

広島市立大学審査博士学位論文

Bluetooth MANET 構築技術による
平常時災害時両用システムの研究

2020 年 3 月

広島市立大学大学院

情報科学研究科 博士後期課程

情報科学専攻

南 雄也

Bluetooth MANET 構築技術による 平常時災害時両用システムの研究

南 雄也

要旨

情報通信技術は人と人のコミュニケーションには欠かせない技術であり、現在では日常から切り離すことが難しい社会基盤の一つとなっている。また、近年の情報通信技術の発展に伴い、社会基盤を構成する要素技術も従来の固定電話網からモバイルインターネットへ急速に移行している。

モバイルインターネットを軸とした社会基盤の特徴的なサービスとしてソーシャルネットワーキングサービス (SNS) が挙げられる。総務省が公表している 2018 年の通信利用動向調査結果では、13-19 歳では 75.0%、20 歳代では 78.5%、30 歳代では 74.8% と 7 割以上の若者がサービスを活用している。SNS の利用状況は年々増加しており、各世代に SNS の利用が広まっていることが確認できる。SNS の活用先として注目された出来事として、2011 年の東日本大震災が挙げられる。東日本大震災の発生時は固定電話網や移動体電話網の回線が逼迫する中で、自身の被災状況や避難場所の情報共有などに SNS が利用されたことが注目された。SNS の代表的なサービスの一つである Twitter では、地震発生 1 時間以内の東京周辺だけでも毎分 1,200 件以上の情報が投稿されており、自身の被災状況などがリアルタイムで共有されていることが報告されている。

災害発生時の安否情報や被災状況の共有に SNS の活用が有効である一方で、災害の発生状況次第では利用できない場合も存在する。2018 年の北海道胆振東部地震では、北海道全域に及ぶ大規模停電が発生し、地震発生から約 11 時間後まで停電が継続した。地震発生時の情報通信社会基盤の被害状況についてまとめた報告書では、最大 6,505 台の移動体通信に必要な基地局で停波したことが

まとめられている。停波の原因として、伝送路の被災や大規模かつ長期の停電により予備電源が枯渇したことが挙げられている。SNS の利用には移動体通信網を介したインターネットへの接続が必須であり、最寄りの基地局が停波した場合はスマートフォンが移動体通信網へ接続不可となるため、SNS を用いた安否情報や被災状況の共有が不可能となる。この場合、スマートフォンなどの携帯電話を用いた通信手段がなくなり、災害発生時に重要となる素早い安否情報や被災状況の共有ができない状況となる。

平常時及び災害時にも利用可能なネットワークとして、本研究に関連する三つの既存研究を紹介し、その課題を示す。

(1) Wi-Fi などの複数通信規格を組み合わせた MANET の構築:

東北大学では、スマートフォンに搭載されている Wi-Fi などの複数の通信規格を用いて MANET を構築する技術を開発している。2013 年には仙台市内において、スマートフォンに搭載されている Wi-Fi 通信により MANET を構築し、端末間の中継能を用いて約 2.5km 先に存在する端末まで情報を配信する実験に成功している。既存研究の課題として、構築可能なネットワーク規模は使用する通信方式の性能に依存する点が挙げられる。既存研究では、MANET を構築する通信として Wi-Fi や ZigBee など複数規格に対応しているのに対し、各通信規格の端末間接続確立は、各通信規格の標準的な接続手続きに基づいて実施される。そのため、構築可能な MANET の規模や端末間接続の可用性は、各通信規格の接続確立に要する時間や切断耐性などに大きく依存するという特徴が存在する。

(2) Bluetooth 通信を用いた大規模なアドホックネットワークの構築:

新潟大学の研究グループでは、Bluetooth 通信を用いた大規模なアドホックネットワーク (Multihop Bluetooth Network: MBNET) の構築手法を提案している。MBNET の特徴として、各無線通信端末は 2 つ以上の Bluetooth インタフェースを搭載しており、各インタフェースを接続する端末ごとに使い分けることで、Bluetooth で構築できるネットワーク規模を拡張している。

既存研究の課題として、一般的なスマートフォンなどの端末では MBNET を構築できないという点が挙げられる。スマートフォンなどの無線通信端末では 1 つの Bluetooth インタフェースのみを搭載している場合が大半を占めており、スマートフォンやタブレットなどの無線通信端末では MBNET によるアドホックネットワークの構築は困難という特徴が存在する。

(3) 基地局間通信による耐災害ネットワークの構築:

情報通信研究機構の研究グループでは、無線通信端末が Wi-Fi などの通信で接続先となる専用基地局に、基地局間直接通信や中継機能を持たせることで耐災害機能を持たせた、耐災害ネットワーク(NerveNet)の構築手法を提案している。NerveNet は、各基地局が自動的に相互接続する機能を有しており、災害発生時に一部の基地局が被災することで停波した場合でも、他の基地局を経由する別経路に自動的に切り替えることで、ネットワークの可用性を確保する分散ネットワーク技術である。既存研究の課題として、基地局の稼働には安定した電源が必要という点が挙げられる。携帯電話の基地局と同様に、NerveNet が構築されている地域一帯が停電した場合、予備電源の枯渇によりネットワークが利用不可能となる場合が考えられる。また、NerveNet の構築には専用機器が必要であり、スマートフォンのみで構築可能な MANET よりも耐災害ネットワークの構築や運用費用が高額となる点が挙げられる。

本論文では、上記の三つの課題を解決した、データ転送及び端末間接続確立の高速化を実現した MANET 構築技術の確立と、Bluetooth MANET 上で動作する平常時災害時両用システムの実現を目指す。具体的に、以下の三つの目的を達成する。

(1) 平常時災害時両用システムのシステムアーキテクチャ検討

アプリケーション層とルーティング層、デバイス層の 3 層からなる平常時災害時両用システムのアーキテクチャを提案する。アプリケーション層には、平常時モードと災害時モードの 2 つのモードを有しており、各モードで機能

するサービスを実装している。各サービスは共通のグラフィカルユーザインタフェース(GUI)を有しており、情報の生成方法、及び情報の発信や受信時の動作が統一されているという特徴を有する。そのため、平常時向けのアプリケーションを普段利用している場合、万が一の災害発生時に情報の生成、及び発信などが迅速に行えないという問題を発生させないことを意図した設計となっている。ルーティング層では、Bluetooth MANET 上でより高速に情報伝搬を可能とするデータ転送手法を実装する。デバイス層では、無線端末間の Bluetooth コネクションの高速な確立手法を実装する。実際に Android OS を搭載するスマートフォンで動作するアプリケーションを開発し、アプリケーション層の各サービス動作、及び平常時から災害時へ自動的に切り替わる仕組みを実装し、その動作を確認した。

(2) 異なる Bluetooth 規格を併用した高速コネクション確立手法

Bluetooth MANET は端末間の Bluetooth 通信のみでネットワーク構築やデータを共有する。そのため、Bluetooth MANET のデータ普及性能やデータ伝搬速度が、端末間のコネクション確立性能や構築できるネットワークの規模に強く依存している。しかし、Bluetooth 2.1+EDR で規格化された Classic Bluetooth では、周辺に存在する端末の検出プロセスとコネクション確立プロセスに存在する端末状態の制約により、隣接する端末を検出できないことや、端末間のコネクション確立ができない場合があることが示されている。そこで、隣接する端末の検出プロセスに存在する課題を解決し、電波干渉による一時的なコネクション切断が発生した場合でも、高速にコネクションを再確立することで Bluetooth MANET の高可用化を実現するための、Classic Bluetooth と Bluetooth Low Energy を併用したコネクション確立手法を提案する。提案手法の効果を確認するために、実機を用いた実験を実施した。実験の結果から従来の Classic Bluetooth のみの用いたコネクション確立手法よりも、コネクション確立に要する時間を約 75%短縮できることを確認した。また、多数の端末の移動速度や端末密度が変化する環境において、提案手法の効果を確認するためにシミュレーション実験を行い、人間が

乗り物を利用しない移動速度の範囲内でコネクション確立を行う時、提案手法は端末移動の影響を受けず、端末間で高速にコネクションを確立できることを確認できた。

(3) 端末間接続状態に適応するデータ転送手法

Bluetooth は無線 LAN に比べ電波出力が小さく、通信に周波数ホッピングを用いることで、端末密度が高い場合でも各端末の電波が互いに干渉せずに通信可能という特徴を持つ規格である。しかし、端末密度が高い場合には Bluetooth が使用している周波数帯域などが制限されることにより、電波干渉が避けられずに通信の切断が発生することが既存研究で示されている。さらに、MANET では端末の移動により端末密度が常に変化し、通信範囲内に端末が隣接または存在しない端末密度が疎な環境も発生する。そこで、無線マルチホップデータ転送と遅延・切断耐性ネットワーク (DTNs) のデータ転送を組み合わせたデータ転送手法を拡張した三つのデータ転送機能を、周辺の端末密度に応じて自律的に切り替えてデータ転送の高速化を図る手法を提案する。提案手法の効果がデータ伝搬時間に与える影響を確認するために実機とシミュレータによる評価実験を行った。実機の実験では、DTNs よりも提案手法の方が約 38% データ伝搬時間を短縮できた。また、シミュレータの実験結果よりデータ転送経路数が複数存在する場合は、Summary Vector の送信間隔を長く設定すると僅かにデータ普及率が低下するものの、ネットワーク上のオーバヘッドを削減できることや、マルチホップ待ち時間の設定によりデータ普及率を維持しつつ、オーバヘッドを削減できることを確認した。

本論文では、平常時及び災害時にも利用可能なネットワークの既存研究にある課題を挙げ、一般的なスマートフォンやタブレット端末のみで構築可能な Bluetooth MANET 上で動作する平常時災害時両用システムの実現を目指した。階層構造を有する平常時災害時両用システムのアーキテクチャ検討、デバイス層では異なる Bluetooth 規格を併用した高速コネクション確立手法の提案、ルー

ティング層では端末間接続状態に適応する高速なデータ転送手法をそれぞれ提案した。今後の研究では実用化を視野に入れた各種パラメータの最適化などの改良が挙げられる。

A Study on Dual-Purpose Normal and Disaster Situations System for Bluetooth MANET Construction Method

Yuya Minami

Abstract

Information and communications technology (ICT) is one of the important social infrastructures needed to communicate with people and inseparable from daily life. Element technologies that make up the social infrastructures have shifted rapidly from landline telephone networks to mobile internet due to the development of ICT.

Social networking service (SNS) is a representative service of the social infrastructures centered on the mobile Internet. Results of the communications usage trend survey reported by the Ministry of Internal Affairs and Communications in 2018 show that more than 70% of young people use SNS: 13-19 years old 75.0%, 20s 78.5% and 30s 74.8%. Utilization of SNS is increasing year after year and has become widespread in each generation.

SNS played a remarkable role in the 2011 Great East Japan earthquake as people used it in sending out warnings and spreading information during the disaster. While fixed and mobile communication networks were congested at the time of the disaster, SNS was utilized to share safety information and the information of evacuation sites. More than 1,200 tweets per minute were posted on Twitter, one of SNS's representative services, even in the Tokyo area within an hour of the disaster. As a result, disaster situations of citizens were quickly disseminated in real time.

While utilization of SNS is an effective method to share information at the time of the disaster, its efficiency relies on the time and location of the disaster. In the case of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake, a large-scale blackout took place in the whole area of Hokkaido, which continued until about 11 hours after the earthquake. According to the report that summarized the damage situation of the social infrastructure at the time of the earthquake, base stations were stopped for up to 6,505. The stoppage was caused by damages in the transmission line and depletion of reserved power source. Since mobile internet access via base stations is needed, it becomes impossible to share the safety information and the disaster situation utilizing SNS if the nearest base station is stopped. In this case, communication via mobile phones or smartphones will not be possible, and therefore, it becomes difficult to share speedily the safety information and the disaster situation.

I present three related studies as examples of the network that can be used during normal situations and disaster situations and identify problems associated with each of them.

(1) *MANET construction method combining with various communication standards such as Wi-Fi:*

A multiple communication standards-based MANET construction method has been proposed by a team from Tohoku University. In 2013, They conducted a demonstration experiment constructing MANET using Wi-Fi and transmitting information using only terminal-to-terminal communication to the destination terminal about 2.5 km away from a start point in Sendai city. The problem of this study is that the network scale that can be constructed depends on the performance of using the communication standards. While the method supports different communication standards such as Wi-Fi and ZigBee, the connection establishment between terminals is performed based

on the standard connection procedure of each communication standard. Therefore, the MANET scale that can be constructed and the connection availability depend greatly on the time required to establish a connection for each communication standard and the performance of the disconnection tolerance.

(2) *A large-scale ad hoc networks construction method using Bluetooth:*

A multihop Bluetooth network (MBNET), which is a Bluetooth-oriented large-scale ad hoc network construction method, has been proposed by a group from Niigata University. The feature of MBNET is that all terminals on MBNET have multi interface devices of Bluetooth and each terminal establishes the connection to adjacent terminals. The network scale expands according to the number of interface devices. The problem of this study is that MBNET cannot be constructed by general smartphones. Generally, since majority of smartphones only have a single interface device for Bluetooth, it is difficult to construct MBNET.

(3) *A disaster tolerance network construction method using base station-to-base station communication:*

A disaster-tolerance network construction method using base station to base station communication named as NerveNet has been proposed by a group from the National Institute of Information and Communications Technology. NerveNet consists of dedicated base stations to which the mobile terminals connect via Wi-Fi communication, and each dedicated base station has direct communication and relay functions between the them. Therefore, NerveNet has network availability and it can autonomously construct the network if some dedicated base stations are stopped. The problem of this study is that the dedicated base stations need power supply. If the specific area where NerveNet has been constructed is blacked out, NerveNet cannot be utilized when reserved power source is depleted. In order to construct

NerveNet, dedicated base stations are needed and the cost of network construction and operation is higher than MANET.

This thesis aims to establish a fast data forwarding method and a fast connection establishment method for Bluetooth MANET and develop a dual-purpose normal and disaster situations system operation on Bluetooth MANET by solving the above problems. This study achieves the following purposes:

(1) *Proposing the system architecture for the dual-purpose normal and disaster situations system:*

I propose the system architecture for dual-purpose normal and disaster situations system consist of three layers: an application layer, a routing layer and a device layer. The application layer has two modes, a normal mode and a disaster mode, with services operating in each mode. Each service has a common graphical user interface (GUI) and actions such as creating information and a receiving information are unified in each service. Therefore, GUI is designed so that information can still be generated and transmitted quickly in a disaster situation even when using the normal mode. The routing layer has a data forwarding function to fast disseminate information to Bluetooth MANET. The device layer has a connection establishment function to fast establish a Bluetooth connection between terminals. In order to evaluate the dual-purpose normal and disaster situations system, I implemented an application on Android OS and confirmed the operation of each service in application layer and an automatically switching method from the normal mode to the disaster mode.

(2) *A fast connection establishment method combining different Bluetooth standards:*

Since Bluetooth is a connection-oriented communication scheme, the connection establishment is needed to communicate with each other.

Therefore, the data dissemination capability or network scale that can be built deeply depends on connection establishment performance. However, since Classic Bluetooth standardized in Bluetooth 2.1+EDR has limitations in terms of terminal status during the detection process and an establishment process, problems may occur in detecting adjacent terminals and establishing connection between them. To solve these problems and to enhance the network availability, I propose a fast connection establishment method combining Classic Bluetooth and Bluetooth Low Energy. I conducted experimental evaluations using smartphones to evaluate the effectiveness of the proposed method. The results showed that the proposed method can reduce the time required for connection establishment by about 75% compared with the conventional method. I also conducted simulation experiments through a network simulator to evaluate the effectiveness of the proposed method in the environment where the moving speed and density of many terminals change. The results showed that the proposed method can quickly establish connections without being affected by movement of terminals when people move at normal speed.

(3) *A fast data forwarding method adapting connectivity among terminals:*

Bluetooth is a communication standard that can communicate with each terminal without radio interferences in environments where the terminal density is high. This is because Bluetooth has a lower transmit power than wireless LAN and adopts frequency hopping for communication. However, related studies showed that radio interference causes disconnections frequently since the channels of Bluetooth are limited in environments where the terminal density is too high. Furthermore, there are places where the terminal density is low in MANET as the terminal density always changes due to moving of terminals. I propose a fast data forwarding method adapting connectivity among terminals that enhances a data forwarding method

combining a wireless multihop data forwarding method and a data forwarding method of delay and disruption tolerance networks (DTNs), and switches the methods depending on the terminal density. I conducted experimental evaluations using smartphones to evaluate the effectiveness of the proposed method. The results showed that the proposed method can reduce the time required for data forwarding by about 38% compared with the conventional method. I also conducted simulation experiments through a network simulator to evaluate the effectiveness of the proposed method in the environment where there are multiple data forwarding paths. The results showed that while the data dissemination rate slightly decreases, the proposed method can reduce network overheads by setting a longer time interval of sending a Summary Vector. The results also showed that network overheads while maintaining the data dissemination rate are reduced by setting the waiting time for multihop data forwarding.

In this thesis, I presented the problems of related studies constructing network that can be used during normal situations and disaster situations. I proposed the dual-purpose normal and disaster situations system that can be operated on Bluetooth MANET consist of general smartphones, the fast connection establishment method and the fast data forwarding method. In our future work, I intend to conduct improvements such as optimization of various parameters to develop practicable systems and applications.

Bluetooth MANET 構築技術による平常時災害時両用システムの研究

目次

第 1 章	緒論	1
1.1	研究背景	1
1.2	関連研究	4
1.3	本研究の目的	7
1.4	本論文の構成	8
第 2 章	平常時災害時両用システム	10
2.1	はじめに	10
2.2	研究背景	12
2.2.1	アドホックネットワーク	12
2.2.2	データ伝搬方式とルーティングアルゴリズム	13
2.2.3	MANET (Mobile Ad-hoc NETWORK)	15
2.2.4	Bluetooth	15
2.2.5	Bluetooth MANET	18
2.2.6	Bluetooth MANET の課題	19
2.2.7	遅延・切断耐性ネットワーク	19
2.2.8	Epidemic Routing の適用	21
2.2.9	Epidemic Routing の課題	22
2.3	概要	22
2.4	平常時災害時両用システムの特徴	23
2.5	アプリケーション層	25
2.5.1	概要	25
2.5.2	平常時モード	25
2.5.3	災害時モード	27
2.5.4	モードの切り替え方法	29
2.6	ルーティング層	29
2.6.1	概要	29
2.6.2	受信データパケットの種類	30

2.6.3	受信データパケットの転送処理	30
2.6.4	ルーティング層のデータ転送方式	31
2.7	デバイス層	32
2.7.1	概要	32
2.7.2	デバイス層で用いる Bluetooth	33
2.7.3	Classic Bluetooth と BLE の仕様差分	34
2.7.4	Classic Bluetooth のみを用いたコネクション確立手法	34
2.8	平常時災害時両用システムの要素技術	35
2.8.1	デバイス層における端末間状態の Classic Bluetooth と BLE を併用したコネクション確立手法の提案	35
2.8.2	ルーティング層における端末間接続状態に適応するデータ転送手法の提案	36
2.9	平常時災害時両用システムの実装例	37
2.9.1	見守り機能	38
2.9.2	周辺端末検索機能	39
2.10	平常時災害時両用システムにおけるデバイス層の拡張	40
2.10.1	概要	40
2.10.2	3G・LTE 通信と Bluetooth 通信を組み合わせたデータ転送方式	40
2.10.3	3G・LTE 通信と Bluetooth 通信を組み合わせたデータ転送方式の性能評価	42
2.10.4	実験方法	42
2.10.5	実験結果と考察	43
2.11	まとめ	43
第 3 章	Classic Bluetooth と Bluetooth LE を併用した高速コネクション確立手法の提案と性能評価	45
3.1	はじめに	45
3.2	研究背景	46
3.2.1	Classic Bluetooth のコネクション確立における課題	46
3.2.2	Bluetooth Low Energy と Classic Bluetooth の違い	46
3.3	提案手法	48
3.3.1	概要	48
3.3.2	BLE と Classic を併用したコネクション確立手法	48
3.3.3	コネクション確立後のデータ転送	50
3.4	実機による評価実験	50
3.4.1	実験目的	50

3.4.2	実験方法	50
3.4.3	実験環境	51
3.4.4	実験結果	52
3.4.5	追加実験	53
3.4.6	追加実験結果	54
3.5	シミュレーションによる評価実験	55
3.5.1	実験目的	55
3.5.2	シミュレーション条件	55
3.5.3	シミュレーション結果	57
3.6	Beacon がコネクション確立に与える影響の評価	60
3.6.1	実験目的	60
3.6.2	シミュレーション環境	60
3.6.3	シミュレーション結果	61
3.7	まとめ	63
第 4 章	端末間接続状態に適応するデータ転送手法の提案と性能評価	65
4.1	はじめに	65
4.2	研究背景	65
4.2.1	Bluetooth 通信による無線マルチホップ転送	65
4.2.2	電波干渉と端末間コネクションの一時的な切断の発生	66
4.3	提案手法	67
4.3.1	概要	67
4.3.2	SV 交換を利用したデータ転送	68
4.3.3	無線マルチホップ転送の優先利用によるデータ転送	68
4.3.4	コネクション再確立時における無線マルチホップ転送の優先利用	70
4.4	実機による評価実験	72
4.4.1	実験目的	72
4.4.2	実験方法	72
4.4.3	実験環境	73
4.4.4	実験結果	73
4.4.5	追加実験	74
4.4.6	マルチホップ転送用の待ち時間がデータ伝搬時間へ与える効果	75
4.4.7	SV 送信時間間隔がデータ伝搬時間へ与える効果	77
4.5	データ転送手法のシミュレーションによる評価実験	78
4.5.1	実験目的	78

4.5.2	シミュレーション条件	78
4.5.3	シミュレーション結果	79
4.6	まとめ	81
第5章	結論	83
5.1	本論文のまとめ	83
5.2	今後の課題	86
	謝辞	87
	参考文献	88

第1章 緒論

1.1 研究背景

情報通信は人と人のコミュニケーションには欠かせない技術であり、現在では日常から切り離すことが難しい社会基盤の一つとなっている。また、近年の情報通信技術の発展に伴い、社会基盤を構成する要素技術も大きく変化している。従来は固定電話網を社会基盤の軸として整備が進められていたが、2000年代以降にはブロードバンドや移動体通信網への急速な移行、2010年代のスマートフォン登場以降はモバイルインターネットを社会基盤の軸とした整備が進められている。総務省が公表している情報通信白書 [1] では、少子高齢化が急速に進む現代社会において課題となる国内需要の減少による経済規模の縮小や労働力の不足を補い、限られた労働力でより多くの付加価値を生み出す仕組みとして、第5世代移動通信システムの活用を挙げるなど情報通信技術の重要性が報告されている。

モバイルインターネットを軸とした社会基盤の特徴的なサービスとしてソーシャルネットワークワーキングサービス (SNS) が挙げられる。総務省が毎年実施している通信利用動向調査 [2] では、SNS が20歳代を中心に全ての世代で活用されていることが報告されている。表 1.1 に過去6年分の各世代における SNS の利用状況を示す。2018年の調査結果より、13-19歳では75.0%、20歳代では78.5%、30歳代では74.8%と7割以上の若者がサービスを活用している。SNS の利用状況は年々増加しており、各世代に SNS の利用が広まっていることが確認できる。SNS の活用先として注目された出来事として、2011年の東日本大震災が挙げられる。吉次氏 [3] は震災発生の前後において、SNS の代表的なサービスの一つである Twitter がどの様に活用されたかを、投稿数や特定単語の投稿数をもとに分析している。その結果として、Twitter 上では地震発生1時間以内の東京周辺だけでも毎分1,200件以上の情報が投稿されており、自身の被災状況などがリアルタイムで共有されていることが確認されている。また、災害発生時には電話回線の逼迫に起因して、電話が

表 1.1: SNS の世代別利用状況

	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
回答者数 (人)	29,698	27,998	25,580	32,307	28,373	28,875
6-12 歳 (%)	15.9	19.7	18.4	16.7	22.4	23.2
13-19 歳 (%)	57.2	63.7	64.6	67.3	68.4	75.0
20-29 歳 (%)	65.5	71.4	72.1	76.6	74.4	78.5
30-39 歳 (%)	58.9	62.6	65.0	70.5	72.4	74.8
40-49 歳 (%)	43.5	51.2	55.0	59.0	62.6	70.6
50-59 歳 (%)	29.8	36.5	40.6	45.4	50.7	59.8
60-69 歳 (%)	14.9	19.0	22.5	22.6	30.7	38.6
70-79 歳 (%)	19.3	16.5	17.2	9.90	16.5	23.6
80 歳以上 (%)	16.8	19.9	21.7	12.0	21.1	16.9

繋がらないという事象が多数発生するが、インターネット回線を利用する SNS などは情報の配信や受信が可能な場合があり、災害発生時の安否情報や被災状況の共有に有効であると述べられている。

近年では、震災の他にも集中豪雨などに起因した土砂災害など様々な災害が全国各地で発生している。広島県では、2014 年 8 月 20 日に広島市北部の住宅地を中心として大規模な土砂災害が発生し、多数の犠牲者がでた局地災害となった [4]。土砂災害による被害を最小限に抑えるためには、降雨情報や土砂災害の予兆に関する情報を地域住民へ速やかにかつ広範囲に伝え、迅速な避難を促すことが極めて重要である。また、万が一土砂災害が発生した場合でも、素早い被災状況の把握と安否情報の共有により、被災者の救助活動を行うことが重要である。これまでの土砂災害への対策としてはサイレン設備及び、防災行政無線屋外受信機による吹鳴や、行政機関が携帯電話事業者の緊急速報メール配信サービスを利用した注意喚起などの取組みが行われている [5]。しかし、文献 [5] によると、広島市での土砂災害発生時にはサイレン設備及び、防災行政無線屋外受信機による吹鳴が行われなかった地域が存在することが報告されている。また、携帯電話事業者の緊急速報メール配信サービスは行政区域内の携帯電話基地局から電波の届く端末すべてに一斉メールを送信する為、その利用は行政の大部分に関わる広域的な災害で、大多数の住民への影響が避けられない場合のみに制限されていた。そのため、広島市での土砂災害発生時には緊急速報メールの配信は行われず、土砂災害発生地域の住民の多くが、その危険性を認識できない状況下に置かれていたことが後の報告にまとめられている。

災害発生時の安否情報や被災状況の共有に SNS の活用が有効である一方で、災害の発生状況次第では利用できない場合も存在する。2018 年 9 月 6 日に北海道胆振東部で発生した地震では、北海道全域に及ぶ大規模停電が発生し、地震発生から約 11 時間後まで停

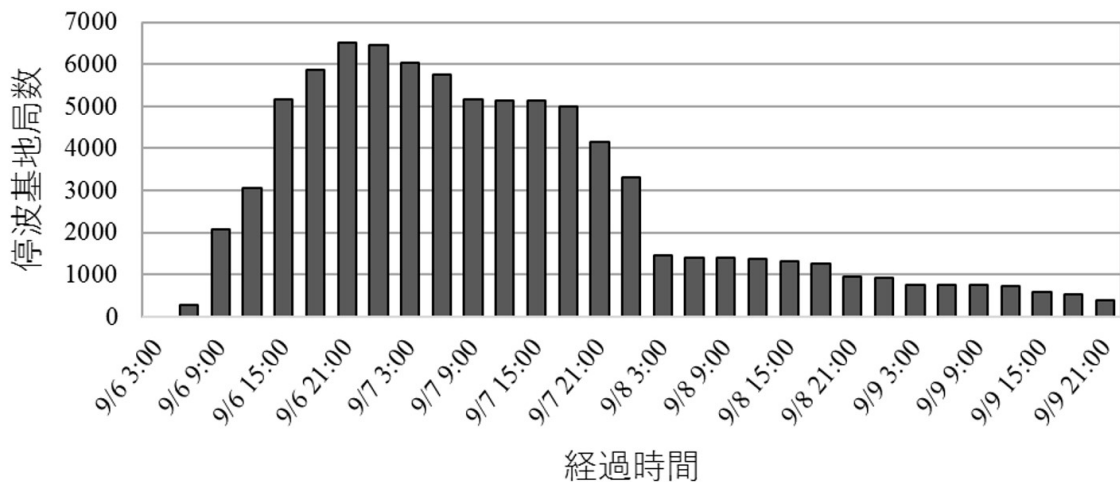


図 1.1: 停波した基地局数

電が継続した。入江氏ら [6] は地震発生時の情報通信社会基盤の被害状況についてまとめており、移動体通信に必要な基地局については伝送路の被災や予備電源の枯渇により震源付近を中心として最大 6,505 台で停波したことが述べられている。図 1.1 は北海道総合通信局が公表している情報 [7] をもとに、震災発生時における移動体通信事業者の主要 3 社で停波した基地局数の推移を示している。地震発生から約 18 時間後に最大 6,505 台の基地局が停波しており、地震発生から約 48 時間後でも 1,455 台の基地局が停波していることが確認できる。SNS の利用には移動体通信網を介したインターネットへの接続が必須であり、最寄の基地局が停波した場合はスマートフォンが移動体通信網へ接続不可となるため、SNS を用いた安否情報や被災状況の共有が不可能となる。この場合、スマートフォンなどの携帯電話を用いた通信手段がなくなり、災害発生時に重要となる素早い安否情報や被災状況の共有ができない状況となる。

そこで、平常時や災害時を問わずに様々な情報の配信と共有可能な情報通信システムの開発を目指し、スマートフォンなどの移動体無線通信端末のみを用いてネットワークを構築するモバイルアドホックネットワーク (MANET) で動作する平常時災害時両用システムの開発を検討した。平常時災害時両用システムを実現するにあたり、次の 3 つのことに取り組んだ。

