincent D. Park and Dr. Scott M. Corson. Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA) Version 1 Functional Specification. Internet-Draft draft-ietf-manet-tora-spec-04, Internet Engineering Task Force, July 2001. Work in Progress.
- [5] Young - BaeKo, Nitin H. Vaidya. Location - aided routing (lar) in mobile ad hoc networks. *Wirel. Netw.*, Vol. 6, No. 4, p. 307–321, September 2000.
- [6] Chai Keong Toh. Associativity-based routing for ad hoc mobile networks. *Wireless Personal Communications*, Vol. 4, pp. 103–139, 1997.
- [7] Thomas H. Clausen and Philippe Jacquet. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). RFC 3626, October 2003.
- [8] Charles E. Perkins and Pravin Bhagwat. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (dsdv) for mobile computers. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, Vol. 24, No. 4, p. 234–244, October 1994.
- [9] Shree Murthy and J. J. Garcia-Luna-Aceves. An efficient routing protocol for wireless networks. *Mob. Netw. Appl.*, Vol. 1, No. 2, p. 183–197, October 1996.
- [10] Ching-Chuan Chiang, Hsiao-Kuang Wu, Winston W. Liu, and Mario Gerla. Routing in clustered multihop, mobile wireless networks with fading channel. 1997.
- [11] Kevin H. Grace. Mobile Mesh Routing Protocol. Internet-Draft draft-grace-manet-mmrip-00, Internet Engineering Task Force, September 2000. Work in Progress.
- [12] Z. HAAS. The zone routing protocol (zrp) for ad hoc networks. *IETF Internet Draft, draft-ietf-manet-zone-zrp-01.txt*, 1998.
- [13] 松井進. アドホックネットワークの実用化に向けた課題と実用化動向 (クリティカル応用のための通信技術). 日本信頼性学会誌 信頼性, Vol. 34, No. 8, pp. 532–539, 2012.
- [14] Bluetooth®. Bluetooth 技術概要. 最終アクセス日: 2025-2-11.
- [15] 勝野恭治, 相原達, 水谷晶彦, 玉川憲. Bluetooth による位置検出. 日本ソフトウェア科学会大会講演論文集, Vol. 19, pp. 4B4–4B4, 2002.
- [16] 東芝情報システム株式会社. Bluetooth とは何か? 最終アクセス日: 2025-2-11.
- [17] 都道府県市区町村. 都道府県 人口・面積・人口密度ランキング. 最終アクセス日: 2025-1-30.