- (1) MANET 上で動作する平常時災害時両用システムのアーキテクチャ設計を行い、システム動作の確認を目的にスマートフォンの実機に実装して評価を実施した。
- (2) 大規模な MANET の構築とネットワークの高可用性実現を目的として、異なる Bluetooth の通信規格である Classic Bluetooth と Bluetooth Low Energy (Bluetooth LE) [8] を併用した、Bluetooth の高速コネクション確立手法の提案し、スマートフォ

ンの実機とネットワークシミュレータを用いた評価実験を通して、その性能を評価した。

- (3) 端末が移動することで発生する端末間接続状態の頻繁な変化や、Bluetooth や同周波数を利用する他無線通信規格との電波環境に起因する一時的な通信断に適応するデータ転送方式を提案し、スマートフォンの実機とネットワークシミュレータを用いた評価実験を通して、その性能を評価した。

1.2 関連研究

平常時及び災害時にも利用可能なネットワークとして、無線通信端末の直接通信を用いたアドホックネットワークや基地局間の直接通信を用いたメッシュネットワークの構築が研究されている。アドホックネットワークや MANET は無線通信端末の直接通信によりネットワークを構築するもので、基地局などの通信インフラストラクチャを必要としないため、平常時や災害時の両方において利用可能なネットワークである。一方、基地局間の直接通信を用いたメッシュネットワークは、スマートフォンなどの無線通信端末の接続先となる基地局に直接通信機能と中継機能を持たせ、一部の基地局が被災した場合でも他基地局を経由して情報配信や共有を実現する技術である。本章では、スマートフォンなどの無線通信端末のみを用いてアドホックネットワークを構築する既存研究、及びスマートフォンの接続先となる基地局において、基地局間通信機能を持たせることで耐災害性能を持たせた既存研究を紹介する。

Wi-Fi などの複数通信規格を組合わせた MANET の構築

東北大学の西山氏らは [9]、スマートフォンに搭載されている Wi-Fi などの複数の通信規格を用いて MANET を構築する技術を開発している。2013 年には仙台市内において、スマートフォンに搭載されている Wi-Fi 通信により MANET を構築し、端末間の中継機能を用いて約 2.5km 先に存在する端末まで情報を配信する実験に成功している。また、本技術を応用した商用サービスとして、高知市津波 SOS アプリ [10] が高知市の防災対策として運用されている。図 1.2 に高知市津波 SOS アプリの画面表示例を示す。本アプリケーションは災害発生時の SOS メッセージ配信機能を有しており、要救助者人数や任意のメッセージを登録することや、他端末への配信が可能となっている。災害発生時以外の機能として、津波時発生時の避難先として指定されている場所の表示が可能であり、日頃の防災意識を高める機能が搭載されている。本研究の特徴として、MANET を構築す



図 1.2: 高知市津波 SOS アプリの画面表示例

る通信として Wi-Fi や ZigBee など複数規格に対応しているのに対し、各通信規格の端末間コネクション確立は、各通信規格の標準的な接続手続きに基づいて実施される。そのため、構築可能な MANET の規模や端末間コネクションの可用性は、各通信規格のコネクション確立に要する時間や切断耐性などに大きく依存するという特徴が存在する。

Bluetooth 通信を用いた大規模なアドホックネットワークの構築

Bluetooth を用いたアドホックネットワークの構築に関する先行研究例として、新潟大学の間瀬氏らは [11] Bluetooth 通信を用いた大規模なアドホックネットワーク (Multihop Bluetooth Network: MBNET) の構築手法を提案している。MBNET の特徴として、各無線通信端末は 2 つ以上の Bluetooth インタフェースを搭載しており、各インタフェースを接続する端末ごとに使い分けることで、Bluetooth で構築できるネットワーク規模を拡張している。Bluetooth はマスター-スレーブ方式を採用した通信規格であり、1 台のマスター端末に 7 台のスレーブ端末を接続したピコネットを構築できる。また、各ピコネットのマスター端末が他ピコネットのスレーブ端末となることでスキャッタネットを構築することも可能である。しかし、MBNET ではすべての無線通信端末が 2 つ以上の Bluetooth イ

インタフェースを搭載しているため、ピコネットやスツキータネットなどのネットワーク構築方式に存在する制約を受けることなくアドホックネットワークが構築可能という特徴がある。例えば、ピコネットやスツキータネットでは、各端末は1つのピコネットにおいてのみマスタ端末の役割を持つことができるのに対し、MBNET では無線通信端末が搭載している Bluetooth インタフェースの数に応じて、複数のピコネットのマスタ端末として振る舞うことが可能となる。一方、スマートフォンなどの無線通信端末では1つの Bluetooth インタフェースのみを搭載している場合が大半を占めており、スマートフォンやタブレットなどの無線通信端末では MBNET によるアドホックネットワークの構築は困難という特徴が存在する。

基地局間通信による耐災害ネットワークの構築

情報通信研究機構の井上氏らは [12]、無線通信端末が Wi-Fi などの通信で接続先となる基地局に、基地局間直接通信や中継機能を持たせることで耐災害機能を持たせた、耐災害ネットワーク (NerveNet) の構築手法を提案している。NerveNet は、各基地局が自動的に相互接続する機能を有しており、災害発生時に一部の基地局が被災することで停波した場合でも、他の基地局を経由する別経路に自動的に切り替えることで、ネットワークの可用性を確保する分散ネットワーク技術である。NerveNet の構築には専用の基地局が必要であり、スマートフォンやタブレットなどの無線通信端末は、Wi-Fi などの通信規格により基地局へ接続することで互いに通信可能となる。2015 年からは和歌山県西牟婁郡白浜町に NerveNet を構築する実証実験を開始しており、平常時には観光客向けの Free Wi-Fi スポットの提供に利用され、災害時には避難所情報などの情報を提供や、ユーザが発信する情報の配信や共有を実現するネットワークとして運用されている。しかし、NerveNet の課題として、基地局の稼働には安定した電源が必要という点が挙げられる。携帯電話の基地局と同様に、NerveNet が構築されている地域一帯が停電した場合、予備電源の枯渇によりネットワークが利用不可能となる場合が考えられる。携帯電話の基地局と異なり、伝送路の被災により利用不可能となる危険性は少ないものの、予備電源の枯渇に対する対策の必要性は携帯電話の基地局と同等であり、MANET などのアドホックネットワーク構築よりも耐災害ネットワークの構築や運用費用が高額となる特徴が挙げられる。

1.3 本研究の目的

スマートフォンやタブレット端末のような移動可能な無線通信端末のみで構築される MANET [13] [14] [15] は、基地局などの通信インフラストラクチャを必要とせず、端末間の通信のみで構築されるネットワークである。ネットワーク上の各端末が無線通信機能、中継機能を有しており、直接通信が不可能な離れた端末とも途中の端末を経由することで通信が可能となり、ネットワーク上の端末にデータを伝搬させることが出来る。そのため、災害時などにおいて基地局を使用できない環境が発生した場合に、通信を用いてデータの伝搬や共有を行う手段の一つとして研究開発が進められている [16]。また、平常時においても MANET を用いて情報配信や共有を実現するアプリケーションも開発されている [17] [18]。我々は、Bluetooth 通信をもちいて構築される MANET (Bluetooth MANET) 上で端末間の通信により、平常時や災害時を問わずに隣接する端末間で情報共有可能な平常時災害時両用システムを開発した [19] [20]。平常時災害時両用システムは平常時モードと災害時モードの 2 つのモードを有しており、各モードで機能するサービスを実装している。平常時用サービスとして、特定のエリア内で口コミ情報を MANET 上で伝搬・共有する機能を実装し、災害時用サービスとして安否情報を MANET 上での伝搬と共有を行うシステムを構築した。また、各モードのグラフィカル・ユーザ・インタフェース (GUI) を共通化し、災害発生時には自動的に災害時モードへ切り替える仕組みを実装することにより平常時と災害時の両用の実現を目指している。

現在、多くのスマートフォンなどの無線通信端末には、周辺機器との接続や通信を行うために Bluetooth [21] が搭載されている。Bluetooth の通信機器は低消費電力かつ低コストで長期利用が可能のため、端末間通信や路車間通信を含む様々な分野への応用が検討されている [22] [23]。特に、多くが電池駆動の端末で構築される MANET において、長時間ネットワークを構築するためには低消費電力で通信可能であることは重要であり、通信手段として Bluetooth を用いることは有効であると考えられる。Bluetooth 通信はコネクション指向の通信であり、端末間で通信するためには端末間のコネクション確立が必要である。Bluetooth MANET は端末間の Bluetooth 通信のみでネットワーク構築やデータを共有する。また、平常時災害時両用システムなどの Bluetooth MANET 上で動作するアプリケーションは、基地局などの通信インフラストラクチャを用いずに情報配信・共有を端末間の Bluetooth 通信のみで実施している。そのため、Bluetooth MANET のデータ普及性能やデータ伝搬速度が、端末間のコネクション確立性能や構築できるネットワークの規模に強く依存している。しかし、文献 [24] によると、文献 [21] で規格化された Bluetooth (Classic Bluetooth) では、周辺に存在する端末の検出プロセスとコネクション確立プロセスに存在する端末状態の制約により、隣接する端末を検出できないこ

とや、端末間の接続確立ができない場合があることが示されている。そこで我々は、隣接する端末の検出プロセスに存在する課題を解決し、電波干渉による一時的な接続切断が発生した場合でも、高速に接続を再確立することで Bluetooth MANET の高可用性を実現するための、Classic Bluetooth と Bluetooth LE を併用した接続確立手法を提案する。

Bluetooth は無線 LAN に比べ電波出力が小さく、通信に周波数ホッピングを用いることで、端末密度が高い場合でも各端末の電波が互いに干渉せずに通信可能という特徴を持つ規格である。しかし、文献 [25] や文献 [26] によると、端末密度が高い場合には Bluetooth が使用している周波数帯域などが制限されることにより、電波干渉が避けられずに通信の切断が発生することが示されている。さらに、MANET では端末の移動により端末密度が常に変化し、通信範囲内に端末が隣接または存在しない端末密度が疎な環境も発生する。また、接続確立済みの端末が電波範囲外に移動することに起因する通信の切断や、端末間の障害物により一時的に通信が不安定となる事象も発生する。そこで我々は、通信の切断耐性をもつ遅延・切断耐性ネットワーク (DTN) [27] のデータ転送手法を Bluetooth MANET に組み込み、端末密度の変化に応じて無線マルチホップデータ転送と DTN によるデータ転送を自律的に切り替える手法を提案している [28]。本論文では文献 [28] の手法をもとに、端末密度の頻繁な変化により通信の切断頻度が高くなる環境でも、その影響を最小化することで Bluetooth MANET のデータ伝搬時間を短縮するデータ転送手法について提案する。

本研究では、平常時災害時両用システムの接続確立手法、及びデータ転送手法を Android 端末上に実装し、端末間接続の確立に要する時間や、Bluetooth MANET のデータ伝搬時間に各データ転送手法が及ぼす影響について実機と計算機シミュレータを用いた評価実験により確認する。

1.4 本論文の構成

本論文の構成は次の通りである。2 章では、平常時災害時両用システムのシステムアーキテクチャについて検討した。平常時と災害時の両用を目的として Bluetooth MANET の構築に関する検討、及び隣接する端末が存在しない場合を想定して遅延・切断耐性ネットワークを併用する検討を実施した。また、Bluetooth MANET と LTE 通信を併用したシステムの検討、及び実機を用いた評価実験を実施してその性能や課題を評価した。3 章では、Bluetooth MANET のネットワーク規模、及び高可用性を実現することを目的に Classic Bluetooth と Bluetooth LE を併用した接続確立手法について検討した。

実機及び計算機シミュレータを用いた評価実験を実施し，提案するコネクション確立手法の性能を評価した．4章では，Bluetooth MANET へのデータ伝搬時間の短縮やデータ転送時のオーバーヘッド削減を目的として，Bluetooth MANET 向けのデータ転送手法について検討した．実機及び計算機シミュレータを用いた評価実験を実施し，提案するデータ転送手法の性能を評価した．最後に，5章では，本研究を総括し，まとめと今後の課題点を述べる．以上，5章で構成される．

第2章 平常時災害時両用システム

2.1 はじめに

災害時における情報伝搬技術の一つとして、アシュアランスネットワーク設計原理 [29] が提案されている。アシュアランスネットワーク設計原理では、故障も動的な変動と捉え、ネットワーク要素がそれに適応して自律的にネットワーク構造を再構成するので、想定外の故障に対して強いという特長がある。また、災害の発生時においても、一部端末との通信断が発生した場合においても、ネットワークの動的な変動と捉えることで平常時と同等の性能を維持することを目標とした設計原理のネットワークであるため、本ネットワーク上で稼動するサービスアプリケーションは、平常時や災害時の両方での利用を想定したシステム設計が必要となる。ネットワーク上では平常時か災害時を意識せずに情報伝搬が可能である一方で、システムのアプリケーションとしても平常時か災害時を意識せずに情報の生成及び発信が可能である必要がある。平常時と災害時に両用可能なシステムの重要性について、文献 [30] では兵庫県で発生した震災における災害復旧支援活動の経験をもとに、システム運用上の観点から災害時に有用なシステム要件がリスク対応型地域空間情報システム RARMIS (Risk Adaptive Regional Management Information System) の開発を通して報告されている。システム運用上の観点から災害時に有用なシステム要件として、以下の点が挙げられている。

- 平常時にも使用していること
- 専門的知識がなくても使用できること

また、上のシステム要件に加えて、災害時と平常時の連続性が確保されていることが、平常時災害時両用システムを開発する上で重要な要件となっていることが示されている。これは、被災者がアプリケーションに慣れていない場合、災害時にそれを活用することができないからである。そのため、平常時災害時両用システム上で動作するアプリケーショ

ンは、平常時に利用していたアプリケーションを災害時にも利用できるように円滑に移行可能な仕組みを構築しなければならない。

平常時災害時両用システムでは、MANET を構築する通信手段として Bluetooth を採用している。現在、スマートフォンなどの無線通信端末には、周辺機器との接続や通信を行うために Bluetooth が標準搭載されている。Bluetooth は最大で 100m の通信範囲を有する一方で、Bluetooth の通信機器は低消費電力かつ低コストで長期利用が可能な特徴を有している。特に、多くが電池駆動の端末で構築される MANET において、長時間ネットワークを構築するためには低消費電力で通信可能であることは重要であり、通信手段として Bluetooth を用いることは有効であると考えられる。また、1.2 で示した関連研究とは異なり、専用基地局などのインフラストラクチャの設置が不要かつ、スマートフォンなどの汎用的な無線通信端末のみで構築可能な MANET で動作する平常時災害時両用システムを開発することで、ユーザの端末に平常時災害時両用システムを導入しやすくし、実際の災害発生時に利用されるシステムを目指している。平常時や災害時を問わず利用可能なシステムの実現を目的に、平常時災害時両用システムの平常時アプリケーションとして情報伝搬・収集システムを開発し、災害時アプリケーションとして安否情報および問合せ情報などの短いメッセージを Bluetooth MANET で伝搬させるシステムを開発した。このような災害時アプリケーションの機能を有する平常時アプリケーションの実現可能性を確認するため、菓子博覧会において菓子の展示評価情報を口コミ情報として伝搬するための蓄積伝送機能を持つ MANET に基づいた展示評価情報伝搬・収集システムを開発した。さらに、2013 年 4 月 19 日～5 月 12 日に広島市で開催された菓子博覧会において実証実験を実施した。

本章では、アシュアランスネットワーク設計原理の平常時災害時両用システムへの応用により、災害時においてネットワークを自律的に再構成し、平常時に利用できるサービスアプリケーションを災害時にも継続的に提供することを実現するため、平常時災害時両用システムのシステムアーキテクチャを提案する。また、平常時災害時両用システムのシステムアーキテクチャを搭載したアプリケーションを実機端末上に実装し、その動作を確認する。さらに、平常時や災害時の携帯電話基地局に被害がなく、移動体通信網が利用可能な場合を想定して、Bluetooth MANET と移動体通信網を併用したデータ伝搬方法を検討し、実機を用いた実験を通してその性能を確認する。

2.2 研究背景

2.2.1 アドホックネットワーク

アドホックネットワーク [31] とは、ルーティング機能を持つ端末の集合によって構成される自律分散ネットワークである。アクセスポイントや基地局を介さず、通信機能を持った端末同士が直接通信するため、柔軟にネットワークの構成が変更できる。

端末の移動を伴わない固定ネットワークでは、端末は常に同じ場所に設置されており、各端末間を有線ネットワークで接続している。そのため、ネットワークトポロジが変化することは少ない。また、ユーザが固定ネットワークを使用する場合、ユーザが通信機器を設置している場所に移動して使用する。アドホックネットワークでは、端末自身がルーティング機能を持っているため、ユーザが端末を自由に移動させた場合でも、端末が自律的にネットワークを構成するため通信が可能である。端末を自由に移動することにより、ネットワークトポロジが頻繁に変化する。

アドホックネットワークにおいて、端末間の通信には基地局を介さない無線ネットワークが使われる。無線ネットワークを使用することにより、有線ネットワークに依存したネットワークや基地局を介する無線ネットワークでは通信が困難な状況においても通信が可能となる。有線ネットワークに依存したネットワークや基地局を介する無線ネットワークでは通信が困難な状況の例として、災害発生時などが考えられる。有線ネットワークや基地局を介する無線ネットワークなどでは、近距離に存在する端末と通信を行う場合においても、既存の有線ネットワークや基地局を介する必要がある。そのため、災害により既存の有線ネットワークや基地局などのインフラストラクチャがダメージを受け、使用不可能な状況の時には近距離に存在する端末とも通信ができない。しかし、アドホックネットワークを用いると、周囲に通信可能な端末が存在すれば通信可能である。また、各端末が通信データを中継することで、通信可能範囲外に存在する端末へのデータ転送も可能である。上記の理由からアドホックネットワークは、固定のインフラストラクチャを使用しないで通信を行うため、これからのネットワーク社会において重要な技術になると予想できる。

2.2.2 データ伝搬方式とルーティングアルゴリズム

フラッディング

データパケットをネットワーク全体に伝搬させる時のパケットの伝搬方式の1つとしてフラッディング [32] がある。この方式では、パケットを受信した端末が隣接する端末へ、受信したパケットをブロードキャストすることで、ネットワーク全体へデータ伝搬させることができる。ブロードキャストは隣接するすべての端末へデータ転送を行うため、後述するルーティングアルゴリズムによる経路構築を行う必要がない。そのため、簡単にデータ伝搬が可能であるが、パケットの重複を考えずブロードキャストを行うため、ネットワーク内のトラヒックは増加し、特にネットワークの端末密度が高い場合には無駄なトラヒックが頻繁に発生するという問題がある。平常時災害時両用システムはネットワーク内へ素早くデータを伝搬させて、情報の共有を行うことが最優先なため、データパケットの伝搬にはフラッディングを用いている。

ルーティングアルゴリズム

アドホックネットワークでは、前述したように中継端末を介することで、他端末と通信できる。このとき、中継端末で転送されるデータなどを、どの端末を経由すれば効率良く送受信できるかを考える必要がある。このパケットを転送する経路を決定する手法をルーティングアルゴリズムまたは経路制御手法と呼ぶ。ルーティングアルゴリズムは、経路の生成と維持、削除のために用いられる。アドホックネットワークにおいて、ルーティングは極めて重要な技術であり、ルーティングによって経路構築を行うことで通信が可能となる。ルーティングアルゴリズムには、大きく分けてプロアクティブ型、リアクティブ型、ハイブリッド型の三つの方式が存在する。

プロアクティブ型

- 特徴
 - 各端末が宛先端末までの経路を記録したルーティングテーブルを常に保有する。
 - 各端末は定期的に制御メッセージを隣接する端末と交換することで、ルーティングテーブルの更新を行う。
- 利点
 - ルーティングテーブルを常に保有しているため、経路情報を有する端末宛データパケットの送信要求に素早く対応可能である。

- 欠点

- ネットワーク内の端末数が増加するに従って、ルーティングテーブルのサイズが大きくなる。
- 端末の移動によりネットワークトポロジの変化が多い場合、ルーティングテーブルの更新が頻発する。
- ルーティングテーブルの更新に用いる、制御メッセージを隣接端末と定期的に変換するため、ネットワーク内のオーバーヘッドが増加する。

リアクティブ型

- 特徴

- データパケットの送信要求が発生するたびに、送信元端末と宛先端末間の中継端末を利用して経路を構築する。

- 利点

- データパケットの送信要求が発生するまでルーティングを行わないため、送信要求がない場合は経路構築のための制御メッセージ交換が必要ない。
- 端末の移動によりネットワークトポロジの変化する場合でも、データパケットの送信要求が発生するまでルーティングを行わないため、ネットワーク内のオーバーヘッドの増加が少ない。

- 欠点

- データパケットの送信要求が発生してから宛先端末までの経路を発見するため、データパケットの送信までに時間がかかる。

ハイブリッド型

- 特徴

- プロアクティブ型とリアクティブ型の 2 つの特徴を持つ。
- 宛先端末が近くに存在する場合は、プロアクティブ型でデータパケットを送信する。
- 宛先端末が近くに存在しない場合は、リアクティブ型でデータパケットを送信する。

- 利点

- 2つのルーティングアルゴリズム長所を活かし、短所を補いあったものである。
- 欠点
 - プロアクティブ型とリアクティブ型を切り替えつつルーティングを行うため、2つを切り替えるためのオーバーヘッドにより処理時間増加が起こる。

2.2.3 MANET (Mobile Ad-hoc NETwork)

MANET は、移動性を有する端末から構成されるアドホックネットワークのことである。各端末は移動するため、それぞれの端末の通信可能な範囲に存在する端末が頻繁に変化する特徴がある。したがって、MANET 環境では端末の新規追加、離脱、移動を想定する必要がある。

MANET では各端末がルータの役割を担い、直接通信が不可能な端末とは無線マルチホップにより通信を実現することができる。しかし、ネットワークトポロジが頻繁に変化するため、必要に応じて隣接端末の存在を把握したうえで、経路を構成する必要がある。

2.2.4 Bluetooth

Bluetooth は電波の最大出力値により Class1 から Class3 に仕様で分類されている。最も出力が高い Class1 の最大出力値は 100mW であり、通信可能範囲に換算すると約 100m である。また、Bluetooth の仕様では通信の特徴により Classic Bluetooth [21] と、Bluetooth Low Energy (BLE) [8] の 2 種類に分類できる。Classic Bluetooth は文献 [21] により規格化された通信方式であり、BLE と比べ高速通信が可能な通信規格である。一方、BLE は文献 [8] より規格化された通信方式であり、Classic Bluetooth に比べ省電力化された通信規格である。

Classic Bluetooth

ペアリング処理

Classic Bluetooth では、接続および通信を行う際、事前に通信する端末間で相互にペアリングと呼ばれる処理を行う必要がある。ペアリングは、双方に同一の PIN コードを入力して認証し、双方が接続したい相手であることを確認する。この手順を行うことで通信のセキュリティを向上させている。また、ペアリングはある端末について一度行え

ば、以降はペアリング済み端末として端末に登録される。したがって、ユーザの操作によりペアリングを解除しない限り、改めてペアリングを行う必要はない。一方で、ペアリングの PIN コード入力および認証はユーザの操作が必要なため、端末が移動し、通信する端末が常に変化する MANET では、手動でのペアリングが手間のかかる作業となってしまう。そのため、開発しているアプリケーションでは、ペアリングの PIN コード入力および認証部分が自動で行われる実装とした。なお、現在配布されている Android の API (Application Programming Interface) では接続を行う直前に暗黙的、もしくは明示的にペアリングを行うこともできる (Android OS 2.0 以降)。

Classic Bluetooth のコネクション確立処理

Classic Bluetooth はマスター-スレーブ方式の通信であり、端末間でコネクションを確立した際に各端末の役割が決定する。Classic Bluetooth はコネクション指向の通信規格であり、端末間でコネクションを確立する処理には、次に示す二つのプロセスが存在する。

- (1) 検出プロセス：通信可能範囲内に存在する隣接端末を検出するプロセス
- (2) 確立プロセス：検出した端末との間でコネクションを確立するプロセス

Classic Bluetooth の検出プロセスでは Inquiry と Inquiry Scan の二つの端末状態が存在し、全ての端末はいずれか一方の状態となる。Inquiry は隣接する端末の存在を確認するために、GIAC (Generic Inquiry Access Code) を含むパケットを送信する状態である。Inquiry Scan は周辺に存在する端末が送信している GIAC を含むパケットを受信する状態である。また、Classic Bluetooth の確立プロセスでは Page と Page Scan の二つの状態が存在する。Page は検出プロセスの際に Inquiry の動作をした端末が、隣接する端末の検出に成功した場合にコネクション確立手続きを行う状態である。Page Scan は検出プロセスの際に Inquiry Scan の動作をした端末が、GIAC を含むパケットへの応答を行った場合に、Page の状態である端末からのコネクション確立要求の受信を待ち、コネクション確立手続きを行う状態である。Classic Bluetooth では端末間のコネクション確立時に、Inquiry の状態である端末がマスターの役割となり、Inquiry Scan の状態である端末がスレーブの役割となる。

Classic Bluetooth を用いて端末が相互に通信を行うために必要なコネクション確立手順を図 4.1 に示す。Inquiry の状態である端末 A は検出パケットを送信する。Inquiry Scan の状態である端末 B は、端末 A が送信している検出パケットを受信し、応答パケットを端末 A に対して送信する。端末 A は端末 B から応答パケットを受信した場合、検出プロ

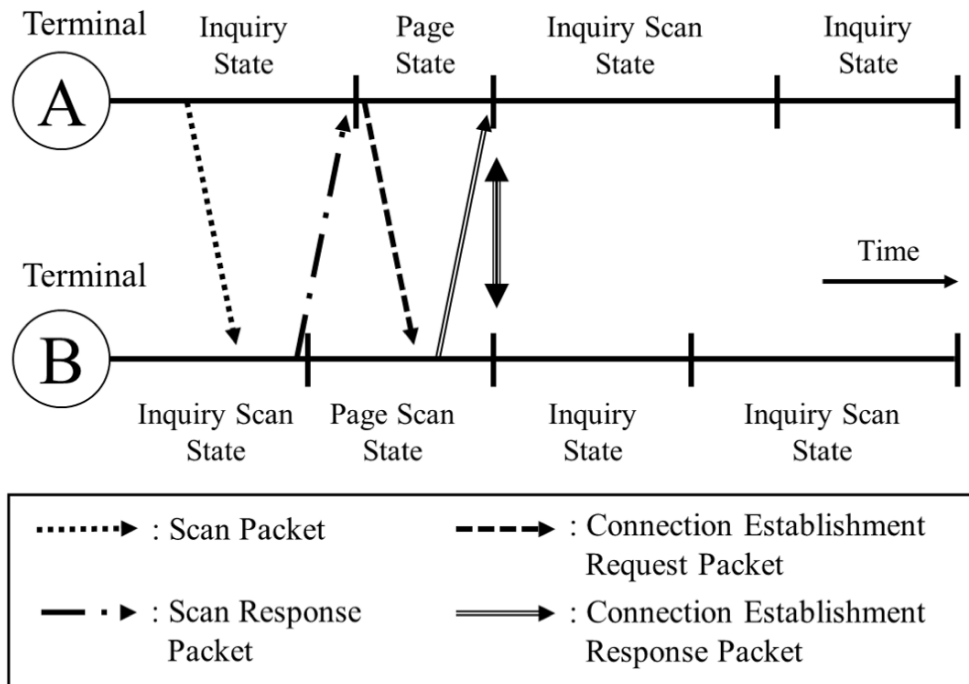


図 2.1: Classic Bluetooth のコネクション確立手順

セスを終了して確立プロセスへ移行する。また、端末 B は端末 A へ応答パケットを送信後に検出プロセスを終了して確立プロセスへ移行する。Page の状態である端末 A は、応答パケットの送信元である端末 B を宛先とするコネクション確立要求パケットを送信する。Page Scan の状態である端末 B は、端末 A からコネクション確立要求パケットを受信後に応答パケットを端末 A へ送信することで、端末 A と端末 B 間でコネクションが確立する。

Bluetooth Low Energy

BLE は Bluetooth 4.0 から追加された規格であり、ボタン電池で数年間通信可能なほど低消費電力を実現している [33]。BLE の通信によりデータ共有を行う場合は、GATT (Generic attribute profile) で定義されている標準メッセージの送受信方法を用いることが一般的である。GATT はサーバ-クライアント方式の通信であり、クライアントの振る舞いをする Scanner と、サーバの振る舞いをする Advertiser という 2 種類の役割が存在する。Advertiser は一つ以上の Service を有しており、各 Service は一つ以上のデータ送信の最小単位である Characteristic を有している。Scanner と Advertiser 間でコネクションを確立して通信を行う場合は、特定 Service 内の Characteristic で管理されているデータを読み込む、または書き換えることでデータの共有を実現している。

BLE のコネクションを確立し、GATT による通信を行う手順には Classic と同じく検出

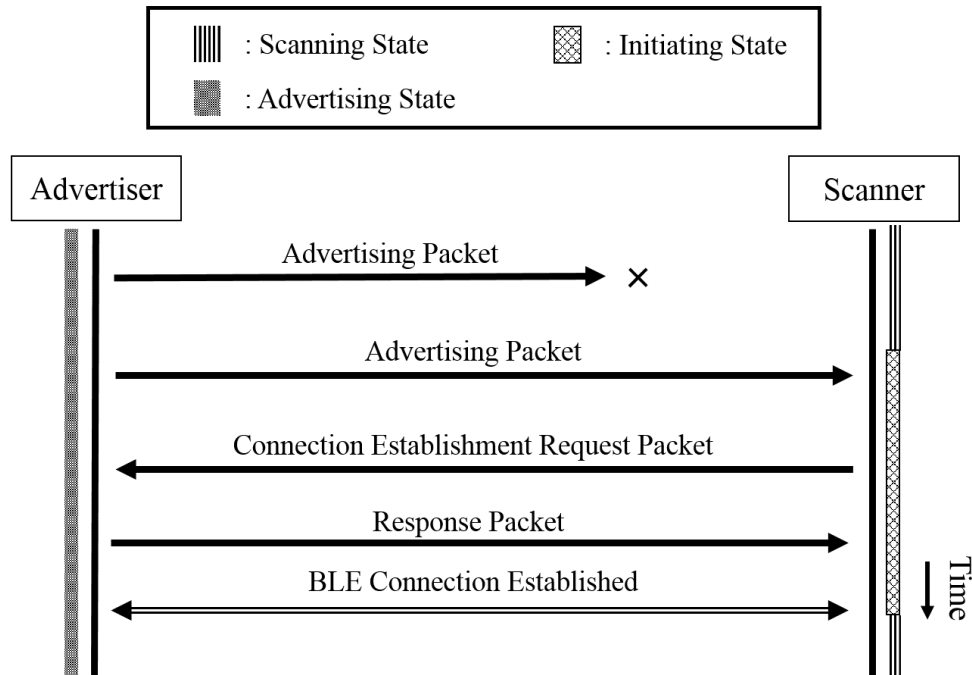


図 2.2: BLE のコネクション確立手順

プロセスと確立プロセスの 2 種類が存在する。Advertiser は Advertising という状態があり，Scanner には Scanning と Initiating の状態が存在する。BLE を用いて端末が相互に通信を行うために必要なコネクション確立手順を図 2.2 に示す。(1) Advertiser である端末は Advertising という状態となり，自身の存在を知らせるためのパケット (Advertising パケット) を定期的送信することで，隣接する Scanner である端末に対して自身の存在を知らせる。(2) Scanner である端末は Scanning の状態となり，Advertiser が送信しているパケットをスキャンすることで，隣接する Advertiser を検出する。(3) Advertiser を検出した Scanner は，Initiating の状態を開始し，検出した Advertiser に対してコネクション確立要求パケットを送信する。(4) Advertiser は Scanner からの接続要求パケットに応答するパケットを送信することで，端末間のコネクションが確立する。

2.2.5 Bluetooth MANET

MANET は，各端末が移動しながら自律的にネットワークを構成する性質を持つ。端末が移動する場合，通信範囲内に存在していたコネクション確立済み隣接端末との通信が不可能となることや，コネクション未確立の隣接端末が登場することが考えられる。また，端末の移動により端末密度も変化するため，高密度な環境下では文献 [25] や文献 [26] で示されているように Bluetooth の電波干渉が避けられず，端末間の通信切断が発生することで，常に端末間の接続状況が変化すると考えられる。そのため，Bluetooth MANET

においても、その性質を保障するために隣接端末の検出や接続の新規確立、接続切断時には再確立を試みるなどの処理を自律的に行い、隣接端末との接続確立状態を確認する必要がある。

2.2.6 Bluetooth MANET の課題

Bluetooth MANET を構築する際に、Classic の接続確立手続きに存在する端末間状態の衝突が課題となる。Classic の接続確立手順には検出プロセスと確立プロセスが存在し、さらに各プロセスには二つの状態がそれぞれ存在する。Classic の通信で Bluetooth MANET を構築する場合、ネットワークを自律的に構築するために二つのプロセスを自動的に実行する機能が必要となる。しかし、Classic では検出プロセスと確立プロセスに存在する 4 種類の状態において、いずれか一つの状態となる制約が存在するため、端末間で自動的に接続を確立する際に、端末間で状態の衝突が発生し、隣接する端末を検出できない、または端末間の接続が確立できない課題が発生する。図 2.3 に Classic の接続確立時に発生する、二つの状態の衝突を示す。

- (1) 検出の衝突：Inquiry の状態である端末を検出できない
- (2) 検出と確立の衝突：確立プロセスを実行している端末を検出できない

この課題を回避するために、各端末が Inquiry と Inquiry Scan の状態を交互に切り替え、さらに Inquiry と Inquiry Scan の状態となる継続時間を毎回変更して自律的に接続を確立する手法が文献 [24] や文献 [34] で提案されている。しかし、この衝突回避手法では検出の衝突や、検出と確立の衝突の課題を排除することができないため、端末間の状態の衝突が発生し、接続確立までに時間を要する場合がある。

2.2.7 遅延・切断耐性ネットワーク

遅延・切断耐性ネットワーク (以降, DTN: Delay and Disruption Tolerant Network)[27] は一般的に、エンドツーエンド間の接続が不安定で、比較的大きな遅延が発生するような環境において、通信を行う技術として定義されている。遅延の大きな環境において確実に情報の伝達を行うためには、通信を行う端末自体が受信したデータを、端末内の記憶領域内に長期間保持しておく必要がある。また、送信元端末から宛先端末にデータが届くまでに長い時間がかかるため、ストリーミングのような連続的なデータ転送や、通

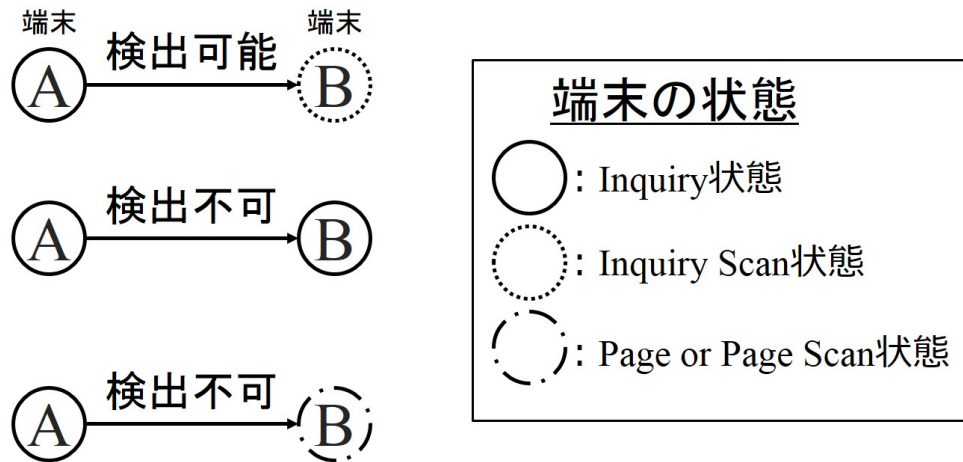


図 2.3: Bluetooth の状態と端末検出の関係

話などのリアルタイム性が求められる通信には不向きである。そのため、DTNはある程度完結したデータの通信に適している。そのデータ例として、テキストメッセージや画像などが考えられる。また、各端末が記憶領域内にデータを保持しているため、他の複数端末にデータを送信することが可能である。そのため、コンテンツを配信するようなアプリケーションに適していると考えられる。DTN自体はMANETに限られた概念ではないが、以上のような特徴からMANETにおいて活用しやすい技術である。また、通信媒体に無線を使用するMANETでは、DTNを適用すべき通信環境が発生しやすい。DTNを適用すべき通信環境とは、以下のような環境である。

- 疎なネットワーク環境

疎なネットワーク環境とは、各端末の隣接端末数が非常に少ない状況のことである。通信可能な端末が存在したとしても、端末間の距離的關係からすぐ切断されるなどして、安定した通信が困難な状況を指す。

- 密なネットワーク環境

密なネットワーク環境とは、疎なネットワーク環境とは対照的に、非常に密な環境において端末が発する無線電波の干渉により端末間の通信の失敗が頻発するような状況のことである。状況は異なるが、安定した通信が困難という観点では疎なネットワーク環境と同様である。

上記のような環境において、通常のMANETによる通信を行うことは困難である。ただし、DTNを適用するには通信が稀にでも成功するという条件が必要である。稀に成功する通信を頼りに、データを確実に転送する。このような特性から、DTNは無線による疎・密なネットワーク環境において信頼性の高い通信を実現することが可能である。そのた

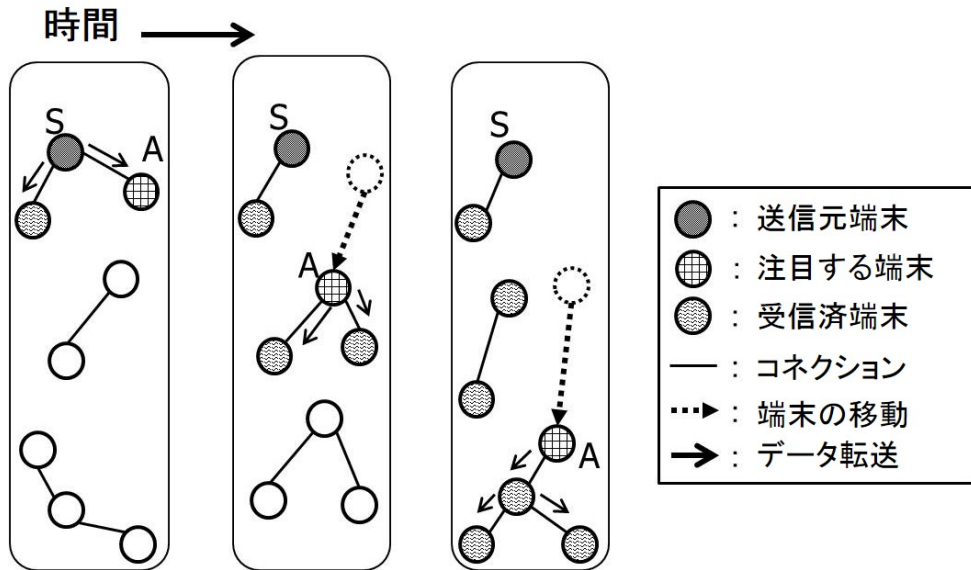


図 2.4: Epidemic Routing の動作例

め、過疎または混雑した状況が考えられるイベントだけでなく、災害時ネットワークの通信などに適用することが考えられる。

2.2.8 Epidemic Routing の適用

DTN における代表的なデータ転送方式の 1 つに Epidemic Routing [35] がある。Epidemic Routing は、端末密度が疎なアドホックネットワークに適用可能な、蓄積運搬転送を用いた情報転送プロトコルである。以降では Epidemic Routing の動作例とその課題について説明する。

Epidemic Routing

Epidemic Routing は、各端末がデータパケットを端末内のバッファに蓄積し、端末が移動した際に、データパケットの複製を通信可能範囲内の全ての端末に対して転送するデータ転送方式である。このデータ転送方式では、蓄積しているデータパケットを持つ端末の通信可能範囲内に他端末が存在する場合、蓄積データパケットの複製を行い、他端末に対して転送する。通信可能範囲内に他の端末が存在しない場合、データパケットを自身のバッファに蓄積したまま移動し、通信可能範囲内に端末が現れるのを待ってデータ転送を試みる。他の端末から複製されたデータパケットを受信した端末は、自身のバッファにデータパケットを蓄積し、同様に移動・転送を行う。これらの動作を繰り返すことにより、データパケットを宛先端末まで転送する。Epidemic Routing を用いる環境として、主に

同じ情報を多数の端末に転送する必要がある環境が考えられる。MANET の端末密度が疎な環境では、送信元端末と宛先端末間で経路の構築が困難なため、データパケットを確実に宛先端末に転送したい場合に、データの蓄積転送を行う Epidemic Routing が有効であると考えられる。本研究が想定しているシステムは、平常時と災害時に利用可能な不特定多数端末への情報配信システムであるため、宛先端末は自端末を除いた MANET 内に存在するすべての端末となる。

本システムでは、平常時災害時両用システムに Epidemic Routing を実装している。Epidemic Routing の動作例を図 2.4 に示す。まず、端末 S が情報の発信元となり、データを送信する。この際、データ転送ではマルチホップ転送が可能であるが、電波の到達範囲内にいない端末に対してはデータを送信することができない。また、端末 S からデータを受信した移動端末 A は、そのデータを自端末の記憶領域内に蓄積している。時間経過とともに、端末 A と周囲の端末が移動し、端末 A の通信可能範囲内に新たな端末が移動してきたとする。端末 A は隣接端末と蓄積しているデータを交換する。さらに端末 A が移動し、同様の動作を繰り返すことで端末 S から送信されたデータをネットワーク全体に伝搬させることができる。

2.2.9 Epidemic Routing の課題

Epidemic Routing を用いることで、データパケットをネットワーク内に伝搬させ、端末密度の疎密に関わらず宛先端末まで転送する事が可能となる。しかし、Epidemic Routing では各端末が通信可能範囲内に存在する、すべての端末に対してデータパケットの複製を転送するため、蓄積するデータパケットに制限をかけなければ、ネットワーク内にデータパケットが溢れてしまうことが考えられる。これにより各端末のバッファ容量を圧迫される。また、蓄積しているデータパケットの量が増えた場合に、1 回のデータパケット転送における通信量が莫大になり、通信帯域の圧迫や通信完了までに要する時間が増加する課題がある。

2.3 概要

本システムは Android 端末上で実装されている、口コミ伝搬機能と見守り機能などを持つ平常時モード、安否情報伝搬機能などを持つ災害時モードの 2 種類のモードを有するものである。ユーザは Android 端末内の本システムを用いて、平常時モードの機能で使用される口コミ情報や、災害時モードの機能で使用される安否情報などの評価情報を

アプリケーション層	サービス	平常時モード		災害時モード	
		伝搬機能 ロコモ情報	見守り機能	伝搬機能 安否情報	確認機能 身内情報
モード切替機能		<ul style="list-style-type: none"> 平常時モード 災害時モード 			
ルーティング層	<u>接続状況によるデータ転送方式切替</u> <ul style="list-style-type: none"> マルチホップ伝送 蓄積伝送(Epidemic Routing) 				
デバイス層	<u>Bluetooth MANET</u> <ul style="list-style-type: none"> Bluetooth 2.1+EDR Bluetooth 4.0以上 				

図 2.5: ネットワークアーキテクチャ

作成し，情報配信・共有を行う。本システムでは，評価情報の伝搬には通信手段として Bluetooth 通信を用いる。発信者が持つ端末の通信範囲内，もしくは発信者が持つ端末からマルチホップ通信で通信可能な端末に対しては，Bluetooth MANET のマルチホップ転送により評価情報は即座に転送され，周辺に存在する端末には受信した評価情報が表示される。同時に，2.2.8 節で説明した通り，受信した評価情報は端末内のバッファに蓄積される。一方，通信範囲外の端末に対しては，評価情報が蓄積された端末を持つ人が移動し，通信範囲外であった端末と通信可能になった場合，蓄積された評価情報が転送される。

本システムを平常時・災害時に使用する際に想定される問題として，周囲に人が少ない場合や Bluetooth MANET の特性による接続性の低下が挙げられる。このような状況では端末密度が疎なネットワーク環境となるため，2.2.7 で説明した DTN 技術を Bluetooth MANET に適用した遅延・切断耐性 Bluetooth MANET を用いて対応する。本システムは Bluetooth MANET によるマルチホップ転送と，Epidemic Routing による蓄積転送の 2 種類のデータ転送方式を組合わせたデータ転送方式を有しているため，端末密度の疎密が存在する MANET 内においても評価情報を伝搬させることができる。

2.4 平常時災害時両用システムの特徴

本システムは，Bluetooth MANET に基づくネットワークアーキテクチャ[36] のアプリケーション層を平常時と災害時の 2 種類のモードにより構成したものをを用いている。使用しているネットワークアーキテクチャを図 2.5 に示す。本システムはデバイス層とルーティ

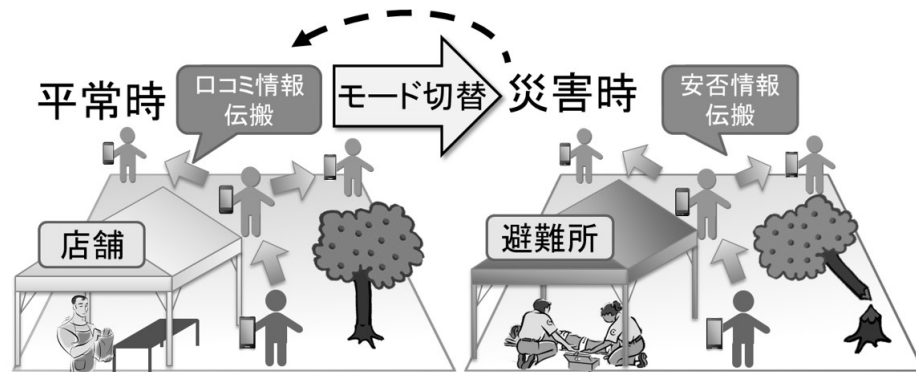


図 2.6: 平常時災害時両用システムのイメージ

ング層，アプリケーション層の3層からなる階層構造である。デバイス層では，Bluetoothのコネクション確立処理やデータパケットの送受信処理を行う。ルーティング層では，SVの管理や隣接端末との差分データの管理，隣接端末との接続状況に応じたデータ転送方式の切り替えが行われる。アプリケーション層には平常時モードと災害時モードの2種類がある。さらに，平常時モードには口コミ情報伝搬機能と見守り機能の2種類のサービスがあり，災害時モードには安否情報伝搬機能と身内情報確認機能の2種類のサービスがある。アプリケーション層には平常時モードと災害時モードの異なるモードが存在するが，アプリケーション層より下の層は共通であるため，ルーティング層において受信したデータパケットに記録された情報をもとに，受信情報を渡すアプリケーション層の各モードを決定するモード切り替え機能がある。

平常時災害時両用システムのイメージを図2.6に示す。本システムにおける平常時モードと災害時モードのルーティング層以下は，共通のネットワークアーキテクチャを利用しているため，アプリケーション層の平常時モードと災害時モードは互いに独立して動作するが，情報の転送方式は同一である。そのため，災害発生時においても，ユーザは平常時と同様にアプリケーションを使用することでメッセージを送信し，伝搬させることが可能である。また，本システムでは情報伝達用のパケットに，平常時モードと災害時モードのどちらのパケットであるかの情報を付加し，平常時モードを利用時に災害時のパケットを受信した際に，自動的に災害時モードへ切り替わるように設計している。そのため，平常時と災害時のGUIと使用方法を統一することで，ユーザの使用方法が分からないという問題が発生しないようにしている。

以降では，アプリケーション層の平常時モードと災害時モードの各機能の詳細について，ルーティング層のデータ転送処理について，そしてデバイス層のコネクション確立方式について述べる。

2.5 アプリケーション層

2.5.1 概要

本節では、平常時災害時両用システムのアプリケーション層の役割及び、実装されている各モードと機能について述べる。平常時と災害時の両用を目指すシステムを開発する際に生じる課題として、災害発生時にアプリケーションがインストールされていない、またはアプリケーションを使う習慣がなく使い方が分からない場合が存在するという点が挙げられる。平常時と災害時の両用を想定した商用化アプリケーションとして、1.2で高知市津波 SOS アプリを紹介した。本アプリケーションは平常時用途として、津波発生時の避難先として指定されている場所を表示する機能があり、災害時用途として要救助者の要救助者人数や任意のメッセージを発信する機能が実装されている。しかし、平常時の機能としてメッセージ発信機能が存在せず、平常時にも積極的に活用できるアプリケーションではない設計となっている。

我々は平常時災害時両用システムの機能として、平常時は口コミ伝搬機能と見守り機能、災害時は安否情報伝搬機能と身内情報優先表示・保護機能を実装した。各機能は統一された GUI とメッセージ発信機能を有しており、平常時災害時を問わずに情報発信が可能な仕様である。また、口コミ伝搬機能は 2013 年に広島市で開催された全国菓子大博覧会において、各店舗の商品に関する口コミ情報を共有する目的に実装し、当該イベントの来場者向けに公開した実績を有する。

2.5.2 平常時モード

本システムの平常時モードには、口コミ伝搬機能と児童見守りシステムの機能がある。口コミ伝搬機能は、Bluetooth MANET と Epidemic Routing を用いて、ユーザが作成した口コミ情報を伝搬させる機能である。見守り機能は、Bluetooth MANET を用いて、端末の位置情報や MANET を構成しているグループ情報を携帯電話回線や無線メッシュネットワークを経由し、遠隔地から確認できる機能である。以降では、口コミ伝搬機能と見守り機能の詳細についてそれぞれ述べる。

口コミ伝搬機能

口コミ伝搬機能のイメージを図 2.7 に示す。図 2.7 において、あるユーザが店舗 A の商品进行评估したとする。ユーザは、Android 端末に自身の評価を入力して、口コミ情報とし

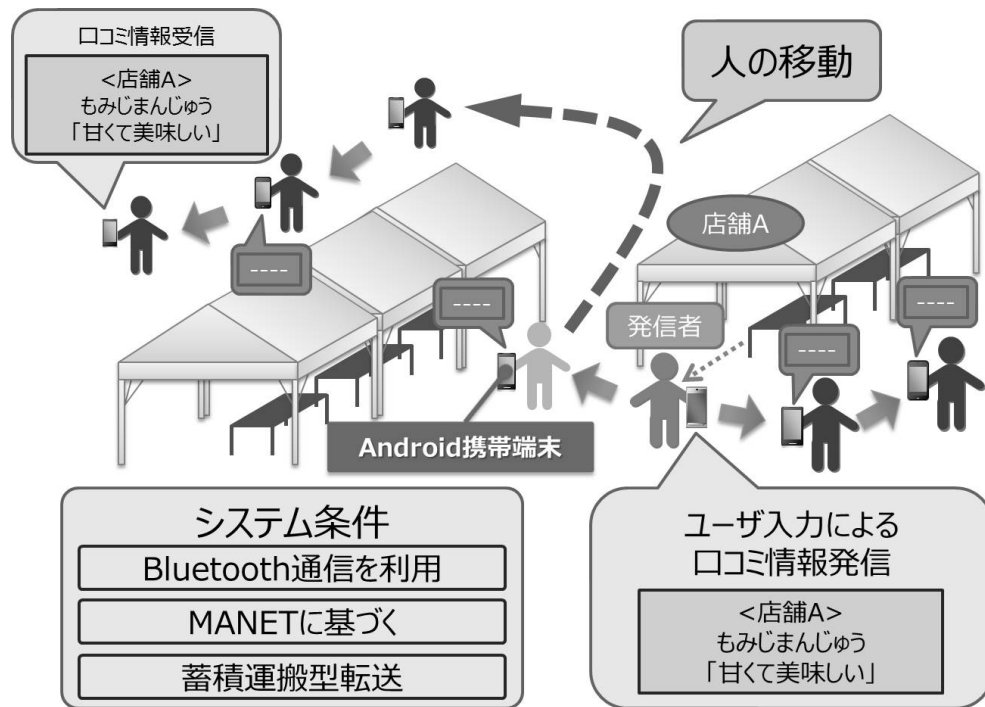


図 2.7: 口コミ伝搬機能のイメージ

て発信する。発信者が持つ Android 端末の通信可能範囲内もしくは Bluetooth MANET によるマルチホップ通信を利用して通信可能である端末に対しては、情報は即時に転送されて端末画面上に表示される。同時に、情報は端末の記憶領域に蓄積される。そのため、Bluetooth を用いた通信可能範囲外の端末に対しても、即時に情報が転送されないが、情報を蓄積した端末を持つ人が移動し、新たに通信可能となった場合に蓄積された情報が転送される。このようにして、エリア内で速やかにかつ広範囲に情報を伝搬できる。

見守り機能

口コミ伝搬機能は不特定多数の人との情報通信が対象であるのに対して、見守り機能は事前に互いの端末を登録した者間の情報通信が対象である。見守り機能のイメージを図 2.8 に示す。図 2.8 において、Android 端末を持った児童が登校中であるとする。児童の端末は一定間隔ごとに Bluetooth MANET によるマルチホップ通信を利用して通信可能である端末を確認し、グループ情報を作成する。作成したグループ情報と GPS を用いた自身の位置情報を携帯電話回線や無線メッシュネットワークを用いて、見守り機能のサーバに送信する。児童の親は、自身の端末から見守り機能のサーバにアクセスし、子どものグループ情報と位置情報を確認することができる。

見守り機能の児童のグループ情報や位置情報などは口コミ伝搬機能の口コミ情報とは

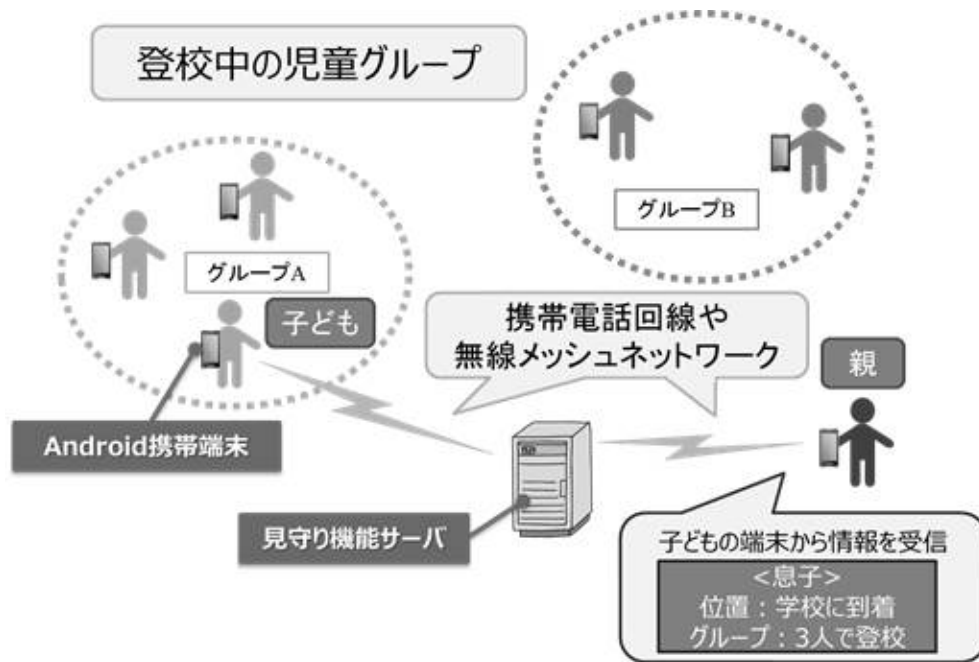


図 2.8: 見守り機能のイメージ

異なり、情報の生成時間が現在時刻に近づくほど信頼性と必要性が増す。そのため、生成から一定時間経過した古い情報は不要となるため、情報を送信した際の動作は口コミ機能とは異なり、情報を端末の記憶領域に蓄積しない。

2.5.3 災害時モード

本システムの災害時モードには、安否情報伝搬機能があり、伝搬している安否情報の中から身内情報を優先表示・保護する機能がある。災害時には既存のインフラストラクチャへのダメージにより携帯電話回線や無線メッシュネットワークの使用が不可能であることが予想される。そのため、災害時モードの安否情報伝搬機能と身内情報優先表示・保護機能はともに、Bluetooth MANET と Epidemic Routing を用いている。また、インフラストラクチャの回復後は携帯電話回線やメッシュネットワークを用いて遠隔地との情報交換も考えている。以降では、安否情報伝搬機能と身内情報優先表示・保護機能の詳細についてそれぞれ述べる。

安否情報伝搬機能

安否情報伝搬機能は図 2.9 に示す、平常時災害時両用システムのイメージに基づき設計している。災害発生時に被災者の多くは自宅、職場、車内などの周囲に人が少ない低密度

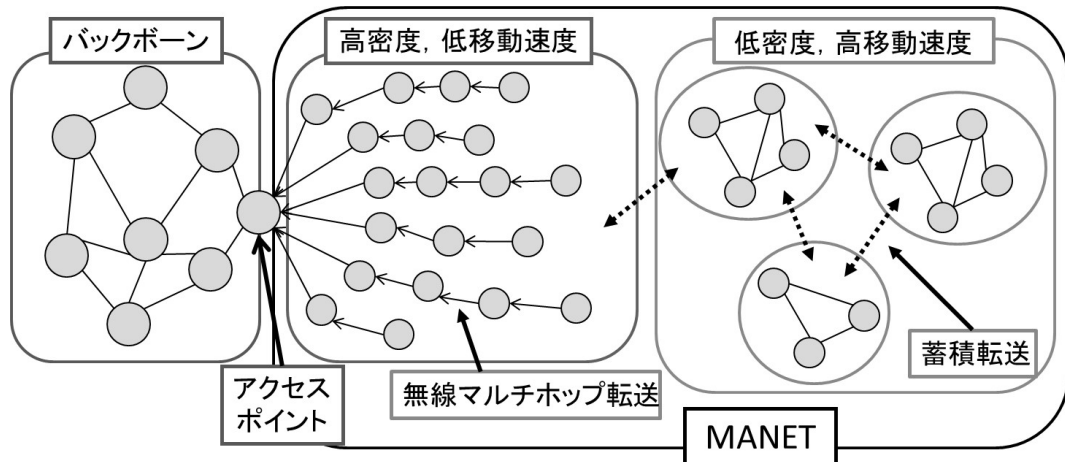


図 2.9: 平常時災害時両用システムイメージ

の環境であることが考えられる。また、被災者の多くは指定の避難場所への高速度の移動が考えられる。そのため、本システムでは避難場所への移動中は主に Epidemic Routing を用いて、安否情報の蓄積・転送を行う。

避難所に到着した際には、多くの避難者が集まった高密度の環境であると考えられる。多くの人々が避難所に留まり、低速度の移動であると考えられる。そのため、避難所では主に Bluetooth MANET によるマルチホップ通信を利用し、移動中に蓄積した情報の交換・転送を行う。

災害発生から時間が経過するとともに、災害によりダメージを受けたインフラストラクチャの復旧が行われる。その際には、復旧した携帯電話回線や一時的に構築されたメッシュネットワークなどのバックボーンネットワークを避難所などに設置されたアクセスポイントから利用することにより、他エリアの避難所と安否情報の交換を想定している。

身内情報優先表示・保護機能

身内情報優先表示・保護機能では見守り機能と同様に、事前に互いの端末を登録した身内からの情報を保護する機能である。避難所などの人密集地では、安否情報の蓄積・転送時に大量の情報の交換が行われる。その際に、ユーザが得たい人の情報が埋もれてしまうという可能性がある。本機能は、事前に登録した情報と一致する身内の安否情報のみを表示し、記憶容量が多くなった場合には、身内の安否情報以外から削除するものである。

2.5.4 モードの切り替え方法

平常時モードから災害時モードへの切り替え方法は以下の 2 種類がある。

- ユーザ操作による切り替え
- 災害時モードのパケット受信による自動モード切り替え

ユーザ操作による切り替えは、平常時モードの画面上に表示されているモード切替ボタンにより行う。誤操作によるモード変更を防止するために、モード切替ボタンを有効にする動作を加えている。自動モード切り替えは、パケットに平常時用と災害時用の識別情報を含ませることにより実現している。そのため、安否情報を伝搬させることにより、周囲の人の端末を災害モードに変更させることができる。各切り替え方法においても、切り替え時にユーザに切り替えの許可を求めることにより、ユーザの意に反した切り替えが発生しないようにしている。また、災害時モードから平常時モードへの切り替えは、ユーザによる切り替えボタン操作により行う。

2.6 ルーティング層

2.6.1 概要

本節では、平常時災害時両用システムのルーティング層の役割及び、Bluetooth MANET におけるデータ転送手法について述べる。ルーティング層では、各端末の接続状況に応じて、Epidemic Routing をベースとした蓄積転送方式、及び無線マルチホップ転送を自律的に切り替えてデータ転送を行う働きを有する。2.2.9 では Epidemic Routing をベースとした蓄積転送方式の課題として、蓄積しているデータパケットの量が増えた場合に、データ転送における通信量が莫大となることで通信帯域の圧迫やデータ転送に要する時間が増加する点を挙げている。本ルーティング層では、本課題を解決するデータ転送方式として、Summary Vector (SV) を用いた SV を利用したデータ転送方式を搭載している。SV は無線通信端末内に蓄積しているデータの識別子であり、蓄積しているデータ自体は含まないものである。SV を利用したデータ転送方式では、蓄積データの転送前に SV を交換することで、通信相手が有していないデータのみを転送することで、通信時のデータ通信量とデータ転送時間を削減削減する効果を有する。

無線マルチホップ転送は、データ生成時か他端末からのデータ受信時に、既に接続確立済みの端末に対して SV 交換をせずにデータ転送を行うデータ転送手法である。無線マルチホップ転送では SV 交換などを実施せずにデータを転送するため、SV を

利用したデータ転送方式よりもデータ転送に要する時間が短いという特徴がある。そのため、Bluetooth MANET へ高速にデータを伝搬させることが可能となる。一方で、コネクション未確立の端末や一時的なコネクション切断が発生している端末には無線マルチホップ転送を用いたデータ転送ができないという特徴も存在する。本節では、ルーティング層が有する特徴の異なるデータ転送方式について述べる。

2.6.2 受信データパケットの種類

本システムで使用しているパケットには次に示す 2 種類がある。

- データパケット
- SV 情報パケット

データパケットとは口コミ情報や安否情報などの、本システムで生成された評価情報を記録しているパケットである。SV 情報パケットとは Epidemic Routing における SV の交換を用いた蓄積データ転送方式に用いられるパケットである。

2.6.3 受信データパケットの転送処理

本システムでは次に示す 2 つの場合に、データパケットが下層のデバイス層へ送られ、コネクションを確立している隣接端末へ転送される。

- ユーザがアプリケーション層の各機能で評価情報を作成し、コネクションを確立している隣接端末への送信要求が発生した時
- コネクションを確立している隣接端末から受信したデータパケットの TTL (Time To Live) の値が 1 以上の時

ユーザが作成した評価情報は、アプリケーション層から下層のルーティング層に送られ、評価情報を含むデータパケットが作成される。パケットヘッダには、転送ホップ数をあらかず TTL(Time To Live) の値を書き込み、下層であるデバイス層に送られ、その時点でコネクション確立をしている隣接端末へ転送される。そして、転送したデータパケットの複製を自端末内のバッファに蓄積する。

デバイス層で隣接端末から受信したデータパケットは上層に送られ、ルーティング層でパケットヘッダに記録されている TTL の値を読み込む。TTL は IP データグラムと同様に、1 回転送を行うたびに値を 1 ずつ減少させるという動作を行う。TTL 値が 1 以上であれば、端末はその時点でコネクションを確立している隣接端末に対して、データパ

ケットをマルチホップ転送し、コネクションを確立していない端末へ蓄積転送するために、自端末内のバッファに蓄積する。

デバイス層で隣接端末から受信した SV 情報パッケージは上層に送られ、ルーティング層で自身の SV と受信したパッケージに記録されている SV の差分を計算する。計算により求めた差分データをもとに、自身のデータバッファ内に蓄積しているデータパッケージから差分データを抽出する。抽出したデータパッケージの集合をデバイス層に送り、受信した SV 情報パッケージの送信元端末へ転送する。

2.6.4 ルーティング層のデータ転送方式

無線マルチホップ転送

無線マルチホップ転送はネットワークを構築する各端末にデータ転送機能、及びデータ中継機能を持たせ、直接通信不可能な宛先端末に対まで複数の端末がデータを中継するデータ転送方式である一般的な無線マルチホップでは、データの転送先端末や TTL などのデータ転送に必要な情報をデータパッケージから読み出し、及び情報を書き込むことで正確な宛先までデータを転送する。Bluetooth MANET においても同様に、自端末でデータを生成、または他端末からデータを受信した際に、転送するデータパッケージに記録されている情報をもとに各端末がデータを中継、または転送することでデータを転送する。Bluetooth MANET の無線マルチホップ転送では、TTL が 0 となるまで受信したデータの送信元を除くコネクション確立済み端末に対して受信データを転送することで、MANET 内へのデータ伝搬を実現すると同時に、MANET 内に伝搬するデータ量を制限している。無線マルチホップ転送によるデータ伝搬は、ネットワークの複数端末が連携して連続的にデータを転送するため、ネットワーク全体へ素早くデータ伝搬が可能である。一方で、コネクション未確立の端末や一時的なコネクション切断が発生している端末には無線マルチホップ転送を用いたデータ転送ができないため、端末密度が疎な環境や周辺に隣接する端末が存在しない場合には、データ転送が出来ないデータ転送方式である。

SV を利用したデータ転送方式

平常時災害時両用システムに実装されているデータの蓄積転送には、SV と呼ばれる蓄積データの一覧を示すリストが用いられる。各端末は SV を非同期で定期的に交換することで、隣接端末が保持していないデータを知ることが出来る。また、SV はデータの識別

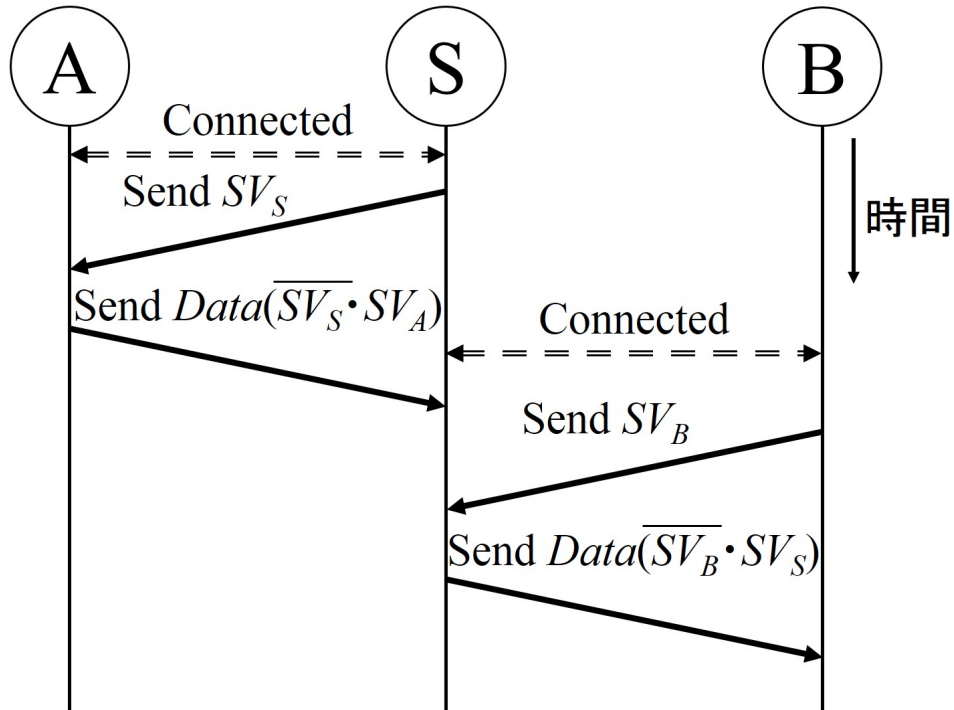


図 2.10: SV を利用したデータ転送方式の動作例

情報のみからなるリストであり、データそのものは含まれていない。そのため、単に蓄積しているデータを全て送信するのに比べてオーバーヘッドを削減できる。

SV を利用したデータ転送のシーケンスを図 2.10 に示す。端末 S と端末 A は接続を確立している状況とする。まず、端末 S が自身の保持する SV である SV_S をブロードキャストする。 SV_S を受信した端末 A は、自身の保持する SV である SV_A と受信した SV_S との差分である $Data(\overline{SV_S} \cdot SV_A)$ を生成する。これを元に、端末 A が持つコンテンツリストから $Data(\overline{SV_S} \cdot SV_A)$ を作成し、端末 S に対してユニキャストする。このような処理を各端末が隣接端末に対して定期的に行うことで、ネットワーク内にデータの伝搬を行う。

2.7 デバイス層

2.7.1 概要

本節では、平常時災害時両用システムのデバイス層の役割及び、Bluetooth の接続確立手法について述べる。デバイス層では、Bluetooth の接続確立処理やデータパケットの送受信処理を実施しており、Classic と BLE の異なる通信規格が有する特徴を利用して、効率的な Bluetooth MANET の構築を実現するための接続

確立手法を搭載している。Bluetooth のコネクション確立を自律的に実施し、Bluetooth 通信のみを用いて大規模なアドホックネットワークを構築する既存研究として、1.2 では MBNET の構築手法を紹介した。MBNET を構築する Bluetooth のコネクション確立手法は、Classic のマスター-スレーブ方式で構築できるピコネットやスツキヤッタネットを利用せずにネットワークを構築する。そのため、ピコネットに存在するネットワークに参加可能な端末台数の制限や、マスターである各端末が他のピコネットへ参加する際はスレーブとしてのみ参加可能という役割の制限を受けずにネットワーク構築が可能のため、従来のネットワーク構築手法よりも大規模なネットワークが構築可能という特徴がある。一方で、各無線通信端末に複数の Bluetooth インタフェースを搭載していることを前提としており、一つの Bluetooth インタフェースのみを搭載している場合が大半であるスマートフォンやタブレット端末で利用不可能なネットワーク構築手法であるという特徴も存在する。

本節で述べるデバイス層は、一般的なスマートフォンやタブレット端末などの無線通信端末で構築可能な Bluetooth MANET の構築を目的とし、スツキヤッタネットをネットワーク構築のベースとして Bluetooth MANET を構築する。そのため、デバイス層では無線端末間のコネクション確立を自律的かつ高速に実行することで大規模かつ、コネクションの切断が発生場合にも素早くコネクションの再確立を実現することで高可用性を有する Bluetooth MANET の構築を目指している。また、無線通信端末に搭載されている Bluetooth インタフェースのバージョンに応じて、Bluetooth の利用可能な通信規格が異なる場合が存在する。そこで、Bluetooth 4.0 未満かそれ以上バージョンである Bluetooth インタフェースを搭載しているかを自動的に判定し、異なるバージョンの Bluetooth インタフェースを搭載した無線通信端末間においてもコネクション確立可能な特徴を有している。

2.7.2 デバイス層で用いる Bluetooth

本システムのデバイス層で使用している Bluetooth には次に示す 2 種類がある。

- Bluetooth 2.1+EDR
- Bluetooth 4.0 以上

Bluetooth 2.1+EDR とはペアリングの手続きが簡略化され、従来の Bluetooth と比べて大容量のデータ転送が行える機能を有している Bluetooth のバージョンである。Bluetooth 4.0 以上のバージョンは、従来の Bluetooth 2.1+EDR (Classic) と従来のバージョンと比べて大きく省電力化が図られた BLE の 2 種類の機能を併せ持つバージョンである。本シ

表 2.1: BLE と Classic の主な仕様の違い

	Classic	BLE
ペアリング	必要	不要 (オプション)
周辺端末の検出	アクティブスキャン	パッシブスキャン
最大パケットサイズ	1021Byte	47Byte
最大データ転送レート	3Mbps	1Mbps

システムでは、Classic のみを用いて接続の確立を行い MANET の構築を行う手法と、3 章において述べる BLE と Classic を併用して接続確立を行う手法を実装しており、Bluetooth MANET の構築に用いる端末に応じて接続確立手法を切り替える方式を実装している。

2.7.3 Classic Bluetooth と BLE の仕様差分

現在、多くのスマートフォンやタブレット端末のような移動可能な無線通信端末に搭載されている Bluetooth のバージョンは 4.0 以上のものが多く、BLE によるデータ転送が可能な端末が多く存在している。BLE と Classic の主な違いを表 2.1 に示す。

BLE では、Classic の初回接続確立時に必要であったペアリングの手続きが不要である。そのため、初めて端末間で接続を確立する際もペアリングの手続きに要する時間分だけ接続確立時間を短縮できる。

BLE と Classic では 1 回に転送できる最大パケットサイズも大きく異なる。Classic では 1014Byte のデータを転送可能であるが、BLE では 47Byte までしかデータを転送出来ず、Classic に比べて大きな制限がある。また、Android の API では、Classic で 1014Byte 以上のサイズを持つデータを転送する場合、自動的にパケット分割転送処理を行いデータを転送することが可能であるが、BLE には自動パケット分割転送処理の機能が存在しないという違いも存在する。さらに、BLE と Classic では通信速度も大きく異っている。Classic のデータ転送レートは最大 3Mbps であり、BLE のデータ転送レートは最大 1Mbps である。BLE は Classic に比べて通信速度が大幅に遅いため、大きなデータの転送には適さず、センサ値などの小さなデータ転送向きの通信規格である。

2.7.4 Classic Bluetooth のみを用いた接続確立手法

2.2.6 において述べた、Classic の接続確立手続きに存在する端末間状態の衝突を回避した、Bluetooth の自律的な接続確立手法 (従来手法) について述べる。

Theodoros らは [24], Classic では検出プロセスと確立プロセスに存在する 4 種類の状態において, いずれか一つの状態となる制約が存在することに着目し, 各端末が Inquiry と Inquiry Scan の状態を交互に切り替え, さらに Inquiry と Inquiry Scan の状態となる継続時間を毎回変更して自律的に接続を確立する手法を提案している. 本手法では各端末が非同期的に端末状態を変更するため, 検出の衝突や, 検出と確立の衝突の課題を排除することができないので, 端末間の状態の衝突が発生する. しかし, 接続確立には Classic の通信のみを利用するため, Bluetooth 4.0 未満の Bluetooth インタフェースを搭載する場合や, BLE に未対応の無線通信端末と接続を確立することが可能という利点が存在する.

図 2.11 に従来手法を利用し, Bluetooth MANET の構築に必要な Classic の接続を確立する手順を示す. 従来手法では, 各端末が検出プロセス実行時に Inquiry か Inquiry Scan のどちらか一方の状態となり, 交互に各状態を切り替えることで隣接端末を検出し, 端末間の接続を確立する. 従来手法では, 図 2.11 に示した端末 A と端末 B が同じ Inquiry の状態である場合, 3.2.1 で説明した検出の衝突が発生し, 各端末は互いに検出できない状況となる. 次に, Inquiry の継続時間が終了し, 各端末は Inquiry Scan の状態へ移行する. この時, 従来手法では状態の継続時間を変更することで, 端末ごとの状態が衝突することを回避するため, 端末 A と端末 B では異なる Inquiry Scan の継続時間が設定される. そのため, 次に端末 A が Inquiry の状態へ移行した際に, 端末 B を検出することで Classic の接続確立手順を実行し, 端末間で接続を確立する.

2.8 平常時災害時両用システムの要素技術

2.6 及び 2.7 において述べた, 平常時災害時両用システムのルーティング層とデバイス層は Bluetooth MANET の構築と端末間でデータを転送する上で重要な機能を担っている.

2.8.1 デバイス層における端末間状態の Classic Bluetooth と BLE を併用した接続確立手法の提案

Bluetooth MANET は端末間の Bluetooth 通信のみを用いて構築するネットワークであり, ネットワークの構築と端末間でデータを共有するためには, 端末間で Bluetooth 接続を確立する必要がある. そのため, MANET のデータ普及性能やデータ伝搬速度は, 端末間の接続確立性能や構築できるネットワークの規模に強く依存している. 提案する平常時災害時両用システムのシステムアーキテクチャでは, 端末間の

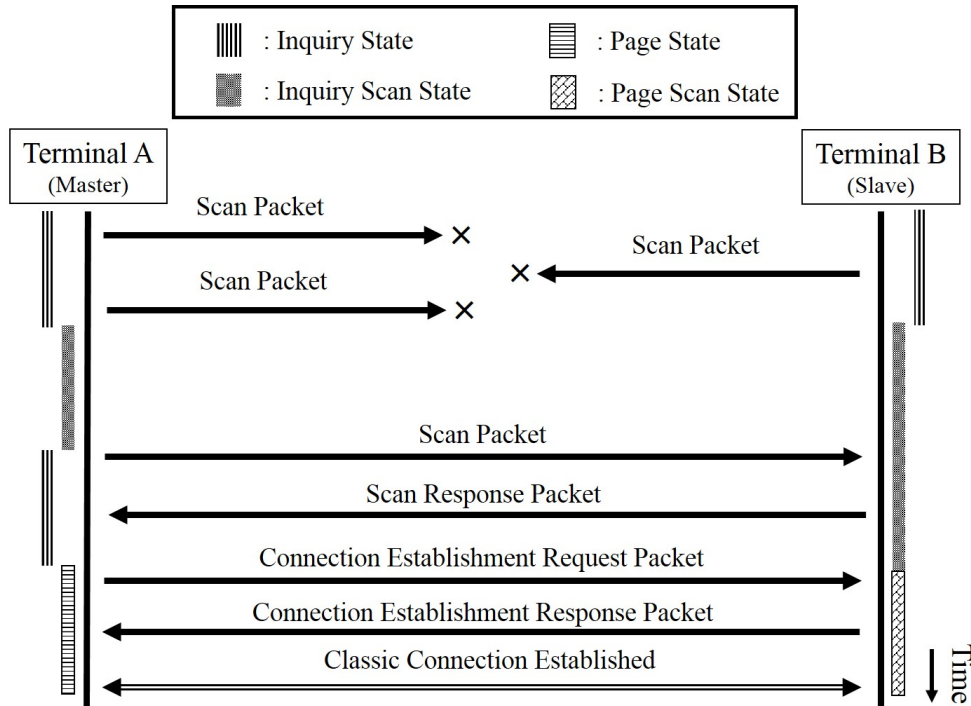


図 2.11: Classic のみを用いた接続確立手順

Bluetooth コネクションを確立する機能はデバイス層で実装される。しかし、Classic のコネクション確立手続きには端末間状態の衝突に起因するコネクション確立ができない課題が存在する。2.7.4 では端末間状態の衝突を回避するコネクション確立手法として、各端末が非同期的に端末状態を変更する従来手法について述べた。従来手法では端末間状態の衝突を回避して、端末間で Bluetooth コネクションを確立することが出来る一方で、端末間状態の衝突が発生する課題を排除できず、Bluetooth コネクションの確立に要する時間が長くなるという課題が存在する。Bluetooth コネクションの確立に要する時間が長くなる場合、Bluetooth MANET を構築できる規模に影響を及ぼすことが考えられる。そのため、端末間状態の衝突を解消するコネクション確立手法として、3 章において Classic と BLE を併用したコネクション確立手法を提案している。

2.8.2 ルーティング層における端末間接続状態に適応するデータ転送手法の提案

Bluetooth MANET は移動する端末間の Bluetooth 通信のみを用いて構築するネットワークであるため、コネクション確立済みの端末が Bluetooth の通信範囲外へ移動した場合や、端末間の電波干渉などにより一時的な Bluetooth のコネクション切断が発生することが考えられる。Bluetooth は 2.4GHz の周波数を用いる通信規格であり、2.4GHz の周波

数を用いる無線 LAN などの他通信規格との間で電波干渉が発生することがある [37]. 近年では無料の無線 LAN 接続サービスが屋内外で広く展開されており, 2.4GHz の周波数を利用するスマートフォンなどの製品が街中でも多く利用されているため, 電波干渉に起因する Bluetooth のコネクション切断が発生することが考えられる. しかし, Bluetooth 端末が移動し, 無線 LAN などの電波干渉を引き起こす他通信規格の電波範囲外へ出た場合や, 一時的な電波干渉で Bluetooth のコネクション切断が発生した後に素早く端末間のコネクションが再確立された場合, すぐに通信可能な状態となる. 提案する平常時災害時両用システムのシステムアーキテクチャでは, 端末間の接続状況に応じてデータを転送する機能はルーティング層で実装される. しかし, 端末間接続状態が頻繁に変化する場合や, Bluetooth MANET の端末密度に偏りが存在する場合に, データを高速に転送するためには次のような課題がある. 先ず, Bluetooth MANET の端末密度が疎な場合, Bluetooth による直接通信可能な端末数が限定されることで無線マルチホップ転送によるデータ転送が利用できず, SV を利用したデータ転送へ切り替えることで Bluetooth MANET へのデータ伝搬に多くの時間を要する場合や, データ伝搬が不可能な場合がある. 一方, 端末密度が高密度な環境下では, Bluetooth MANET へのデータ伝搬は可能であるが, 通信の干渉と切断によりデータ転送の再送処理や SV 交換に多くの時間を要することでデータ伝搬時間が長くなることが考えられる. そのため, 端末間接続状態に適応するデータ転送手法として, 4 章では端末間の接続状況や端末密度に応じて, 無線マルチホップ転送と SV を利用したデータ転送の各データ転送機能を切り替えるデータ転送手法を提案している.

2.9 平常時災害時両用システムの実装例

本節では, 平常時災害時両用システムを Android アプリケーションとして実装した, 各サービスの GUI デザインについて述べる. 平常時と災害時両用のアプリケーションを実現するには, 普段は使用しない災害時モードに切り替わった際に, ユーザがアプリケーションの使い方が分からず, 情報を発信できないという問題が生じないようにする必要がある. そのため, 平常時災害時両用システムでは, 2.4 節で説明したアーキテクチャを使用することによる情報転送方式の統一に加え, 災害時用の情報作成画面である GUI を平常時用の GUI に対応した仕様にし, 入力・登録内容に対応関係を持たせることにより円滑なモード切り替えを実現している.

口コミ画面のキャプチャを図 2.12 (a) に示す. 自身が作成した情報は右側に表示され, 他の端末から受信した情報は左側に表示される. また, 画面下部のボタンを押すことに



図 2.12: 口コミ情報伝搬と安否情報伝搬機の画面デザイン

よりユーザの口コミ情報の作成とアバター変更が行える。口コミ情報を作成する画面を図 2.12 (b) に示す。口コミ作成画面では、項目の選択と自由記述にて評価情報を作成する。また、端末のカメラによって撮影した画像を添付して送信することも可能である。

安否情報画面のキャプチャを図 2.12 (c) に示す。基本構成は口コミ画面と同様であり、画面に表示される内容が口コミ情報から安否情報に切り替わっている。図 2.12 (d) に示す、安否情報作成画面では口コミ作成画面と同様に選択と自由記述にて評価情報を作成する。

2.9.1 見守り機能

図 2.13 に見守り情報の画面表示の例を示す。図 2.13 (a) の画面では、自身が作成・発信した見守り情報がタイムラインの右側に表示され、受信した身内の見守り情報はタイムラインの左側に表示される。見守り情報として、情報発信者の名前と形成しているグループの人数、GPS により取得した位置情報が表示される。形成しているグループの人数は、周辺端末検索機能により取得される。周辺端末検索機能については、本節の次に説明する。受信した見守り情報をタッチすることで、図 2.13 (b) で示すようにアプリケーション上の地図で身内の位置情報を確認できる。また設定にて、図 2.13 (c) で示すように Android 端末に標準でインストールされている Map アプリケーションで表示するか、Map を画像で表示するかを選択することができる。

図 2.13 (a) の画面に表示されている見守り情報は、情報の取得時に記録されている作成時間をもとに自動で並び替えられる。また、表示している見守り情報の重複が発生し

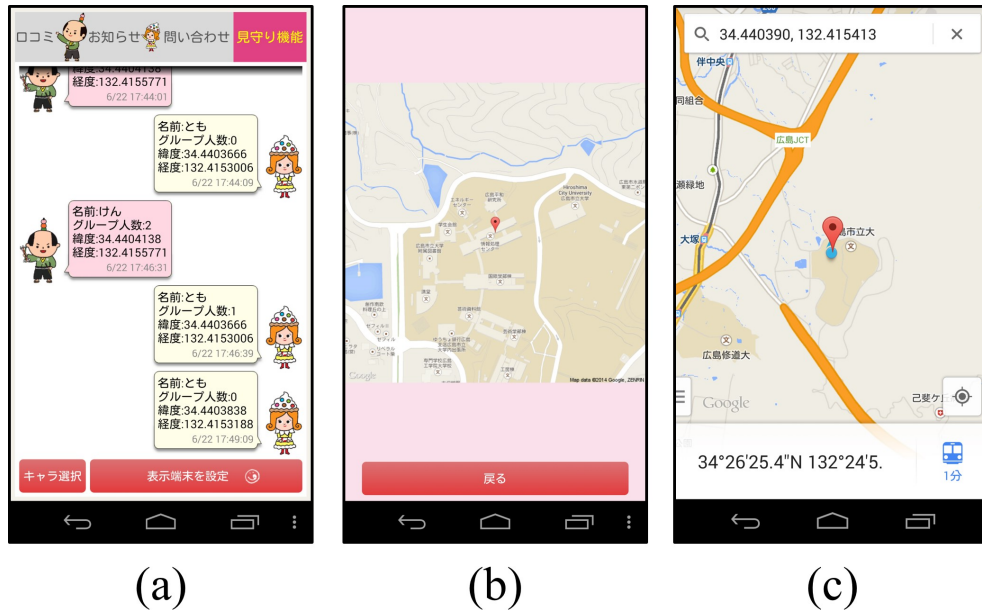


図 2.13: 見守り機能の画面デザイン

ないように、情報内に記録されている作成時間と端末 ID により確認が行われる。

2.9.2 周辺端末検索機能

Bluetooth の電波到達範囲は 10m から 100m であり、その値は通信環境に応じて変動する。そのため、ユーザが複数人でグループを形成している場合に、Bluetooth の電波到達範囲外にいるグループメンバを検出できない問題が発生する。この問題を解決するため、平常時災害時両用システムのマルチホップ転送機能を用いて、隣接端末台数を確認する周辺端末探索機能を実装した。

図 2.14 に周辺端末探索機能のイメージを示す。端末 A は、電波到達範囲 A' 内に存在する隣接端末 B と C に対して、グループメンバ探索 packets を Bluetooth MANET に基づくマルチホップ転送にて送信する。隣接端末 B と C は、端末 A の探索 packets を受信した際にタイマをセットし、タイムアウトした時に端末 A へ応答 packets を返信する。さらに、隣接端末 B と C は、端末 A の探索 packets を自身の隣接端末へとマルチホップ転送を用いて転送する。探索 packets には転送回数が記録されており、各端末は受信した探索 packets の転送回数に応じてセットするタイマの待ち時間を決定する。本機能は、転送回数が増えるにしたがって応答 packets を送信するまでの時間間隔が短くなるように設計している。端末 A は、探索 packets に対する応答 packets の受信数により周辺端末台数を確認する。

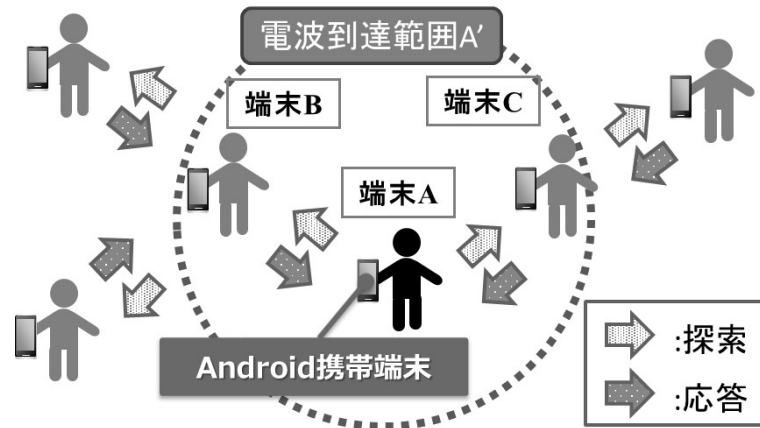


図 2.14: 周辺端末検索機能のイメージ

2.10 平常時災害時両用システムにおけるデバイス層の拡張

2.10.1 概要

平常時災害時両用システムのデバイス層では図 2.5 で示したように、Bluetooth 2.1 + EDR と Bluetooth 4.0 から追加された BLE を用いて隣接端末と通信して MANET の構築を行っている。しかし、Bluetooth 通信は電波到達範囲の制限が大きいため、形成されるネットワークは地理的に局所的である。そのため、端末密度が低い環境や送信元端末と宛先端末間距離が長い場合などは通信が困難であるという問題や、情報の伝達頻度、伝達遅延などの課題が存在する。そのため、2.10 節では、無線インフラストラクチャ通信機能である 3G・LTE 通信を安定的に利用可能な平常時における効率的な MANET の運用を目的とし、近距離無線ネットワークである Bluetooth MANET と 3G や LTE 通信を併用し、局所的な MANET 間の相互接続を保障するデータ転送方式を説明する。

本データ転送方式では、データ転送時の通信方式を Bluetooth MANET による通信と 3G・LTE 通信から、端末間接続品質をもとに自動的に選択・切り替える。端末間接続品質はホップ数や端末間距離、データ転送遅延時間などにより評価可能であるが、本データ転送方式では GPS 機能により取得した位置情報をもとに端末間距離を算出し、通信方式を自動的に選択し・切り替えを行う。

2.10.2 3G・LTE 通信と Bluetooth 通信を組み合わせたデータ転送方式

本データ転送方式では、ある MANET が存在している位置情報を端末の GPS 機能を用いて取得し、3G・LTE 通信により MANET 間で位置情報を共有することで効率的なネットワーク形成を実現する。さらに、本データ転送方式では MANET 間で位置情報を

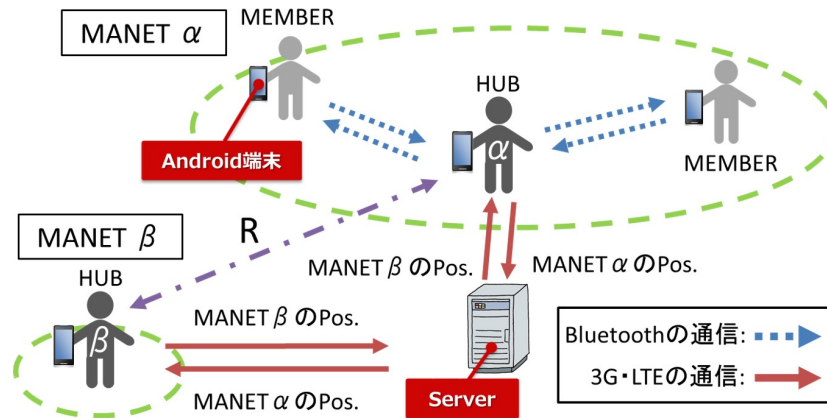


図 2.15: 3G・LTE 通信と Bluetooth 通信を組み合わせたデータ転送方式の動作イメージ
共有する際、全体の消費電力の削減を目的として MANET 内の代表端末 (HUB) を選択し、HUB のみが 3G・LTE 通信を用いて MANET の位置情報やその他のデータなどを送受信する。HUB に選出された端末が MANET の位置情報の収集やメンバの管理を代表して行い、MANET 内の 3G・LTE 通信量を削減して MANET 全体の長寿命化を行う。

本データ転送方式の動作イメージを図 2.15 に示す。各 MANET は位置情報 (Pos.) を 3G・LTE 通信を用いて位置情報管理サーバに送信し、他の MANET と共有する。各 HUB は共有した位置情報をもとに、MANET 間の距離と方位を計算し、周辺に他の MANET が存在していないかを確認する。また、HUB は定期的に MANET 内に Bluetooth 通信を用いたメンバ確認メッセージを送信し、MANET 内に存在する HUB 以外の端末 (MEMBER) を確認・管理する。

MANET の結合

図 2.15 において、MANET α と MANET β の各 HUB が事前に設定した距離 R 内まで接近した場合、各 HUB は自身の MEMBER 数を記録したメンバ確認メッセージを Bluetooth 通信により送信し、他の MANET との結合を図る。本データ転送方式では、メンバ確認メッセージの交換により各 MANET の MEMBER 数の比較を行い、MEMBER 数が多い MANET を存続させている。図 2.15 では、MANET α に存在する MEMBER 数が自身の MANET よりも多い HUB β は、Bluetooth 通信により応答メッセージを HUB α へ向けて送信し、MANET α へ合流する。その際、MANET β の HUB はその状態を MANET α の MEMBER へと変更する。また、MEMBER 数が同じ場合は、生成時刻の早いメンバ確認メッセージを送信した MANET へ他の MANET が合流する。

表 2.2: 実装と評価実験で用いた端末の主な仕様

名称	Android OS	通信デバイス
Galaxy S3	4.1.1 (Jelly Bean)	Bluetooth 4.0
Galaxy Note2	4.1.1 (Jelly Bean)	Bluetooth 4.0
Nexus 7	4.2.1 (Jelly Bean)	Bluetooth 4.0
Galaxy J	4.3 (Jelly Bean)	Bluetooth 4.0

MANET からの離脱

HUB から送信されるメンバ確認メッセージを受信できない MEMBER は自身の状態を HUB へ変更し、自身の MANET を作成する。自身の状態を HUB に変更した端末は 3G・LTE 通信を起動し、自身の MANET の位置情報を位置情報管理サーバに送信し、他の MANET と位置情報共有を開始する。

2.10.3 3G・LTE 通信と Bluetooth 通信を組み合わせたデータ転送方式の性能評価

本節では、2.10 節で説明した、3G・LTE 通信と Bluetooth 通信を組み合わせたデータ転送方式の性能評価を行う。通信方式の違いによるデータ転送遅延時間の差に関する評価実験を行うために、Android OS を搭載するスマートフォン上に 3G・LTE 通信と Bluetooth 通信を組み合わせたデータ転送方式の実装を行った。評価実験に用いた端末の仕様を表 2.2 に示す。実装と評価実験には Android 4.1.1 - 4.3 の OS をもち、通信デバイスが Bluetooth4.0 であるスマートフォンを計 11 台用いた。

2.10.4 実験方法

実験では、Bluetooth MANET を用いた通信 (方式 1) と 3G・LTE 通信 (方式 2) のデータ転送遅延時間について 50m, 100m, 150m の距離別に測定し、通信方式による通信時間の比較を行った。方式 1 では、各測定距離だけ離して配置した直線上に 15m 間隔で中継端末を配置した。方式 2 では、3G・LTE の移動体通信網内での遅延時間、及び本実験に際し構築した HTTP サーバへ各端末が情報要求を行うまでのパラメータが通信時間に大きな影響を与えることが考えられる。本実験では各端末は 10,000ms 間隔で HTTP サーバのデータ更新、及びデータ取得を行う設定とした。実験は見通しの良い広島市立大学の陸上競技場で行い、ショートメッセージを LTE 通信と Bluetooth 通信を用いて送信し、宛先までの転送時間を測定した。

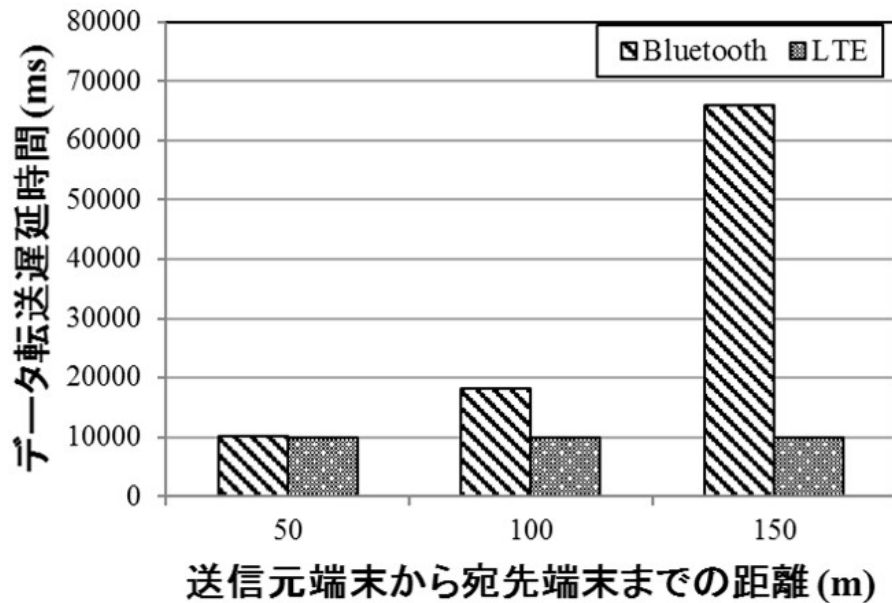


図 2.16: 距離別におけるデータ転送遅延時間の比較結果

2.10.5 実験結果と考察

図 2.16 に実験結果を示す。実験結果より、各手法ともに 50m 先の宛先端末には約 10,000ms の遅延でデータ転送できていることが確認できる。方式 1 では、送信元端末から宛先端末までの転送距離が長くなるに従って遅延時間が増加している。転送距離が長くなることで中継端末数が増え、ホップ数の増加やコネクション切断と再確立などの発生回数の増加により、遅延時間も増加したと考えられる。また、方式 2 では各距離とも同様な遅延時間になると確認できた。方式 2 では移動体通信網内の遅延時間は僅かであり、サーバの情報更新やデータ取得間隔が支配的な通信の遅延時間となることが確認できた。これは、端末側で 3G・LTE 通信を行う頻度が多い場合にはごく僅かな遅延でデータ伝搬が可能である一方、Bluetooth などの近距離無線よりも消費電力が多い 3G・LTE 通信頻度が増えることで、各端末の消費電力が増加することが考えられる。災害時には端末を十分に充電できる環境が存在する場合や、基地局などの通信設備が被災していない場合には 3G・LTE の通信を利用し、基地局などが被災した場合や電池残量を考慮する必要がある場合には Bluetooth MANET を用いた情報配信が有効であると考えられる。

2.11 まとめ

本章では、アシュアランスネットワーク設計原理に基づく平常時災害時両用システムのシステムアーキテクチャを提案した。平常時災害時両用システムはデバイス層とルー

ティング層，アプリケーション層の3層からなる階層構造であり，各層が異なる機能を有するシステムアーキテクチャである．また，平常時災害時両用システムは共通のアーキテクチャに2種類のモードを搭載し，情報伝送方式の統一と対応関係を持った GUI の設計により平常時に利用していたサービスアプリケーションを災害時にも利用できるように円滑に移行できる．また，実機を用いた動作確認によって，ユーザ操作によるモード切り替えと安否情報の送信，安否情報のリアルタイム伝送と蓄積伝送による自動モード切り替え機能を確認した．さらに，災害時においても基地局など通信設備が利用可能な場合が存在することを考慮し，MANET が存在している位置情報を端末の GPS 機能を用いて取得し，3G・LTE 通信により異なる MANET 間で位置情報を共有することで効率的なネットワーク形成を目的とした，3G・LTE 通信と Bluetooth 通信を組み合わせたデータ転送方式を提案した．

今後の課題として，平常時・災害時モードの最適な情報保持時間の検討による情報伝搬の効率化，災害時モードにおけるパケットサイズの上限やパケットのリサイズ方法などの検討などを行い，システムの完成度を高めることが挙げられる．

第3章 Classic Bluetooth と Bluetooth LEを併用した高速コネクション確立手法の提案と性能評価

3.1 はじめに

Bluetooth 通信はコネクション指向の通信であり，端末間で通信するためには端末間のコネクション確立が必要である．Bluetooth MANET は端末間の Bluetooth 通信のみでネットワーク構築やデータを共有する．そのため，MANET のデータ普及性能やデータ伝搬速度が，端末間のコネクション確立性能や構築できるネットワークの規模に強く依存している．しかし，文献 [24] によると，Classic Bluetooth (Classic) の周辺に存在する端末の検出プロセスと，コネクション確立プロセスに存在する端末状態の制約により，隣接する端末を検出できないことや，端末間のコネクション確立ができない場合があることが示されている．また，文献 [25] や文献 [26] では，端末密度が高い環境で Bluetooth の通信を行った場合，使用可能な周波数帯域の制限により，電波干渉が避けられずに通信の切断が発生することが示されている．

本章では，隣接する端末の検出プロセスに存在する課題を解決し，電波干渉による一時的なコネクション切断が発生した場合でも，高速にコネクションを再確立することで Bluetooth MANET の高可用化を実現するための，Classic と Bluetooth Low Energy (BLE) を併用したコネクション確立手法を提案する．また，提案手法が Bluetooth のコネクション確立に要する時間と，Bluetooth MANET の構築に与える影響について，実機と計算機シミュレータを用いた評価実験により確認する．

3.2 研究背景

3.2.1 Classic Bluetooth のコネクション確立における課題

Classic のコネクション確立手順には検出プロセスと確立プロセスが存在し、さらに各プロセスには二つの状態がそれぞれ存在する。Bluetooth MANET では端末の移動や電波干渉によるコネクション切断が発生するため、ネットワークを自律的に構築するために二つのプロセスを自動的に実行する機能が必要となる。しかし、2.2.6 で述べたように、Classic では検出プロセスと確立プロセスに存在する4種類の状態において、いずれか一つの状態となる制約が存在するため、端末間で自動的にコネクションを確立する際に端末間で状態の衝突が発生する課題が存在する。状態の衝突の一つ目は、Inquiry の状態である端末を検出できないという、検出の衝突である。二つ目は、確立プロセスを実行している端末を検出できないという、検出と確立の衝突である。この課題を回避するために、各端末が Inquiry と Inquiry Scan の状態を交互に切り替え、さらに Inquiry と Inquiry Scan の状態となる継続時間を毎回変更して自律的にコネクションを確立する手法 [24] が提案されている。しかし、この衝突回避手法では検出の衝突や、検出と確立の衝突の課題を排除することができないため、端末間の状態の衝突が発生し、コネクション確立までに時間を要する場合がある。

3.2.2 Bluetooth Low Energy と Classic Bluetooth の違い

BLE と Classic では検出プロセスの隣接する端末の検出方法が異なる。Classic では図 3.1 の (a) に示すアクティブスキャンの方式を用いて、隣接する端末の検出を行っている。この方式では、Inquiry の状態である端末 A が隣接する端末を検出するために、検出パケットを定期的を送信する。検出パケットを受信した Inquiry Scan の状態である端末 B が応答パケットを送信することで、端末 A は端末 B の検出を完了する。Classic では Inquiry と Inquiry Scan のどちらか一方の状態となる制約のため、3.2.1 で示した衝突が発生する。一方、BLE では図 3.1 の (b) に示すパッシブスキャンの方式を用いて、隣接する端末の検出が可能である。この方式では、Advertiser である端末 B が Advertising パケットをブロードキャストする。このとき、Scanner である端末 A が隣接する端末のスキャンを行うことで端末 B のパケットを検出し、端末 A は端末 B の検出を完了する。BLE では Advertiser と Scanner の両方の役割を同時に振る舞うことが可能なため、3.2.1 で示した衝突が発生せず、Classic と比較して隣接端末をより高速に検出できる確率が高くなる。

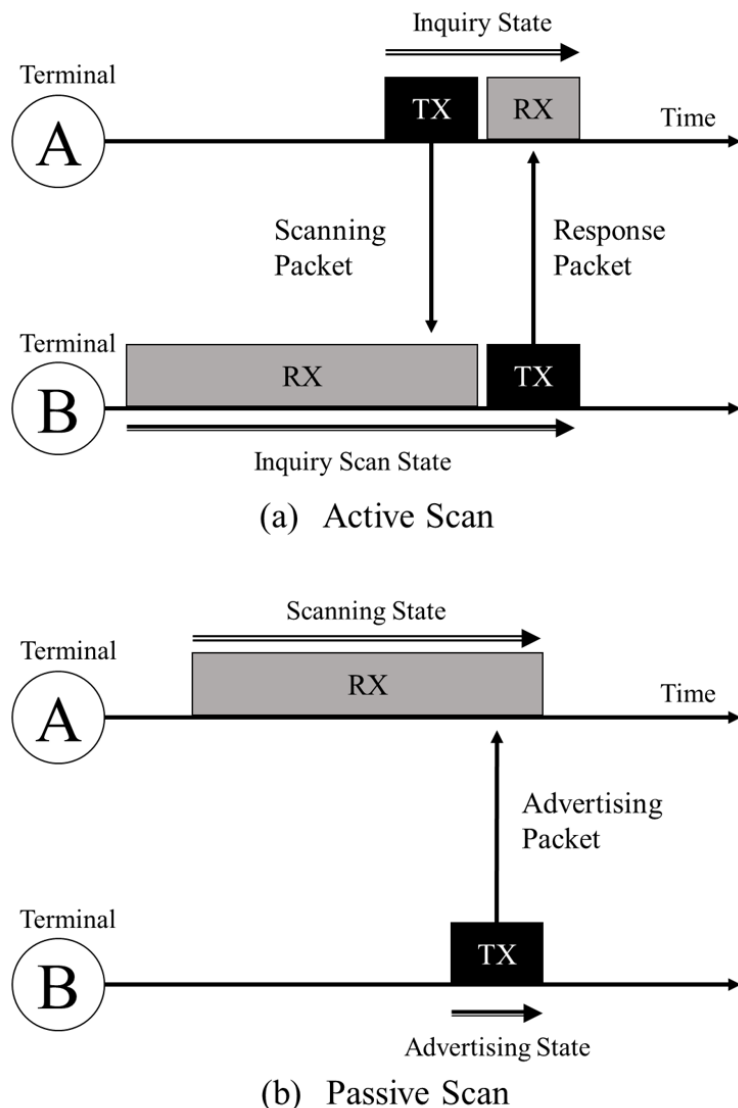


図 3.1: アクティブスキャンとパッシブスキャン

パッシブスキャンでは、隣接する端末からのパケットを受信することで隣接端末を検出するため、アクティブスキャンよりもパケットの交換回数が少なく、素早く検出プロセスを完了できる長所がある。一方、アクティブスキャンでは、検出パケットへの応答パケットを隣接端末から受信することで検出プロセスを完了できるため、隣接端末が存在しない場合でも定期的にパケットを送信する必要があるパッシブスキャンとは異なり、パケットの送信回数を削減できる長所がある。例えば、図 3.1 の (b) に示すパッシブスキャンの方式では隣接端末を検出するために、各端末は定期的に Advertising パケットを送信するが、図 3.1 の (a) に示すアクティブスキャンの方式では、Inquiry の状態である端末が検出プロセスを開始した時のみパケットを送信している。

3.3 提案手法

3.3.1 概要

3.2.1では Classic のコネクション確立手順において、端末間の状態が衝突する課題を説明し、その課題を回避して自律的にコネクションを確立する手法(従来手法)を2.7.4において述べた。Bluetooth MANET は各端末が隣接する複数の端末との間で、従来手法などのコネクション確立手法を用いることで、自律的にネットワークを構築している。従来手法では、各端末が状態の継続時間を変更することで状態の衝突を回避するため、端末間で状態の衝突が発生することを排除できず、端末間で状態の衝突が発生した場合には、衝突が解消されるまで待つ必要がある。そのため、衝突の解消までに時間を要し、Bluetooth MANET の構築に要する時間や、構築できるネットワークの規模にも影響を及ぼすことが考えられる。本論文では、従来手法に存在する課題を排除するために、隣接端末の検出プロセスは BLE により実行し、Classic は確立プロセスのみを実行する、BLE と Classic を併用したコネクション確立手法を提案する。

3.3.2 BLE と Classic を併用したコネクション確立手法

提案するコネクション確立手法は、隣接する端末の検出と Classic のコネクション確立に必要な情報の共有に BLE の通信を利用することで、Classic のコネクション確立手続きでは検出プロセスを実施せず、BLE により検出した隣接端末との間で Classic のコネクションを確立する手法である。提案手法では BLE の検出プロセスを利用することにより、Advertiser と Scanner の両方の役割を同時に振る舞うことが可能という BLE の特徴から、従来手法に存在する検出の衝突や、検出と確立の衝突という課題を排除しながら隣接する端末の検出が可能となる。提案手法の検出プロセスでは、各端末が Advertiser の役割として常時 Advertising パケットを一定間隔でブロードキャストし、Scanner の役割として一定時間のスキャン実行と、一定時間のスキャンを停止する状態を繰り返し実行する。これは、端末の電力消費と端末間の電波干渉発生を抑えるために、Scanner は常時スキャンを実行するのではなく、一定時間のスキャン停止状態を挿入している。また、Classic のコネクション確立に必要な情報の共有を行うために、GATT による通信を利用することで Classic の検出プロセスを省略することが可能となる。その後、端末間で BLE のコネ

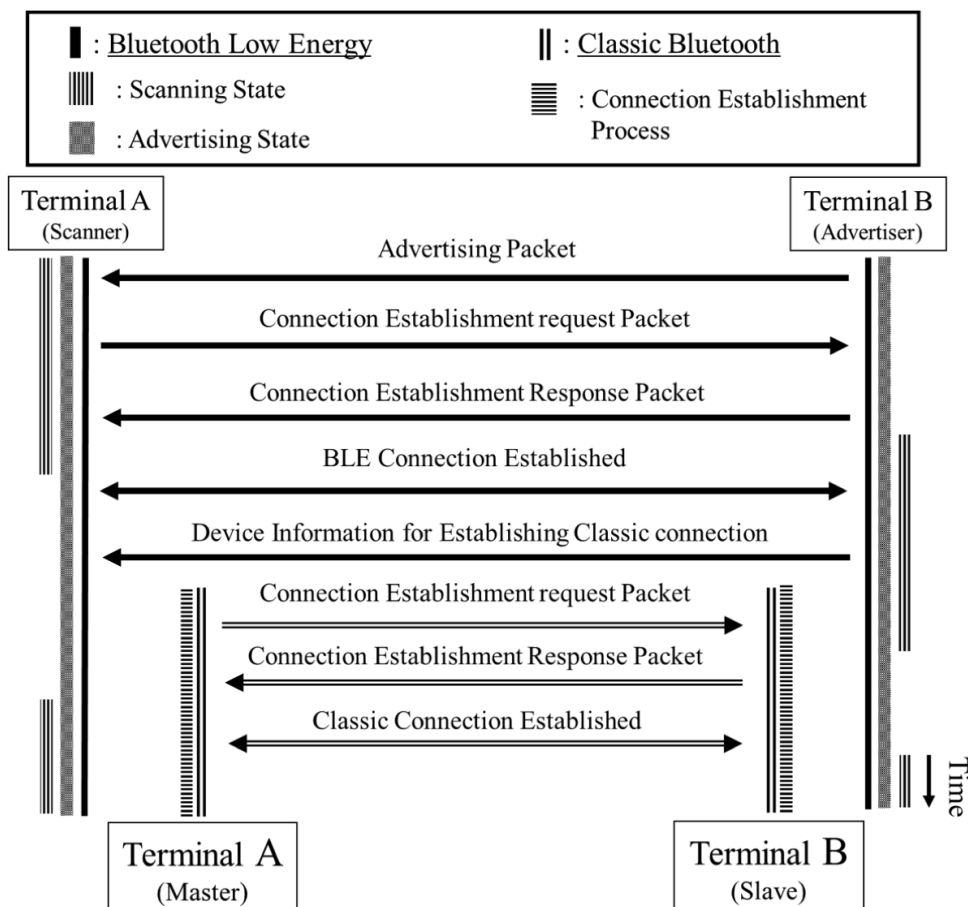


図 3.2: 提案手法の接続確立手順

クションを切断し、Classic の確立プロセスのみを実行することで、端末間の接続を確立する。

図 3.2 に提案手法による接続確立の手順を示す。この時、各端末は互いに通信可能範囲内に存在しているものとする。Advertiser である端末 B が Advertising パケットをブロードキャストする。Scanner である端末 A が隣接する端末のスキャンを行うことで、通信可能範囲内に存在する端末 B のパケットを検出する。この時、端末 A は確立プロセスを開始し、検出した端末 B へ BLE の接続確立要求パケットを送信する。端末 B は端末 A からの接続確立要求パケットに対し、応答パケットを送信することで BLE の接続が確立する。端末 B は、端末間で BLE の接続確立後に、Classic の接続確立に必要な情報を GATT による通信で端末 A へ送信し、端末間の BLE 接続を切断する。端末 A は GATT による通信で接続確立に必要な情報を受信し、その情報をもとに端末 B へ対して Classic の接続確立要求パケットを送信する。端末 B が接続確立要求パケットを受信すると、端末 A に対して応答パケットを送信することで、端末 A と B 間で Classic の接続が確

第3章 Classic Bluetooth と Bluetooth LE を併用した高速コネクション確立手法の提案と性能評価
立する。提案手法では Classic の検出プロセスを実施しないため、すべての端末は Classic の確立プロセスのコネクション確立要求パケットを受信する状態で待機する。

3.3.3 コネクション確立後のデータ転送

提案手法では隣接する端末の検出に BLE を利用し、Bluetooth MANET 内の端末間通信には Classic を利用する。BLE を利用することで検出の衝突や、検出と確立の衝突の発生を排除し、Classic と比較して隣接端末の検出に成功する確率が高くなる利点がある一方で、端末間の通信速度が Classic よりも大幅に遅いという欠点も存在する。Bluetooth の仕様では、Classic の最大実効速度が約 2.1Mbps なのに対し、BLE の最大実効速度は約 260kbps と 8 倍以上の速度差が存在する。そのため、Bluetooth MANET では画像データを含む様々なデータを共有するために、端末間のデータ転送は Classic の通信を利用することが望ましいことから、提案手法では BLE を隣接する端末の検出に利用し、Classic を端末間のデータ転送に利用している。

3.4 実機による評価実験

3.4.1 実験目的

端末間のコネクション確立に要する時間の短縮効果を確認するために、Android 端末上に提案手法と従来手法を実装し、端末間のコネクションが確立されるまでの時間を測定する実験により評価した。評価項目は端末間のコネクション確立に要する時間 (T_E) と、実験時間内に端末間のコネクションが確立され、端末間の通信が行える状態 (稼働状態) の時間 (T_A) であり、提案手法と従来手法において T_E と T_A を測定した。

3.4.2 実験方法

2 台の端末を用いて実験を行い、各端末の通信範囲内に隣接する端末が存在するように配置する。端末間のコネクションが確立されるまでの時間である T_E を測定するために、端末間のコネクションを自動的に切断する機能を実装した。確立された端末間のコネクションは、事前に決定した時間の経過後に切断され、コネクションが再確立されるまでは端末間で通信不可能となる。コネクションを切断する時間は、事前に設定する切断時間間隔に含まれる時間内からランダムで決定される。例えば、切断時間間隔を 15 秒から

表 3.1: 実装に用いたパラメータ

Parameter	value
Inquiry State time	3s
Inquiry Scan State time	7~10s
Scanning State time	3s
Waiting State time	1s
Disconnection time interval	15~25s

25 秒に設定した場合は、15 秒から 25 秒までの時間内からランダムで秒数を決定し、コネクションの確立から決定した時間の経過後にコネクションを切断する。端末間のコネクションをランダム時間の経過後に切断する機能により、端末の移動や端末間のコネクションが電波干渉などにより一時的に切断されることで、端末間の接続状況が頻繁に変化する Bluetooth MANET の環境を端末を移動させずに模擬する。この機能を用いて端末間の接続状況を頻繁に変化させ、実験時間内に端末間のコネクションが確立している累計時間である T_A を測定することで、各手法におけるネットワークの可用性を評価する。

3.4.3 実験環境

表 3.1 に、提案手法と従来手法を Android 端末上へ実装した際に用いたパラメータを示す。従来手法において各端末が Inquiry の状態となる時間は 3 秒間とし、Inquiry Scan の状態となる時間は 7 秒から 10 秒の間からランダムで決定する。各端末は Inquiry と Inquiry Scan の状態を交互に切り替え、隣接する端末の検出とコネクション確立を行う。Inquiry Scan の状態である時間がランダムで決定されることにより、隣接する端末と端末状態が衝突している場合においても、端末間で状態遷移の周期がずれることで隣接する端末の検出が可能となる。また、提案手法において Scanner の端末が Scanning の状態となる時間は 3 秒間とし、次に Scanning の状態を開始するまでの待機状態である時間は 1 秒間とした。 T_A を測定する実験の切断時間間隔は 15 秒から 25 秒と設定した。

実験で用いた端末は 2 種類であり、適宜混在させて実験に用いた。各端末の仕様を表 3.2 に示す。また、実験を行った場所は広島市立大学屋内であり、Bluetooth と同周波数帯の電波 (2.4GHz 帯の IEEE802.11g/n など) が混在する環境である。

表 3.2: 実験に用いた端末の仕様

Name	OS	Bluetooth version
Zenpad 3 8.0	6.0 (Marshmallow)	Bluetooth 4.1
Nexus 9	7.1 (Nougat)	Bluetooth 4.1

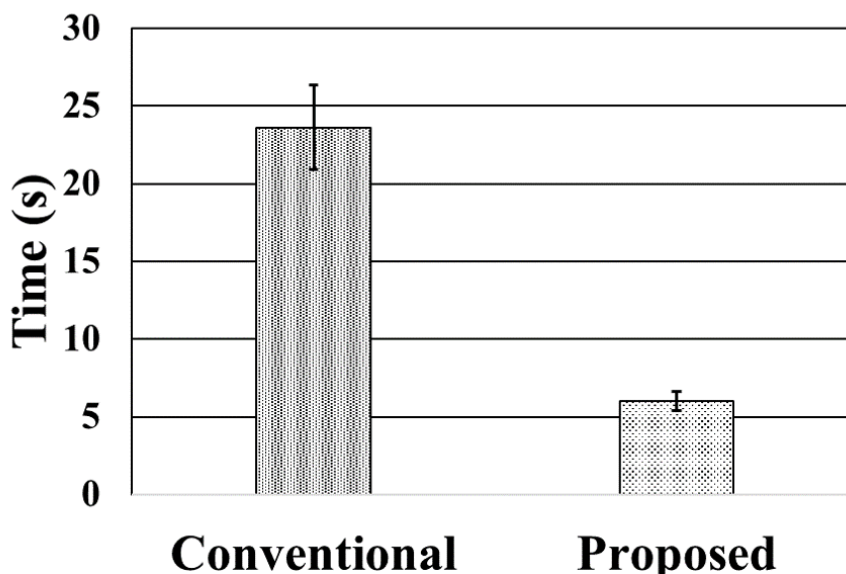


図 3.3: 各手法における接続確立時間

3.4.4 実験結果

図 3.3 に各手法における接続確立時間を示す。各手法において T_E の測定を 200 回試行し、平均値と 90%信頼区間を算出した。縦軸を接続確立に要した時間とし、横軸に各手法を示す。図 3.3 の結果より、提案手法が従来手法よりも T_E を約 75%短縮していることが確認できた。これは、提案手法と従来手法で隣接する端末の検出方法が異なることに起因すると考えられる。従来手法では Inquiry と Inquiry Scan を交互に切り替えて隣接する端末の検出と接続確立を実行しているが、提案手法では BLE により周辺端末の検出を行い、検出した端末との間で Classic の接続確立する。従来手法の接続確立手順では、3.2.1 で説明した検出の衝突や、検出と確立の衝突が発生する。しかし、提案手法では BLE の有する、Advertiser と Scanner の両方の役割を同時に振る舞うことが可能という特徴を利用し、従来手法の課題を解消することで T_E を大幅に削減できたと考えられる。

図 3.4 は、実験時間内で端末間の接続が確立されていた累積時間を示す。実験時間は 900 秒であり、切断時間間隔に含まれる時間内からランダムで決定された時間の経過後に端末間の接続を切断し、端末間の接続再確立を繰り返した時

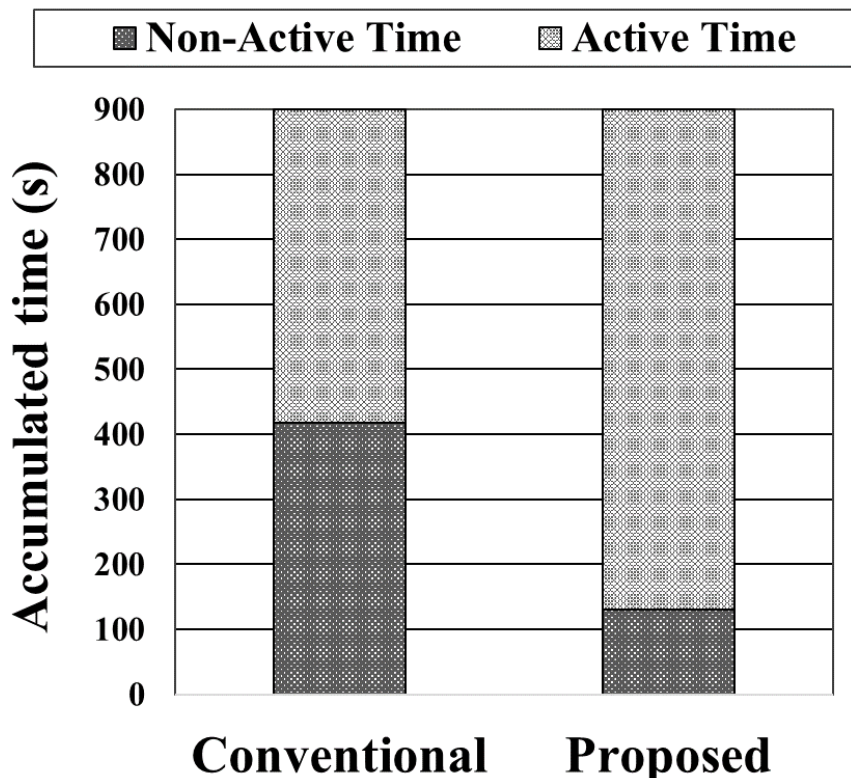


図 3.4: 各手法における MANET 稼働状態の時間

の T_A を測定した。縦軸を評価実験の累積時間とし、横軸は各手法を示す。図 3.4 の結果より、提案手法が従来手法よりも、 T_A を実験時間の約 32% 向上でき、端末間接続の可用性向上に効果があることを確認できた。また、実験時間内に端末間の接続が確立できている時間の割合は、従来手法で約 54% となり、提案手法は約 85% であった。端末間の接続が確立できている時間の割合が、提案手法よりも従来手法では低下した理由として、各端末の Inquiry と Inquiry Scan の状態が衝突することで、検出の衝突や検出と確立の衝突が発生し、端末間の接続再確立までに時間を要したからと考えられる。

3.4.5 追加実験

3.4.4 節の実験では 2 台の端末を用いて評価実験を行った。従来の接続確立手法では検出と接続の衝突が発生したため、提案する接続確立手法よりもネットワークの稼働率の低下が確認できた。そこで、端末数がネットワークの稼働率に与える影響を確認するために、評価実験に用いる端末数を 1 台増やして追加実験を行った。

追加実験における各手法のパラメータは表 3.1 に示したパラメータと同じとする。ま

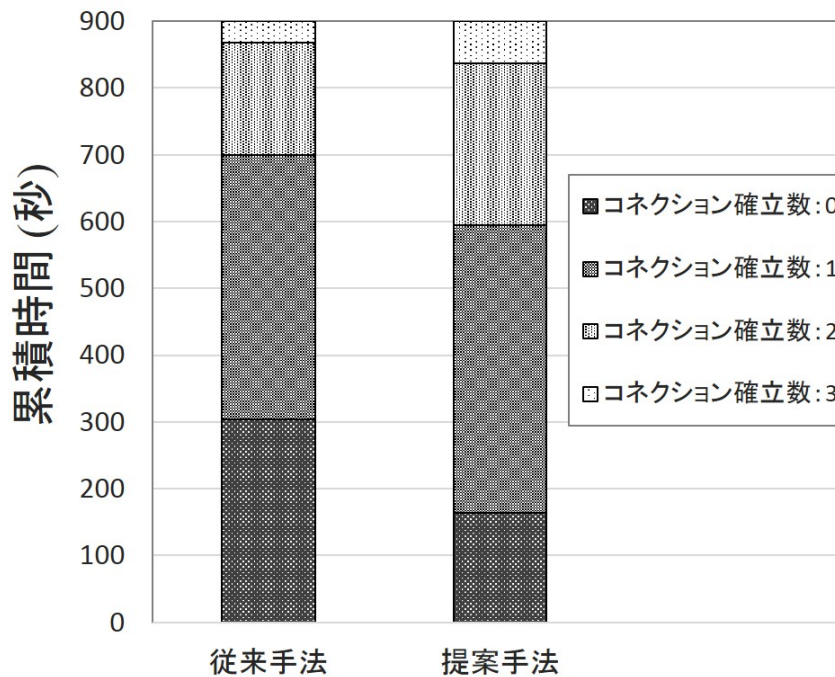


図 3.5: 各手法における稼働状態の時間

た, 表 3.2 に示す端末の中から, 従来の接続確立手法では Galaxy S3 を 1 台, 提案する接続確立手法では Nexus 9 を 1 台を追加して実験を行った.

3.4.6 追加実験結果

図 3.5 に各手法における稼働状態の時間を示す. 各手法において 15 分間で T_A を測定した. 縦軸を評価実験の累積時間とし, 横軸は各手法を示す. 結果から提案する接続確立手法が従来の接続確立手法よりも, 端末間の接続がすべて切断されている時間を約 16%程短縮していることを確認できた. また, 提案する接続確立手法は従来の接続確立手法に比べて, 接続が確立している本数が 1 本の時は T_A が約 4%程, 2 本の時は T_A が約 8%程, すべての接続が確立している時は T_A が約 3%程増加していた. このとき, 従来の接続確立手法において 1 本以上の接続が確立している時のネットワークの稼働率は約 66%であり, 提案する接続確立手法では約 82%であった.

従来の接続確立手法では, 端末数が 2 台の時に比べて 1 台追加すると端末間の接続がすべて切断されている時間が約 13%程短縮している. これは, 端末数が増加したことで検出の衝突や検出と接続の衝突が発生する確率が低下したことが理由であると考えられる. また, 提案する接続確立手法では, 端末数が 2 台の時に

比べて1台追加すると端末間のコネクションがすべて切断されている時間が約3%程微増している。これは、BLE と Classic を併用する時に互いの通信に影響を及ぼし、BLE や Classic におけるコネクション確立の失敗や BLE における Advertising パケットの検出に失敗したためであると考えられる。そのため、この問題は提案するコネクション確立手法を実装する際に、互いの通信に影響を与えないようにすることで回避できると考えられる。

3.5 シミュレーションによる評価実験

3.5.1 実験目的

3.4の評価実験では、端末間のコネクションを切断してから再確立までに要する時間と、実験時間内で端末間のコネクションが確立している累計時間を、提案手法と従来手法でそれぞれ測定した。その結果、提案手法は従来手法と比較してコネクション確立に要する時間を約75%短縮し、コネクション確立済み時間も大幅に向上できることを確認した。MANETは常に端末が移動することでネットワークトポロジが頻繁に変化し、端末間のコネクション確立数が端末の移動速度や、隣接する端末の密度により大きく変化する特徴がある。しかし、実機による実験では多数の端末を同時に移動させた評価は困難であり、端末の移動速度や端末密度が端末間のコネクション確立数に与える影響を評価し難い。そこで、Bluetooth MANETの環境を大まかに再現するシミュレータにより、端末の移動速度や端末密度を変化させ、提案手法と従来手法がBluetoothのコネクション確立数に及ぼす影響を確認するための評価実験を行う。本実験で用いるシミュレータは、Bluetoothのコネクション確立に要する時間を反映することや、他の既存研究で解析・調査されているClassicやBLEのパケットロスの状況を設定すること、Bluetoothの仕様に記載されている送信電力と受信感度から最大の通信半径を設定できる機能を持つ。

3.5.2 シミュレーション条件

評価指標はフィールド上に存在する全端末が一定速度で移動し、実験時間内において各端末が隣接する端末との間で確立したコネクション数の平均値とする。表4.4にシミュレーション実験で利用したパラメータを示す。評価実験は100m×100mの正方形の見通

表 3.3: シミュレーション条件

Simulator	QualNet ver.5.0.2 [38]
Field size	100m×100m
Number of terminals	32, 63, 95, 125
Average number of adjacent terminals	5, 10, 15, 20
Initial position	Uniform random
Mobility model	Random Waypoint [39]
Speed of mobile terminals	1km/h, 3km/h, 5km/h, 7km/h, 9km/h
Path loss model	Two ray ground reflection
TX power	4dBm
Receiver sensitivity	-70dBm
Inquiry state time	3s
Inquiry scan state time	7~10s
Scanning state time	3s
Waiting state time	1s
Packet loss rate (Classic)	2.5%, 10%, 17.5%, 25%
Packet loss rate (BLE)	0.5%, 1.1%, 1.6%, 2.2%
Simulation time-length	900s
Number of trials	50

しの良いフィールドで、実験の端末密度を変化させるために、実験に用いる端末数を 32 台から 125 台までの 4 種類用意し、フィールド上へ一様に配置した。評価実験ではフィールド上を全端末が与えられた速度で Random Waypoint の移動モデルに従い、コネクションが未確立である隣接端末とのコネクション確立手続きを常に実行する。端末の移動速度は、人間が乗り物を利用せずに移動することを想定して、1km/h から 9km/h までの 5 段階に設定した。Bluetooth のコネクション確立に関する提案手法と従来手法の各種パラメータは、実機による実験で設定した値と同様にした。

物理層のモデル化は Bluetooth の仕様 [21] と [8] を基に設定し、Bluetooth の電波伝搬モデルは Two ray モデルを使用する。Two ray モデルは、あらかじめネットワークシミュレータの QualNet に実装済みのものを利用した。本実験では Bluetooth に実装されている冗長符号化は実装せず、その代わりとして送信チャネルの衝突が発生した場合には必ずパケットロスも発生する設定とし、最も電波干渉が発生する環境において各手法の評価を実施した。また、各通信方式のエラー発生率は電波干渉などに起因するエラー発生率を調査した文献を参考に、次に示す設定とした。Classic はピコネット単位で通信に利用するホッピング周波数の決定や、送信タイミングの制御を行うため、電波干渉によるエラー発生率 $P_{classic}$ は隣接するピコネット数を n とする時、以下の式により計算できる

[40].

$$P_{classic} = 1 - \left(1 - \left(\frac{1}{79}\right)\right)^{2n} \quad (3.1)$$

Classic では 79 チャンネルの中から使用するチャンネルを一定時間毎に切り替えており、実験の端末密度に応じて隣接ピコネット数が増減し、エラー発生率も変化する。シミュレーション実験の Classic におけるエラー発生率を決定するに際し、シミュレーション実験の各端末密度において最大隣接ピコネット数の平均値を事前に確認した。例えば、平均隣接端末数が 20 の端末密度の場合、最大隣接ピコネット数の平均値は 11 であり、 $P_{classic}$ は約 25% となる。そこで、シミュレーション実験では各実験環境において最も電波干渉が発生する環境を想定して、Classic のエラー発生率を設定した。BLE では全 40 チャンネルをデータ転送に 37 チャンネル、Advertising パケットの送信に 3 チャンネルを割り当てている。特に Advertising パケットの送信には 3 チャンネルのみ割り当てられているため、データ転送に比べてエラー発生率が高くなる。BLE の Advertising パケットの送信におけるエラー発生率 P_{ble} は、通信範囲内に存在する Scanner と Advertiser のペア数を M 、同じチャンネルの Advertising パケットが同時に送信される確率を $2\alpha/\Upsilon_a$ とする時、以下の式により計算できる [41].

$$P_{ble} = 1 - \left(1 - \left(\frac{2\alpha}{\Upsilon_a}\right)\right)^{M-1} \quad (3.2)$$

α と Υ_a は文献 [41] において $\alpha = \text{Round}(A/\Delta)$ 、 $\Upsilon_a = \text{Round}(T_a/\Delta)$ と定義されており、 A はチャンネルごとの Advertising 継続時間、 T_a は Advertising イベントの時間間隔、 Δ は単位時間スロットである。また、提案手法では全端末が Scanner と Advertiser の両方の役割を持つため、特定の Scanner である端末と、隣接する Advertiser である端末を 1 ペアとした時に隣接端末数分のペアができるため、各端末の隣接端末数と M は等しくなる。そこで、シミュレーション実験の BLE におけるエラー発生率を決定するに際し、各実験環境において最も電波干渉が発生する環境を想定して、データ転送よりもエラー発生率が高い Advertising パケットの送信におけるエラー発生率を BLE のエラー発生率と設定した。 M はシミュレーション実験の各端末密度における平均隣接端末数とし、その他のパラメータは文献 [41] と同じ設定値、及び実機の評価実験で使用した Android OS の初期設定値とした。試行回数は 50 回であり、各試行結果の平均値と 95% 信頼区間を算出した。

3.5.3 シミュレーション結果

各端末数において、端末の移動速度を変化させた場合のシミュレーション結果を図 3.6 から図 3.9 にそれぞれ示す。縦軸を実験時間内において全端末が確立したコネクション数の平均値とし、横軸は端末の移動速度を示す。結果より、提案手法を用いる場合は全ての

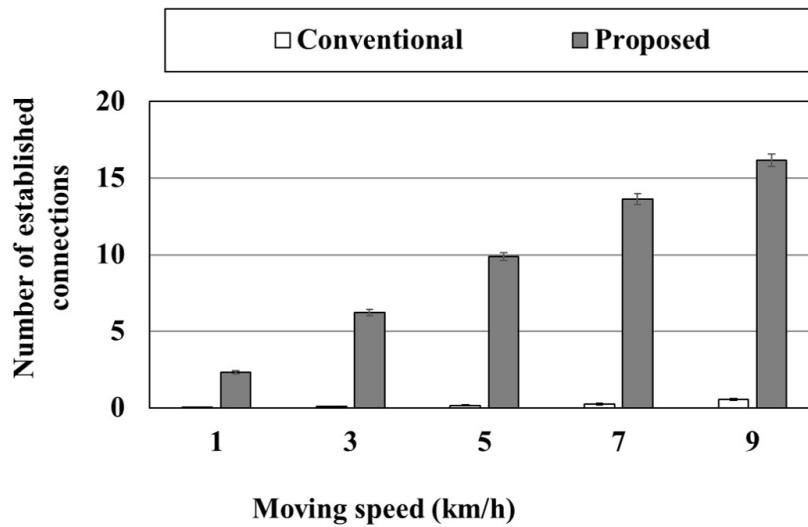


図 3.6: 平均接続確立数: 32 端末

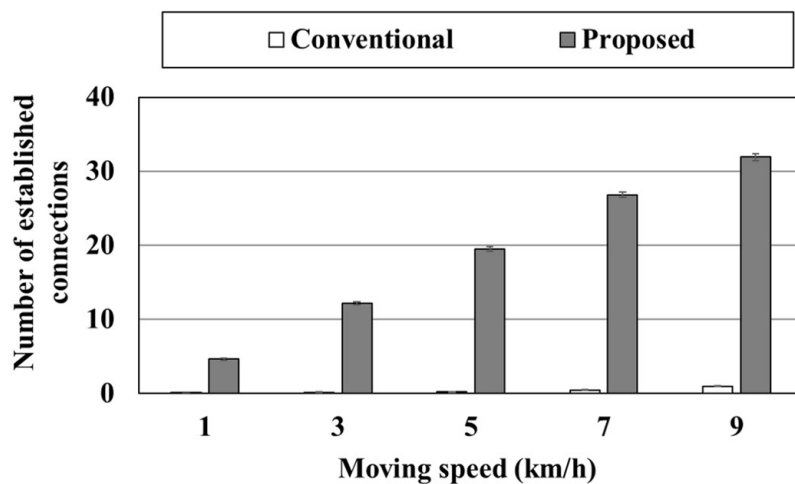


図 3.7: 平均接続確立数: 64 端末

端末数と移動速度において、従来手法よりも平均接続確立数が多くなり、端末が同時に移動する環境においても複数の接続を確立できることが分かった。提案手法では人間の歩行速度の目安である時速 5km の場合、実験時間内に確立できた接続数は、端末数が 5 台では約 9.4 台であり、端末数が 20 台では約 24 台であった。また、移動速度が歩行速度のおよそ 2 倍である時速 9km の場合、端末数が 5 台の時に約 15.4 台、端末数が 20 台では約 37.1 台の端末と実験時間内に接続を確立できた。さらに実験結果より、従来手法により端末が移動する環境下で接続を確立する場合は、端末間の接続確立が十分に行えないことが分かる。これは、従来手法の接続確立に要する時間が長く、端末移動の影響を受けることで接続確立手順を完了できないからと考えられる。

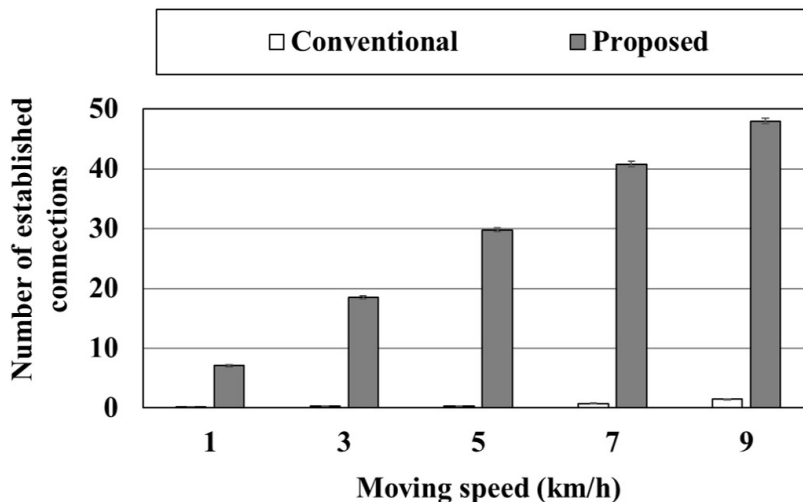


図 3.8: 平均コネクション確立数: 95 端末

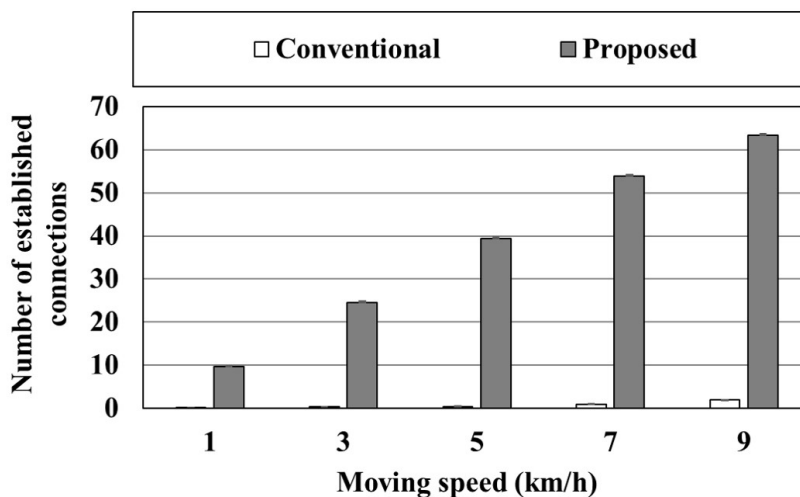


図 3.9: 平均コネクション確立数: 125 端末

各手法ともに端末移動速度が速くなるに従い、平均コネクション確立数が多くなることが確認できる。Classic では、1 台のマスタ端末に 7 台のスレーブ端末が接続することが可能であり、マスタ端末やスレーブ端末は異なるマスタ端末のスレーブ端末となることが出来る。そのため、端末が移動することで、複数の異なる端末を検出することができ、確立できたコネクション数も増加したと考えられる。これにより、人間が乗り物を利用しない移動速度の範囲においては、提案手法は端末移動の影響を受けず、端末間で高速にコネクションを確立できることが分かった。

本シミュレーション実験では、移動する端末以外はフィールド上に存在しないという環境を想定して実施した。しかし、BLE の省電力で動作可能という特徴を活用して、Advertising の機能により情報を発信するビーコンが普及しており、屋内に複数存在する環

境も想定できる。Advertising パケットのエラー発生率である P_{ble} は、通信範囲内に存在する Scanner と Advertiser のペア数により変化するため、ビーコンの存在台数に応じて提案手法のコネクション確立に要する時間が変化すると考えられる。

3.6 Beacon がコネクション確立に与える影響の評価

3.6.1 実験目的

iBeacon [42] や Eddystone [43] の登場により BLE の Advertising パケットを利用した BLE ビーコンが普及し、多種類の安価な BLE ビーコンが製品化されている。安価な BLE ビーコンが製品化されたことで、キャンペーン情報通知やクーポン配布がサービス化されるなど、BLE ビーコンが設置されている場所が増加している。また、BLE ビーコンの Advertising パケットを活用した距離測定や屋内位置測位の技術が数多く研究されており、BLE ビーコンのさらなる普及が考えられる [44]。しかし、BLE は隣接端末数の増加に応じて、電波干渉の発生率も増加することが文献 [41] で示されている。また、Advertising パケットのエラー発生率は通信範囲内に存在する Scanner と Advertiser のペア数に応じて変化することが文献 [41] で示されている。3.3 に示した提案手法では、隣接端末の検出に BLE の Advertising パケットを活用しており、通信範囲内に BLE ビーコンが多数存在する場合、電波干渉の発生により隣接端末の検出に時間を要することが考えられる。そこで、我々はネットワークシミュレータ QualNet ver.5.0 [38] を用いたシミュレーション実験を行い、BLE ビーコンが提案手法を用いた Classic のコネクション確立に与える影響を確認した。

3.6.2 シミュレーション環境

評価指標はフィールド上を一定速度で移動する端末が、隣接する端末からの Advertising パケットの受信に失敗した回数と実験時間内で確立したコネクション数の平均値である。表 4.4 にシミュレーション実験で利用したパラメータを示す。評価実験は 100m × 100m の見通しの良いフィールドで、実験時間は 900 秒とした。フィールド上の移動端末数は 32 台とし、フィールド上へ一様に配置した。また、BLE ビーコンの設置数は 0 台から 441 台までの 5 段階で変化させ、フィールド上へ等間隔な格子状に配置した。移動端末は指定された速度で Random Waypoint の移動モデルに従い、コネクションが未確立である隣接端末とのコネクション確立手続きを常時実行する。移動端末の移動速度は、人間が乗り物を利用せずに移動することを想定して 5km/h に設定した。

表 3.4: SIMULATION ENVIRONMENT.

Parameter	Value
Simulator	QualNet ver.5.0.2 [38]
Field size	100m×100m
Number of mobile terminals	32
Number of BLE beacons	0, 9, 36, 121, 441
Average number of adjacent terminals	5, 10, 15, 20
Initial position of mobile terminals	Uniform random
Position of beacons	Equidistant grid
Mobility model	Random Waypoint [39]
Speed of mobile terminals	5km/h
Path loss model	Two ray ground reflection
TX power	4dBm
Receiver sensitivity	-70dBm
Scanning state time	3s
Waiting state time	1s
Packet loss rate (Classic)	2.5%
Packet loss rate (BLE)	0.5%, 0.6%, 1.1%, 2.7%, 8.3%
Simulation time-length	900s
Number of trials	50

物理層のモデル化は Bluetooth の仕様 [8] を基に設定し、Classic と BLE のエラー率は文献 [40] と文献 [41] を参考に設定した。シミュレーション実験では各実験環境において最も電波干渉が発生する環境を想定して、Classic と BLE のエラー発生率を設定した。試行回数は 50 回であり、各試行結果の平均値と 95%信頼区間を算出した。

3.6.3 シミュレーション結果

図 3.11 に全移動端末が隣接する移動端末からの Advertising パケットの受信でエラーとなった回数のシミュレーション結果を示す。縦軸は Advertising パケットの受信がエラーとなった回数の平均値であり、横軸はフィールド上に存在する BLE ビーコンの数である。図 3.10 に示した結果より、フィールド上の BLE ビーコン数が増加するに従って advertising パケットの受信でエラーが発生する回数が増加していることが確認できる。フィールド上に BLE ビーコンが存在しない場合のエラー発生数は 12.5 回であった。フィールド上に BLE ビーコンが 9 個存在する場合のエラー発生数は 15.1 であり、441 個存在する場合の結果は 212.6 回であった。エラー数が増加した要因として、BLE ビーコン数増加するに従って BLE の電波干渉の発生頻度が増加したことが考えられる。BLE のエラー率は通信

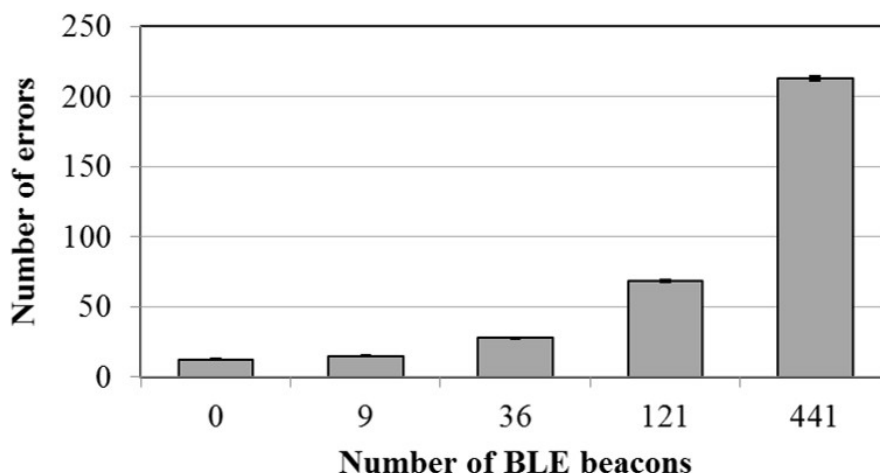


図 3.10: Average number of errors versus number of BLE beacons.

範囲内に存在する Scanner と Advertiser のペア数に応じて変化し、ペア数が増加することでエラー率も増加する。BLE ビーコンは Advertiser の役割を持つため、フィールド上の BLE ビーコン数が増加することで Scanner と Advertiser のペア数が増加し、エラー発生数も増加したと考えられる。

図 3.11 に各移動端末の接続確立数のシミュレーション結果を示す。縦軸は各移動端末が実験時間内で確立した接続数の平均値であり、横軸はフィールド上に存在する BLE ビーコンの数である。図 3.11 に示した実験結果より、フィールド上に存在する BLE ビーコン数が増えるに従って、各移動端末数の接続確立数はほとんど変化しないことが確認できる。フィールド上に BLE ビーコンが存在しない場合の接続確立数の平均値は 9.44 であった。フィールド上に BLE ビーコンが 9 個存在する場合の接続確立数の平均値は 9.68 であり、441 個存在する場合の結果は 10.4 であった。接続確立数が大きく変化しなかった要因として、advertising パケットの受信に失敗した時でも、次回以降の advertising パケット送信タイミングで受信に成功することで BLE の接続確立ができたことが考えられる。提案手法では各移動端末は advertiser として常時 advertising パケットの送信を行うため、advertising パケットの受信失敗が BLE 接続確立に与える影響がわずかであることを確認した。この結果より、BLE ビーコンの存在が提案手法による接続確立へ与える影響は存在することが確認できた。しかし、その影響は小さく、BLE ビーコンが多数存在する環境下においても、提案手法による接続確立は出来ることを確認できた。

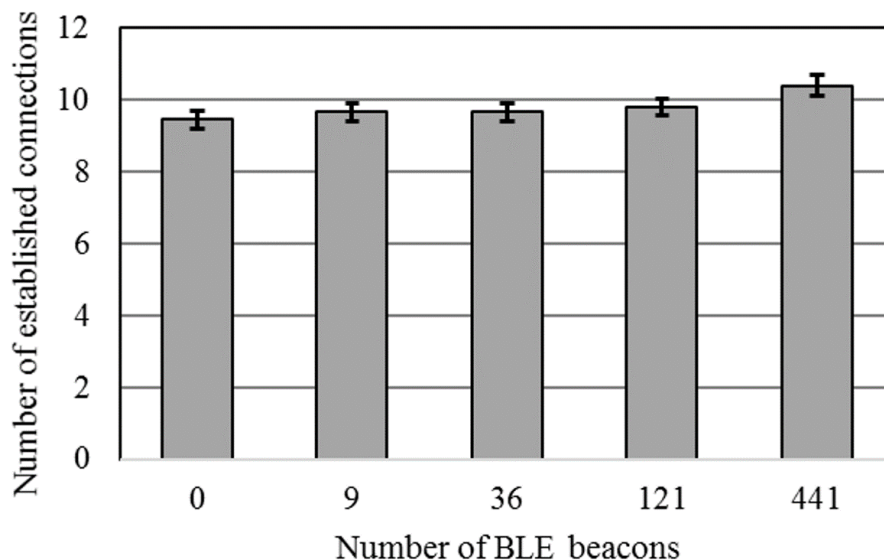


図 3.11: Average number of established connections versus number of BLE beacons.

3.7 まとめ

本章では、Bluetooth MANET の構築に利用する Classic のコネクション確立高速化を目的として、BLE と Classic を併用した高速なコネクション確立手法を提案し、実機とシミュレータによる評価実験を行った。提案手法では、Classic のコネクション確立手順に存在する検出プロセスと確立プロセスにおいて、各端末間の状態が衝突するという課題を排除するために、隣接する端末の検出プロセスと、Classic のコネクション確立に必要な情報の交換を BLE により実行した。BLE と Classic を併用して端末間のコネクションを確立することで、端末状態の衝突に起因するコネクション確立時間が長くなるという課題を解消し、端末間のコネクション確立を高速化した。提案手法のコネクション確立時間の高速化の効果を確認するために、実機による実験を行い、実験の結果から提案手法が従来手法よりも T_E を約 75% 短縮できることを確認した。また、提案手法が従来手法よりも、実験時間内に端末間のコネクションが確立している累計時間である T_A を実験時間の約 32% 向上でき、端末間コネクションの可用性向上にも効果があることを確認した。さらに、多数の端末の移動速度や端末密度が変化する環境において、提案手法の効果を確認するためにシミュレーション実験を行い、実験の結果から人間が乗り物を利用しない移動速度の範囲内でコネクション確立を行う時、提案手法は端末移動の影響を受けず、端末間で高速にコネクションを確立できることを確認できた。

また、BLE ビーコンが多数存在する環境において、電波干渉の発生が Classic と BLE を併用したコネクション確立手法へ与える影響を、計算機シミュレータを用いた評価実験により確認した。シミュレーション結果より、BLE ビーコン数増加するに従って BLE

第3章 Classic Bluetooth と Bluetooth LE を併用した高速コネクション確立手法の提案と性能評価

の電波干渉の発生頻度が増加し、Advertising パケットの受信でエラーとなった回数が増加することを確認した。また、各移動端末のコネクション確立数はフィールド上に存在する BLE ビーコン数が増えた場合でも、各移動端末数のコネクション確立数はほとんど変化しないことを確認した。

今後の課題としては、Bluetooth の冗長符号化を含む、送信データのエラー回復機能を実装し、各手法により構築できる Bluetooth MANET の規模を比較することやネットワークへのデータ普及速度の違いを確認すること、提案手法において BLE と Classic の各種パラメータが与える影響について調査することなどが挙げられる。また、BLE ビーコンや Bluetooth 機能を有するスマートフォンなどが複数存在する環境において提案手法を実装した実機を用いた評価を行い、Classic のコネクション確立に与える影響がシミュレーションの結果と同様の傾向となるかを確認する。

第4章 端末間接続状態に適応するデータ転送手法の提案と性能評価

4.1 はじめに

Bluetoothの通信機器は低消費電力かつ低コストで長期利用が可能なため、端末間通信や路車間通信を含む様々な分野への応用が検討されている [22] [23]. Bluetoothは無線LANに比べ電波出力が小さく、通信に周波数ホッピングを用いることで、端末密度が高い場合でも各端末の電波が互いに干渉せずに通信可能な規格である。しかし、文献 [25]によると、端末密度が高い場合にはBluetoothが使用している周波数帯域などが制限されることにより、電波干渉が避けられずに通信の切断が発生することが示されている。さらに、MANETでは端末の移動により端末密度が常に変化し、通信範囲内に端末が隣接または存在しない端末密度が疎な環境も発生する。また、コネクション確立済みの端末が電波範囲外に移動することに起因する通信の切断や、端末間の障害物により一時的に通信が不安定となる事象も発生する。

本章では、2.6.4で述べた無線マルチホップデータ転送とDTNによるデータ転送を自律的に切り替える手法をもとに、端末密度の頻繁な変化により通信の切断頻度が高くなる環境でも、その影響を最小化することでBluetooth MANETのデータ伝搬時間を短縮するデータ転送手法について提案する。また、データ転送手法の違いがBluetooth MANETのデータ伝搬時間に与える影響について、実機と計算機シミュレータを用いた評価実験により確認する。

4.2 研究背景

4.2.1 Bluetooth通信による無線マルチホップ転送

Bluetooth MANETではコネクション確立済みの他端末からデータを受信するか、自端末が送信すべきデータを生成した場合に、周辺のコネクション確立済み端末に対し

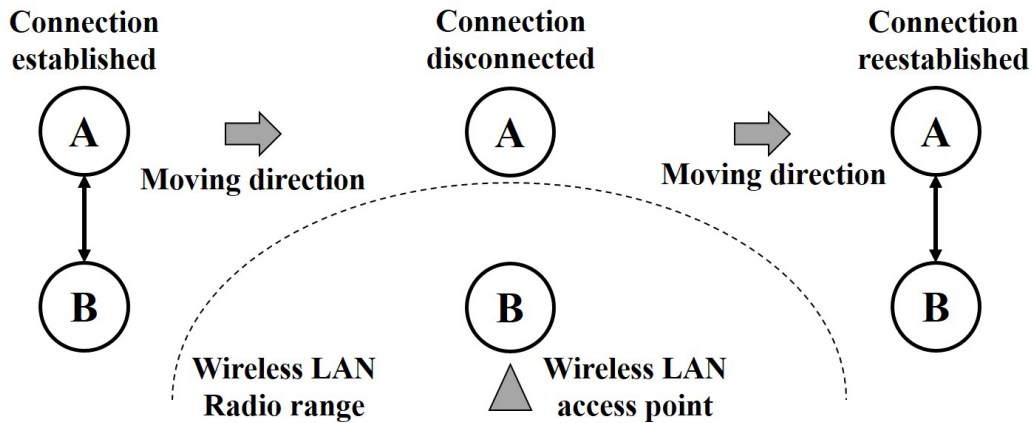


図 4.1: 電波干渉による一時的なコネクション切断

て転送を行う。Bluetooth MANET における無線マルチホップ転送では、IP データグラムと同様に TTL (Time To Live) を用いたデータ転送手法を採用している。これにより、Bluetooth MANET では TTL が 0 となるまで受信したデータの送信元を除くコネクション確立済み端末に対して、受信データを無線マルチホップ転送により転送し、MANET 内へのデータ伝搬を実現すると同時に、MANET 内に伝搬するデータ量を制限できる。無線マルチホップ転送によるデータ伝搬は、ネットワークの複数端末が連携して連続的にデータを転送するため、ネットワーク全体へ素早くデータ伝搬が可能である。

4.2.2 電波干渉と端末間コネクションの一時的な切断の発生

Bluetooth における通信干渉には Bluetooth 端末間の電波干渉と、2.4GHz の周波数を利用する他規格との電波干渉が考えられる。Classic では、1 台のマスター端末と最大 7 台のスレーブ端末から構成されるピコネットを形成する。ピコネット内の通信は必ずマスター端末を経由して送信することにより、同一ピコネット内の通信において、送信タイミングの衝突が発生しないように制御が行われる。さらに、Bluetooth ではピコネット内のスレーブ端末が異なるピコネットに参加することで、複数のピコネットが連結したスキュータネットを形成することができる。Bluetooth では異なるピコネット間の通信制御は行わないため、異なるピコネット間の通信が干渉しないように非同期式周波数ホッピングと AFH (Adaptive Frequency Hopping) を用いて通信する。しかし、非同期式周波数ホッピングは通信毎に周波数を非同期に変更するため、異なるピコネットの密度が高い場合はホッピング周波数の衝突が発生する確率が高くなり、Bluetooth 端末間通信の干渉問題が発生する [26] [45]。

図 4.1 は 2.4GHz の周波数を利用する無線 LAN と Bluetooth 間の電波干渉により、一

時的な接続切断の発生を示した例である。近年では無料の無線 LAN サービスが屋外で広く展開されており、2.4GHz の周波数を利用する製品が街中でも多く利用されている。Bluetooth も 2.4GHz の周波数を利用しているため、無線 LAN の電波が存在する環境下では電波干渉が発生することがある [37]。図 4.1 では、Bluetooth 接続が確立済みである端末 A と B が、無線 LAN のアクセスポイントの付近を通過する。その際に、Bluetooth と無線 LAN の電波干渉の発生により、各端末間の接続切断が発生する。しかし、Bluetooth 端末が移動し、無線 LAN の電波範囲外へ出た場合は端末間の接続が再確立され、すぐに通信可能な状態となる。

4.3 提案手法

4.3.1 概要

Bluetooth MANET では端末の移動により、端末間の接続確立状態が頻繁に変化する。さらに、通信が可能な場合においてもデータを高速に転送するためには次のような課題がある。端末密度が疎な場合には Bluetooth による直接通信可能な端末数が限定され、無線マルチホップ転送によるデータ転送ができず、ネットワーク上へのデータ伝搬が不可能な場合がある。一方、端末密度が密な環境下でも Bluetooth は安定した通信が可能であるが、高密度な環境下では 4.2.2 で述べたことに起因する通信の干渉と切断によりデータ伝搬時間が長くなる。

本論文ではこれらの問題を解決するために、端末密度に応じてデータ転送機能を切り替えるデータ転送手法を提案する。文献 [28] のデータ転送手法では、各端末が隣接する端末からデータを受け取った際に、更に他の隣接する端末へデータを転送する場合、既に接続が確立している端末に対しては無線マルチホップ転送によりデータを転送する。一方で、隣接する端末からデータを受け取った際に、端末間の接続が未確立である場合は、Epidemic Routing に基づく蓄積運搬転送によりデータを転送するように、自律的に転送手法を切り替える。例えば、接続確立済み端末情報を有する場合は、周辺に端末が存在すると判断し、無線マルチホップ転送によりデータ転送を行う。接続確立済みの端末情報を有しない場合は、周辺に端末が存在しないと判断し、Epidemic Routing によるデータ転送へ切り替える。本論文で提案するデータ転送手法は、データ転送速度が比較的低速な Epidemic Routing に切り替わるまでの待ち時間を設けることで、4.2.2 で述べた確立済み接続の一時的な切断が発生している場合には、より高速な無線マルチホップ転送の利用を優先して利用する。提案手法

は文献 [28] のデータ転送手法を拡張した (1)SV 交換を利用したデータ転送, (2) 無線マルチホップ転送の優先利用によるデータ転送, (3) コネクション再確立時における無線マルチホップ転送の優先利用という三つのデータ転送機能から構成されており, 周辺の端末密度に応じて各機能を自律的に切り替える. 次にそれぞれのデータ転送機能の動作について説明する.

4.3.2 SV 交換を利用したデータ転送

機能 1 は, Summary Vector (SV) を用いた Epidemic Routing によるデータ転送機能である. それにより端末密度が疎な環境においても, Bluetooth MANET 内へデータを伝搬できる. データ転送を行う際には SV の交換が必要であり, 無線マルチホップ転送によるデータ転送に比べ, データ転送に時間を要するという特徴がある. SV は各端末で保持するデータの識別情報のみから構成されるリストであり, データそのものは含まれていない. 各端末は自端末の SV をそれぞれ非同期かつ定期的にコネクション確立済みの端末と交換することで, 隣接端末が蓄積しているデータとの差分を確認している. SV の交換により差分データのみを交換することで通信時間と通信量のオーバーヘッドを削減している.

機能 1 の動作例を図 4.2 (a) に示す. 端末 S と端末 A, 端末 B と C がコネクション確立済みであるとき, 端末 S が生成したデータ $Data(S)$ を端末 A に対して転送したとする. しかし, 端末 A が端末 S から $Data(S)$ を受信したとき, 端末 A と端末 B 間は Bluetooth のコネクションが未確立であるため, 無線マルチホップ転送によるデータ転送を行わない. 一定時間後に端末 A と端末 B 間で Bluetooth コネクションが確立すると, SV 交換を実施する. 端末 A は端末 B が一定間隔で発信している SV_B を受信し, 自端末の SV_A と比較する. これをもとに端末 A が端末間の差分データの集合である $Data(SV_A \cdot \overline{SV_B})$ を作成し, 端末 B に対して送信する. その後, 端末 B はコネクション確立済みの端末 C が一定間隔で発信している SV_C の受信を待ち, 端末 A から受信した差分データ集合を含む $Data(SV_B \cdot \overline{SV_C})$ を端末 C に対して送信する. 端末 C が $Data(SV_B \cdot \overline{SV_C})$ を受信した時, 端末 S が送信した $Data(S)$ の伝搬は完了する.

4.3.3 無線マルチホップ転送の優先利用によるデータ転送

機能 2 は無線マルチホップ転送の優先利用によるデータ転送機能である. 機能 2 では端末間の差分データ受信後にコネクション確立済み端末を確認し, 通信可能な端末が存在すれば SV の交換をせずに, 無線マルチホップ転送を用いて受信データを転送する.

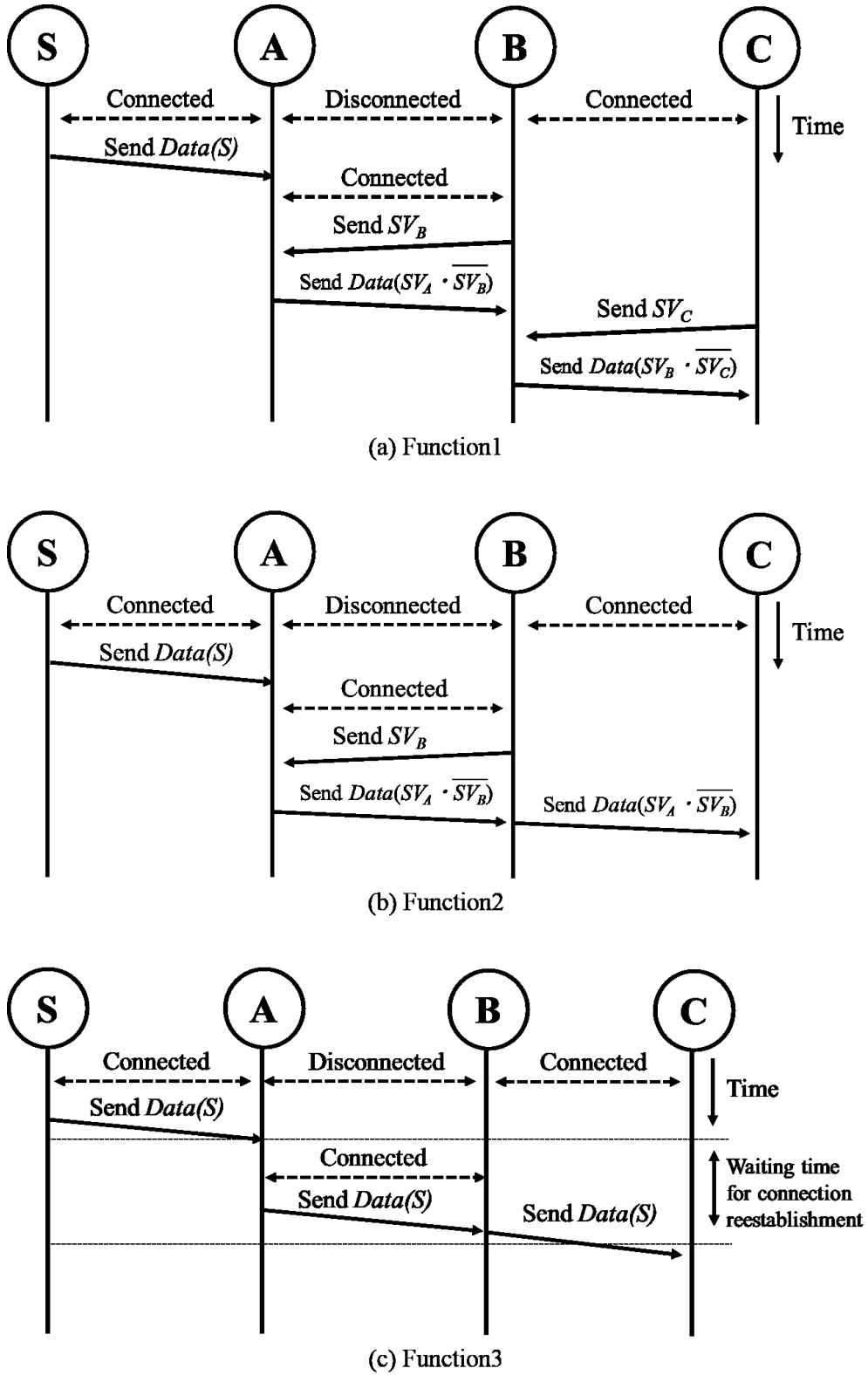


図 4.2: 提案手法における各機能の動作例

機能 2 の動作例を図 4.2 (b) に示す。図 4.2 (a) と同様に端末 S と端末 A, 端末 B と C がコネクション確立済みとする。端末 A が端末 S から $Data(S)$ を受信した際には端末 B と

のコネクションが未確立であるため、無線マルチホップ転送によりデータ転送は実行しない。その後、一定時間経過後に端末 A と端末 B 間で Bluetooth コネクションが確立すると、SV 交換により端末間で蓄積しているデータの差分を共有する。機能 1 と同様に、端末 A は端末間の差分データの集合である $Data(SV_A \cdot \overline{SV_B})$ を作成し、端末 B に対して送信する。この時、端末 B と既にコネクションを確立済みである端末 C に対しては、機能 1 とは異なり SV 交換を行わずに $Data(SV_A \cdot \overline{SV_B})$ を無線マルチホップ転送により転送する。これは、端末 B が $Data(SV_A \cdot \overline{SV_B})$ を受信する以前に、端末 B と端末 C 間で SV の交換により端末間の差分データを解消しており、端末 A と端末 B、端末 C 間のデータ差分は同じ $Data(SV_A \cdot \overline{SV_B})$ であることに基づいている。そのため、機能 2 では SV 交換を用いた機能 1 のデータ転送と同様に MANET 内のデータ量の削減が可能であり、さらに SV 交換の回数と SV 交換に要する時間を削減することで、Bluetooth MANET 内へのデータ伝搬時間も短縮できる。

機能 2 は無線マルチホップ転送と SV 交換を用いたデータ転送を、端末密度の変化に応じて使い分けるデータ転送機能である。そのため機能 2 は端末密度が均等、または部分的に疎密が発生している Bluetooth MANET 内へのデータ伝搬を高速化することができる。端末間のコネクション切断が頻発するような端末密度が高い場合は、無線マルチホップ転送によるデータ転送を連続に行えず、機能 1 と同等なデータ転送速度となる。

4.3.4 コネクション再確立時における無線マルチホップ転送の優先利用

Bluetooth MANET は複数のピコネットが連結してネットワークを形成するため、複数のピコネットに跨る通信が多く発生する。しかし、ピコネット内の通信衝突制御のみを行う Bluetooth 通信では、端末密度が高密度になるに従って他ピコネットとの電波干渉が発生し、確立したコネクションのリンク切断などの問題が僅かながら発生する。

機能 3 は端末密度が高密度な環境下において発生する問題を回避し、データ転送速度を高速化するデータ転送機能である。機能 3 では、データを受信した際に一定の短い待ち時間を設定し、その時間内は無線マルチホップ転送用バッファ内にデータを保持する。その後、待ち時間内に隣接端末との Bluetooth コネクションが新規確立、または再確立すれば SV の交換を行わずに、無線マルチホップ転送を用いてデータ転送を行う。機能 3 の動作例を図 4.2 (c) に示す。機能 2 と同様に、端末 A が端末 S から $Data(S)$ を受信した際には端末 B とのコネクションが未確立である。しかし、端末 A は端末 B とのコネクションが待ち時間内に確立された場合、端末 B との SV 交換を行わずに無線マルチホップ転送により $Data(S)$ を転送する。機能 3 は端末 A と端末 B 間のデータ差分が少ない場合に

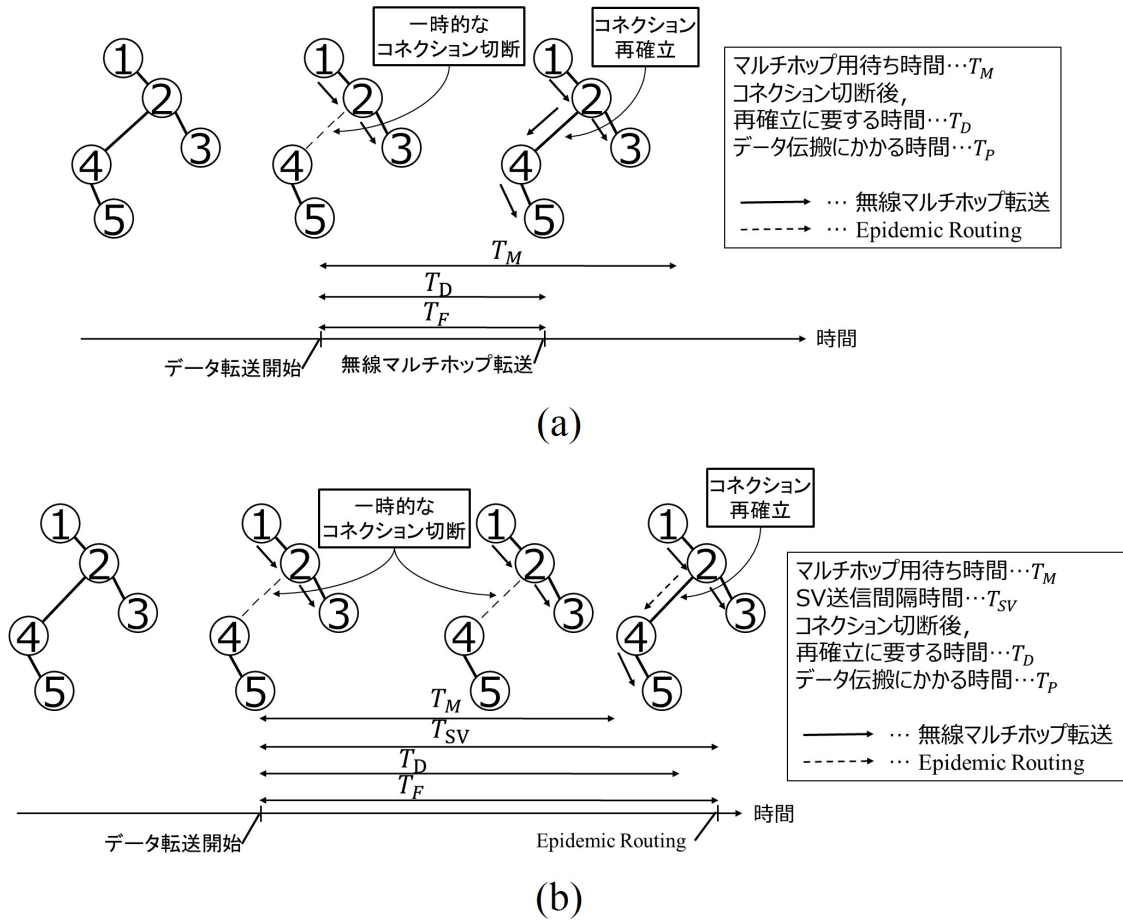


図 4.3: データ伝搬に要する時間の比較

有効であり、電波干渉などに起因するコネクションの一時的な切断に対する耐性を有することで、機能 2 に比べ SV 交換回数をさらに削減し、Bluetooth MANET 内へのデータ伝搬時間の短縮が可能である。

図 4.3 (a) に機能 2, 図 4.3 (b) に機能 3 を用いた場合の、データ伝搬に要する時間の例をそれぞれ示す。端末 1 が無線マルチホップ転送によりデータを転送した時、端末 2-4 間において一時的なコネクション切断が発生したとする。図 4.3 (a) では端末 2-4 間のコネクション再確立後に SV 交換を伴う Epidemic Routing と無線マルチホップ転送によりデータ伝搬を行う。一方、図 4.3 (b) では端末 2-4 間のコネクションが端末 2 のマルチホップ転送用待ち時間内に再確立したことにより、無線マルチホップ転送のみを用いてデータ伝搬を行う。この時、マルチホップ転送用の待ち時間を T_M , SV 送信時間間隔を T_{SV} , コネクションの切断後、再確立に要する時間を T_D , 全端末へのデータ伝搬完了に要する時間を T_C とする。データ転送や SV の差分計算に要する時間を極短時間とする場合、図 4.3 (a) では $T_C = T_D + T_{SV}$ となる。しかし、図 4.3 (b) では SV 交換に要する時間を必要としないため、 $T_D \leq T_M$ の時 $T_C = T_D$ となる。

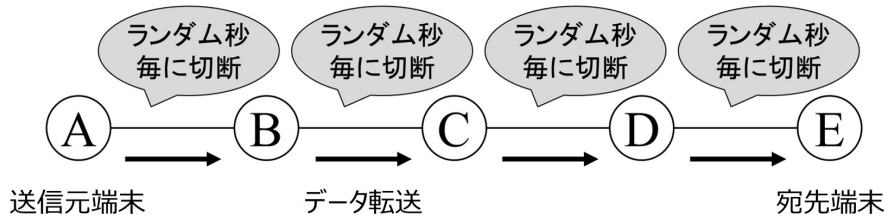


図 4.4: 実験に用いたネットワークトポロジーの例

4.4 実機による評価実験

4.4.1 実験目的

端末間の接続確立状態が頻繁に変化する環境下で、提案手法の機能ごとの効果を確認するため、Android 端末実機上に提案手法を用いるアプリケーションを実装し、実験を行うことにより評価した。評価項目は図 4.3 で示したデータ伝搬に要する時間 (T_C) であり、実験に用いた全端末にデータが伝搬するまでの時間を測定する。 T_C には接続の新規確立と再確立にかかる時間が含まれており、4.3.3 と 4.3.4 で説明した機能 1 と 2, 3 において T_C を測定した。なお、本実験における端末間の接続確立には、3 章で述べた Classic と BLE を併用した高速接続確立手法を用いた。

4.4.2 実験方法

5 台の端末を各端末の通信範囲内に隣接端末が存在するよう直線状に配置する。実験に用いた端末の配置を図 4.4 に示す。各端末は隣り合う端末とのみ接続確立を行うように設定する。例えば、端末 C は端末 B と D のみ接続確立を行い、端末 A と E とは接続確立を行わない。この時、送信元端末 A がデータパケットを定期的に生成し、端末 B と C, D が中継して端末 E までデータの転送を行い、端末 E がデータパケットを受信するまでの T_C を測定する。

端末密度の変化から端末間の接続状況が頻繁に変化する Bluetooth MANET の環境を再現するために、各端末間の接続が自動的に切断される機能を実装した。確立された端末間の接続は切断されると、接続が再確立されるまでは端末間で通信不可能となる。本実験では、接続確立後から次の切断までの時間は、事前に設定する切断時間間隔に含まれる時間内から、各端末で発生させた一様乱数に基づいて決定する。そのため、一様乱数により決定した秒数は、端末間の接続確立継続時間と等しくなる。例えば、切断時間間隔を 10 から 20 秒に設定した場合は、10 秒

表 4.1: 提案手法の実装に用いたパラメータ

Parameter	value
Data transmission interval	10s
T_{SV}	6s
T_M	5s
Disconnection time interval	0~10s, 5~15s, 10~20s, 15~25s, 20~30s, 25~35s, 30~40s

表 4.2: 実験に用いた端末の仕様

Name	OS	Bluetooth version
Zenpad 3 8.0	6.0 (Marshmallow)	Bluetooth 4.1
Nexus 9	7.1 (Nougat)	Bluetooth 4.1

から 20 秒までの時間内から一様乱数を発生させて秒数を決定する。例えば, 17 秒に決定した場合, 端末間の接続確立から 17 秒が経過した時に接続を切断する。

4.4.3 実験環境

表 4.1 に, 提案手法を Android 端末上に実装した際に用いたパラメータを示す。データ送信間隔とは送信元端末がデータパケットを生成する時間間隔であり, 本実験では, 端末 A が 10 秒に 1 回データを送信している。端末の SV 送信間隔は 6 秒, 機能 3 のマルチホップ転送用待ち時間は 5 秒とした。切断時間間隔の最小は 0 から 10 秒とし, 最大を 30 から 40 秒に設定して, 7 種類の時間間隔で評価を行った。

実験で用いた端末は 2 種類であり, 適宜混在させて実験に用いた。各端末の仕様を表 4.2 に示す。また, 実験を行った場所は広島市立大学屋内であり, Bluetooth と同周波数帯の電波 (2.4GHz 帯の IEEE802.11g/n など) が混在する環境である。

4.4.4 実験結果

各機能において T_C の測定を 200 回試行し, 平均値および 90%信頼区間を算出した。図 4.5 に各データ転送機能によるデータ伝搬時間を示す。縦軸をデータ伝搬時間とし, 横軸に切断時間間隔を示す。結果からすべての切断時間間隔において機能 3 を用いた場合に最も速くデータ伝搬が可能であることを確認できた。切断時間間隔が 0 から 10 秒の時に, 機能 1 と 3 の差が最も現れており, 機能 1 に比べて約 38%程 T_C を短縮していた。機能 2

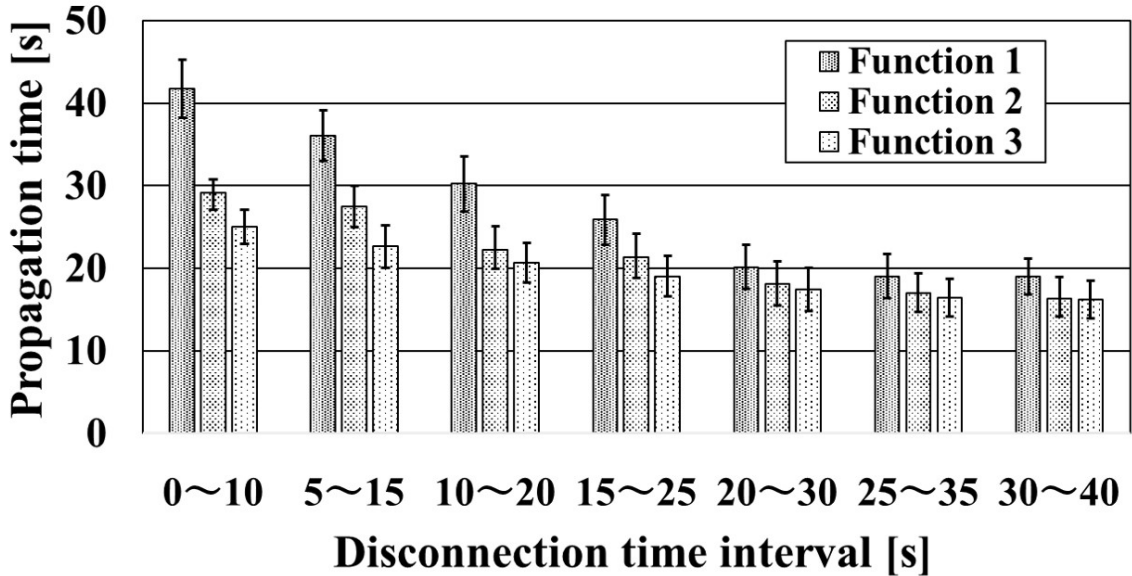


図 4.5: 各データ転送機能におけるデータ伝搬時間

に比べて機能 3 の効果による差が最も現れた切断時間間隔は 5 から 15 秒の時であり，機能 2 に比べて約 24% 程短縮できた．また，すべての切断時間間隔において機能 3 の次に，機能 2 を用いた場合にデータが速く伝搬した．機能 1 と比べて機能 2 の効果による差が最も現れたのは，切断時間間隔が 0 から 10 秒の時であり，機能 1 に比べて約 29% 程短縮できた．機能 1 では切断時間間隔が 20 秒から 30 秒より長くなると， T_C の短縮幅が小さくなる．また，機能 2 と機能 3 は切断間隔時間が 25 秒から 35 秒の時から，各機能のデータ伝搬時間に大きな差が見られない．

端末密度の変化を模してコネクション切断を定期的に発生させた本実験では，端末間のコネクション切断と再確立が頻繁に発生する．実験の結果より，端末間のコネクション切断や再確立が頻繁に発生するデータ転送経路数が限られた環境下では，機能 3 のマルチホップ用待ち時間を設定することにより，端末間のコネクション切断がデータ伝搬時間へ及ぼす影響を軽減し，データ伝搬時間を短縮できることが分かった．また，コネクションの確立時間が長く，端末間のコネクションが安定する環境下では，機能 2 と 3 におけるデータ伝搬時間の差が小さくなることが確認できた．

4.4.5 追加実験

本実験では T_{SV} を 6 秒と設定してデータ転送を行った．結果より，コネクションを確立している時間が長いほど T_C が短縮されることから， T_{SV} が短いほど T_C の短縮が可能であると考えられる．また，機能 3 の T_M を 5 秒と設定し，5 秒以内にコネクションが再

表 4.3: 追加実験で変化させたパラメータ

パラメータ	値
端末の SV 送信間隔 [sec]	1, 3, 6, 9
マルチホップ転送用待ち時間 [sec]	1, 5, 10
切断時間間隔 [sec]	15~25

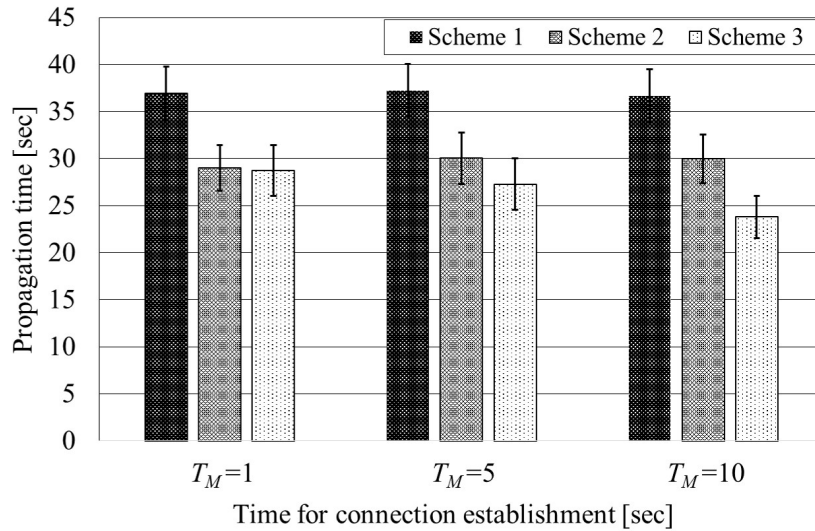


図 4.6: T_M を変化させた時のデータ伝搬時間

確立すれば無線マルチホップ転送によりデータ伝搬を行う機能で、無線マルチホップ転送を行う機会を増やしていた。そこで、 T_M のパラメータを変化させ、無線マルチホップ転送を行う回数を増やすことでより T_C の短縮が可能であると考えられる。各パラメータとデータ伝搬に要する時間の関係を明確にするため、次に T_M と T_{SV} が T_C へ与える効果についての追加実験を行った。

追加実験で変化させたパラメータを表 4.3 に示す。切断時間間隔を 15 から 25 秒とし、 T_M が T_C へ与える効果を確認する際は T_{SV} は 6 秒に設定した。また、 T_{SV} が T_C へ与える効果を確認する際は T_M は 5 秒に設定した。その他のパラメータは表 4.1 と同様である。

4.4.6 マルチホップ転送用の待ち時間がデータ伝搬時間へ与える効果

各機能において T_C の測定は 200 回試行し、平均値および 90%信頼区間を算出した。図 4.6 に T_M のパラメータを変化させた場合のデータ伝搬時間を示す。縦軸をデータ伝搬時間とし、横軸に T_M の値を示す。結果から、すべての T_M において機能 3 の T_C が短縮されていることが確認できた。 T_M が 10 秒の時に最も T_C が短く、機能 3 が 1 と比べて約 35%、機能 2 に比べて約 21%短縮していた。また、 T_M が 1 秒の時に最も機能 3 の効果が

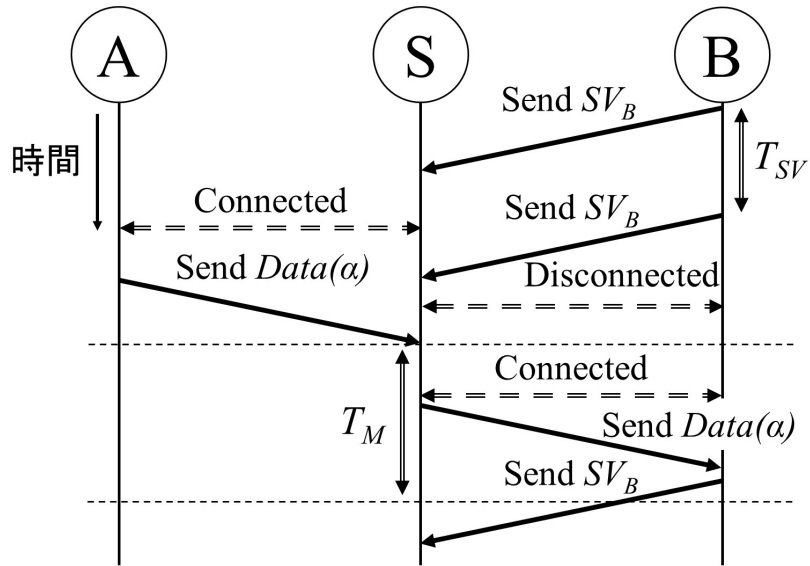


図 4.7: 機能 3 によるデータ転送の動作例

小さく，機能 1 と比べて約 22%，機能 2 に比べて約 1% の短縮であった。

T_M が 1 秒の時に機能 2 と 3 の差が約 1% であったことから， T_M の時間内に接続の再確立が多く行われなかったことが考えられる．図 3.3 で示した実機を用いた接続確立時間の測定結果では，Classic と BLE を併用した接続確立手法では約 6 秒の時間を要することが確認できる．そのため， T_M を 1 秒に設定した場合には，時間内に接続の再確立に成功する機会が少なく，機能 3 の効果によるデータ転送が機能する機会が少なかったことで，機能 2 と 3 の T_C にあまり差が現れなかったと考えられる．

T_M が 10 秒の時に機能 2 と 3 の差が約 21% であったことから， T_M が T_{SV} を超えた値の場合においても機能 3 の効果が現れるということが分かった．これは， T_M と T_{SV} の各パラメータが T_C の短縮へ与える影響に関係性が薄いことが考えられる．図 4.7 に機能 3 においてデータ転送を行った時の動作例を示す．端末 S と B が保有しているデータに差分がない時，端末 A と S の接続が確立し，端末 A が $Data(\alpha)$ を送信したとする． $Data(\alpha)$ を受信する前に，端末 S と B の接続が切断した時は，端末 S は B に対して無線マルチホップ転送によるデータ伝搬が不可能となる．しかし， T_M 内に接続が再確立した場合は，機能 3 の効果により無線マルチホップ転送が可能となる．機能 1 や 2 の場合，端末 S が B に対して $Data(\alpha)$ を送るには，端末 B との接続を再確立後に SV_B を受信する必要がある．このとき，端末 S のデータ転送にかかる最大待ち時間は T_{SV} であり，Epidemic Routing によるデータ転送に要する時間である．そのため， T_M の設定を長くすることにより無線マルチホップ転送を行える回数が増え， T_C

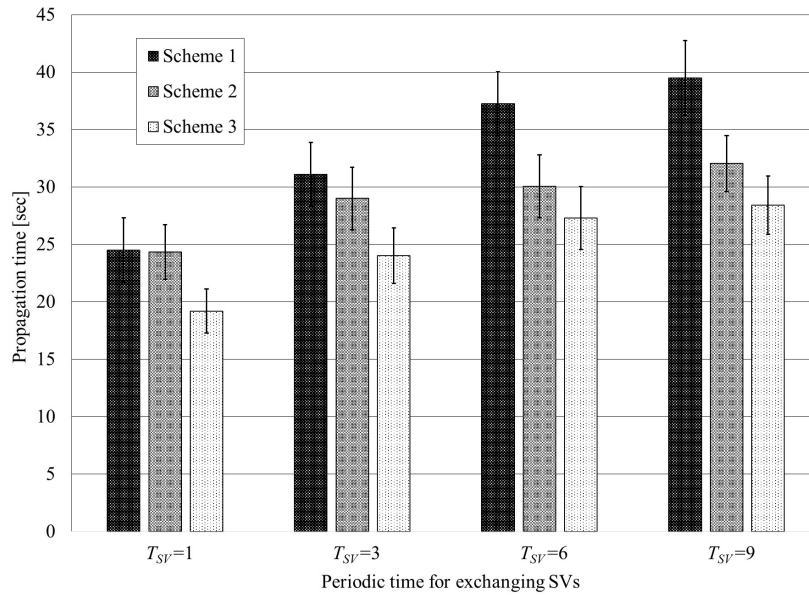


図 4.8: T_{SV} を変化させた時のデータ伝搬時間を短縮できると考えられる。

4.4.7 SV 送信時間間隔がデータ伝搬時間へ与える効果

各機能において T_C の測定は 200 回試行し、平均値および 90%信頼区間を算出した。図 4.8 に T_{SV} のパラメータを変化させた場合のデータ伝搬時間を示す。縦軸をデータ伝搬時間とし、横軸に T_{SV} の値を示す。

結果から、すべての機能において T_{SV} を短くするほど T_C が短縮されていることが確認できた。各機能において、 T_{SV} が 9 秒の時と比べて 1 秒の場合では、機能 1 では約 38%、機能 2 では約 24%、機能 3 では約 32%の T_C が短縮した。しかし、 T_{SV} が 1 秒の時に機能 3 は他の各機能に比べ、約 22%の T_C を短縮することが出来たが、機能 1 と 2 の差は約 1% と僅かな結果であった。

すべての機能において T_C が短縮したことから、 T_{SV} を短くすることにより T_C を短縮することが出来ることを確認できた。特に、 T_{SV} が 1 秒の時に機能 3 が他の機能に比べて T_C が短くなったことから、4.4.6 で述べた、 T_M が T_{SV} を超えた値の場合にも機能 3 の効果が現れることを確かめることが出来た。また、この時に機能 1 と 2 の差が小さかったことから、 T_{SV} が短くなった場合には、データ伝搬時間について機能 2 の効果が T_C の短縮に与える影響が小さくなることが考えられる。この結果から、 T_M と T_{SV} のパラメータは独立して T_C の短縮に影響を与えられられる。

表 4.4: シミュレーション条件

Field size	100m×100m
Number of terminals	125
Initial position	Uniform random
Mobility model	Random Waypoint [39]
Speed of mobile terminal	4km/h
Number of data generating terminals	25
Data transmission interval	10s
TX power	4dBm
Receiver sensitivity	-70dBm
Packet loss rate (Classic)	25%
Packet loss rate (BLE)	2%
Simulation time-length	300s
Number of trials	10

4.5 データ転送手法のシミュレーションによる評価実験

4.5.1 実験目的

4.4の実機実験はデータ転送経路が一つしか存在しない環境で T_{SV} を6秒、 T_M を5秒と設定し、機能ごとのデータ伝搬時間を測定した。その結果、機能3が最もデータ伝搬時間である T_C を短縮出来ることを確認した。また、実機実験の結果より、コネクションを確立している時間が長いほど T_C が短縮されることから、 T_{SV} や T_M の値を変化させることでネットワークへのデータ伝搬に影響が現れることが考えられる。そこで、端末台数が多い高密度な環境かつ、端末の移動によりネットワークトポロジが頻繁に変化し、データ転送経路が複数存在する環境下において、 T_{SV} と T_M がBluetooth MANETへのデータ伝搬に及ぼす効果を確認するためにシミュレータによる実験を行う。

4.5.2 シミュレーション条件

表 4.4 にシミュレーション実験で利用したパラメータを示す。評価実験は100m×100mの正方形の見通しの良いフィールドに、125台の端末が存在する環境とした。評価実験では全端末の内25台の端末(データ生成端末)が10秒に1回一意なデータを生成し、周辺端末へのデータ転送を実験時間内で定期的に実行する。物理層のモデル化にはBluetoothの仕様[8]や、電波干渉などに起因するエラー発生率を調査した文献[25]と[41]を参考に設定し、エラーが発生した場合には必ずパケットロスも発生する設定とした。Classicは

ピコネット単位で通信に利用する周波数や、送信タイミングの制御を行うため、電波干渉の発生確率は隣接するピコネット数に比例して増加することが文献 [25] で示されている。シミュレーション実験の Classic におけるエラー発生率を決定するに際し、本シミュレーション実験の環境における最大隣接ピコネット数の平均値を事前に確認したところ 11 個であった。11 個のピコネットが隣接する場合、ピコネット間で周波数が衝突する確率は約 25% となる。そこで、本シミュレーション実験では最も電波干渉が発生する環境を想定して、Classic のエラー発生率を設定した。

評価指標はフィールド上に存在するデータ生成端末が一定間隔で生成する一意なデータパケットを、実験時間内に全端末へ伝搬した時のデータ普及率と、データ伝搬に要したデータ転送の回数とする。データ普及率はフィールド上に存在する全端末数を N 台、その中で i 番目の端末 1 台が実験時間の T 秒間に受信した一意なデータ数を x_i ($i = 1, 2, \dots, N$), M 台のデータ生成端末が単位時間あたりに生成する一意なデータパケット数を m とする時、以下の式で定義する。

$$\text{データ普及率} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i}{M \times T \times m} \quad (4.1)$$

本評価実験では 300 秒の実験時間内に、25 台の各データ生成端末が 10 秒に 1 回一意なデータを生成するため、データ生成端末が生成するデータ総数は $M \times T \times m = 750$ となる。フィールド上に存在する 125 台の各端末が実験時間内に受信した一意なデータ数の平均値が 675 である時、データ普及率は 0.9 となる。評価実験の試行回数は 10 回であり、各試行結果の平均値と 95% 信頼区間を算出した。

4.5.3 シミュレーション結果

機能 3 において T_M の値を 5 秒に固定し、 T_{SV} を変化させたシミュレーション結果を図 4.9 に示す。縦軸の左側をデータ普及率、右側をデータ転送回数とし、横軸は各試行で変化させた T_{SV} の値である。また、データ転送回数は各端末が実験時間内にデータを転送した回数の平均値を示す。結果より、データ普及率は T_{SV} を変化させても大きく変化しないことが分かる。データ普及率は $T_{SV}=8$ 秒の時に約 94% まで減少し、それ以降はデータ普及率が減少していない。また、 T_{SV} を長くすることで SV の転送回数、全データ転送回数が減少し、ネットワーク内の端末に送信データが普及する際に重複する、または冗長な転送データが生成されるというネットワーク上のオーバーヘッドが削減されていることが分かる。最もデータ普及率の結果が良い $T_{SV}=1$ の時に全データ転送回数も最も多くなり、実験時間の 300 秒間で約 4 万回のデータ転送が行われた。一方、データ普及率の減

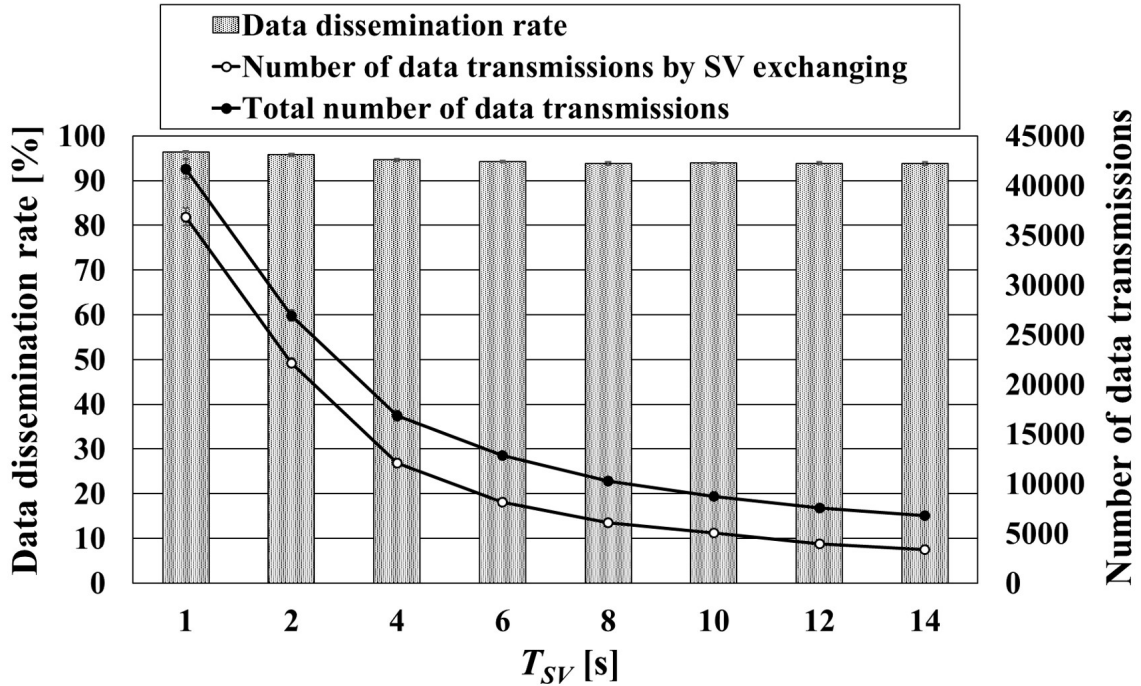


図 4.9: T_{SV} を変化させた時のデータ普及率とデータ転送回数

少に変化が見られなくなる $T_{SV}=10$ の時は、全データ転送回数が約 1 万回と 25% 程度の回数まで削減できることが確認できる。これは、全端末が定期的に SV を送信しているため、SV 送信間隔が長くなるに従い SV の転送回数、全データ転送回数が減少したからと考えられる。

次に T_{SV} の値を 6 秒に固定し、 T_M を変化させたシミュレーション結果を図 4.10 に示す。データ普及率が最も良い結果となったのは、 $T_M=13$ の時であり、データ普及率は約 95% である。結果より、 T_M を変化させた場合にもデータ普及率の大きな変化は見られなかった。マルチホップ用待ち時間内にデータ転送が行われたのは、 $T_M=5$ の時に約 4 千回であり、それ以降は微増傾向であることが分かる。全データ転送回数に関し図 4.9 の結果と比較すると、マルチホップ用待ち時間の設定により同等のデータ普及率を維持しながら、全データ転送回数を削減できることを確認できた。

実機による実験結果とシミュレーションによる実験結果より、高密度な環境下において Bluetooth MANET のデータ普及率を改善するためには SV 送信間隔を短くすることが効果的であるが、ネットワーク上のオーバーヘッドが増加することが確認できた。しかし、端末間に複数のデータ転送経路が存在し、データ伝搬時間が十分確保されている場合は、SV 送信間隔の変更やマルチホップ用待ち時間を設定しても、データ普及率に大きな影響を与えない。また、データ伝搬時間の短縮とデータ転送回数の削減には、マルチホップ用待ち時間の設定が効果的である一方、マルチホップ用待ち時間を一定時間以上

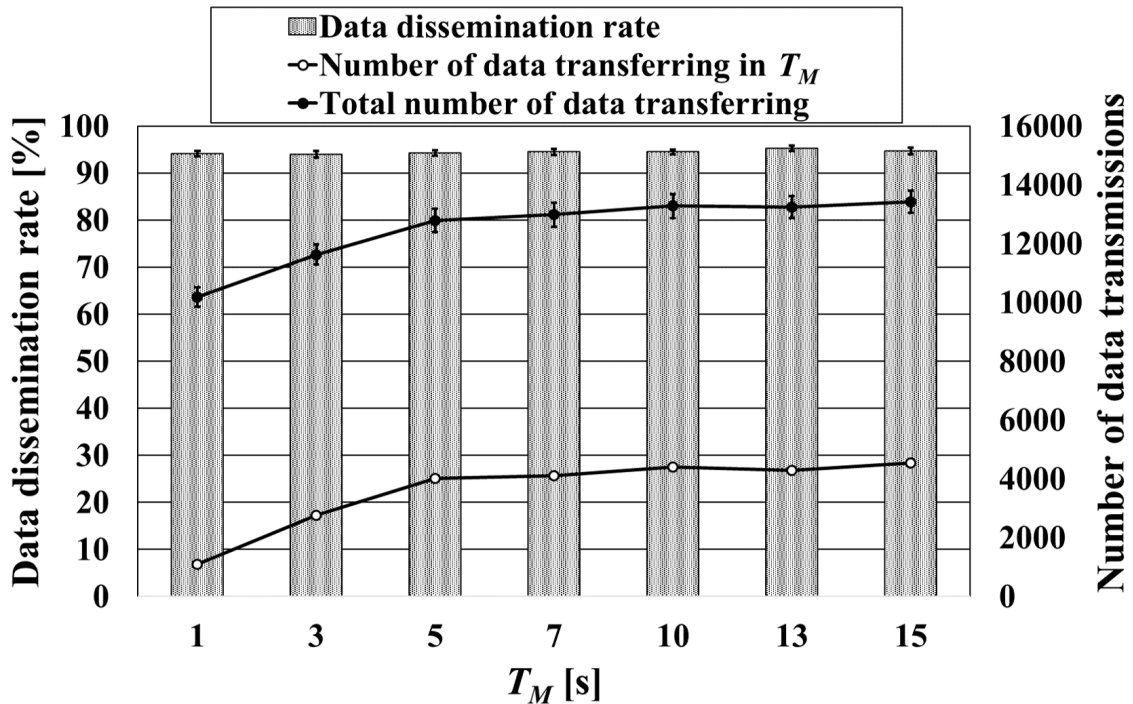


図 4.10: T_M を変化させた時のデータ普及率とデータ転送回数

長く設定してもその効果は鈍化し、データ普及率の改善効果は希薄である。評価実験を通して確認できた提案手法の特徴から、災害情報などを伝搬するアプリケーションに組み込むことが有効な適応例として考えられる。例えば、災害発生時に点在している低密度の被災者が自身の安否情報を生成した場合は、機能1によるデータ転送が行われる。避難の開始後には、特定の避難所に集合することで高密度な環境となった場合、機能2や機能3によるデータ転送へ切り替わることで高速なデータ伝搬を実現できることが考えられる。

4.6 まとめ

本章では、Bluetooth MANET における端末密度の頻繁な変化や、高密度な環境下では通信の干渉により Bluetooth の一時的なコネクション切断が発生しやすいという問題を解決するために、無線マルチホップデータ転送と DTN のデータ転送を組合わせたデータ転送手法を拡張した三つのデータ転送機能を、周辺の端末密度に応じて自律的に切り替えてデータ転送の高速化を図る手法を提案した。提案手法の効果がデータ伝搬時間に与える影響を確認するために実機とシミュレータによる評価実験を行った。実機の実験結果から、機能3がすべての切断時間間隔において他の機能よりもデータ伝搬時間を短縮する効果を有することを確認した。さらに、データ転送経路数が限られる場合にデー

第 4 章 端末間接続状態に適応するデータ転送手法の提案と性能評価

データ伝搬時間を短縮するには、SV の送信間隔を短くすることやマルチホップ待ち時間を設定することが有効であることを確認した。また、シミュレータの実験結果よりデータ転送経路数が複数存在する場合は、SV の送信間隔を長く設定すると僅かにデータ普及率が低下するものの、ネットワーク上のオーバーヘッドを削減できることや、マルチホップ待ち時間の設定によりデータ普及率を維持しつつ、オーバーヘッドを削減できることを確認した。

今後の課題として、複数の隣接端末とコネクションを確立している環境でネットワーク上のオーバーヘッドを削減しつつ、データ伝搬速度をより高速化するために、隣接する端末間で連携して端末密度の変化や一時的な通信切断に対応するデータ転送手法の検討が挙げられる。

第5章 結論

5.1 本論文のまとめ

近年，日本では2011年の東日本大震災や2018年の北海道胆振東部地震など，広域的な大規模災害が発生している．大規模な震災以外にも，2014年と2018年に発生した広島県を含む広域的な豪雨被害により，広域的な土砂災害や河川の氾濫など甚大な災害が発生している．広域的な大規模災害の発生による被害を軽減するためには，災害発生の予兆や避難勧告，被災状況の共有が有効であるため，携帯電話事業者の緊急速報メール配信サービスなどの移動体通信網を活用したサービスが提供されている．しかし，2018年の北海道胆振東部地震では北海道全域に及ぶ大規模停電が発生し，震源付近を中心として携帯電話基地局の最大6,505台で停波したことで，スマートフォンなどの携帯電話を用いた通信手段が利用不可能な状態となった．そこで，平常時や災害時を問わずに様々な情報の配信と共有可能な情報通信システムやネットワーク構築技術の開発は重要な研究課題の一つである．現在では平常時及び災害時にも利用可能なネットワークとして，無線通信端末の直接通信を用いたアドホックネットワークや基地局間の直接通信を用いたメッシュネットワークの構築が研究開発されている．しかしながら，汎用的なスマートフォンなどの無線通信端末のみを用いて，平常時や災害時を問わずに様々な情報の配信と共有が可能な情報通信システムが確立しているとはいえない．

本論文では，データ転送及び端末間コネクション確立の高速化を実現したMANET構築技術の確立と，Bluetooth MANET上で動作する平常時災害時両用システムの実現を目指し，以下の三つの目的を達成した．

(1) 平常時災害時両用システムのシステムアーキテクチャ検討

Bluetooth通信をもちいて構築されるMANETであるBluetooth MANETを用いて，災害時でもデータを近隣の端末に転送できる機能を活用した平常時災害時両用システム

のシステムアーキテクチャを提案した。平常時災害時両用システムはアプリケーション層とルーティング層，デバイス層の3層からなるアーキテクチャで構成される。アプリケーション層は平常時モードと災害時モードの2つのモードを有しており，各モードで機能するサービスを実装している。各サービスは共通のグラフィカルユーザインタフェース (GUI) を有しており，情報の生成方法，及び情報の発信や受信時の動作が統一されているという特徴を有する。そのため，平常時向けのアプリケーションを普段利用している場合，万が一の災害発生時に情報の生成，及び発信などが迅速に行えないという問題を発生させないことを意図した設計となっている。また，各モードのGUIを共通化し，災害発生時には自動的に災害時モードへ切り替える仕組みを実装することにより，平常時モードから災害時モードへの移行時にユーザ操作をなくすことで平常時と災害時の両用を実現した。ルーティング層では，Bluetooth MANET 上でより高速に情報伝搬を可能とするデータ転送手法を実装する。デバイス層では，無線端末間の Bluetooth コネクションの高速な確立手法を実装する。実際に Android OS を搭載するスマートフォンで動作するアプリケーションを開発し，アプリケーション層の各サービス動作，及び平常時から災害時へ自動的に切り替わる仕組みを実装し，その動作を確認した。

(2) 異なる Bluetooth 規格を併用した高速コネクション確立手法

端末間の Bluetooth コネクション確立の高速化を目的として，Classic Bluetooth と Bluetooth Low Energy を併用したコネクション確立手法を提案した。Bluetooth MANET は端末間の Bluetooth 通信のみでネットワーク構築やデータを共有する。そのため，Bluetooth MANET のデータ普及性能やデータ伝搬速度が，端末間のコネクション確立性能や構築できるネットワークの規模に強く依存している。しかし，Bluetooth 2.1+EDR で規格化された Classic Bluetooth (Classic) では，周辺に存在する端末の検出プロセスとコネクション確立プロセスに存在する端末状態の制約により，隣接する端末を検出できないことや，端末間のコネクション確立ができない場合があることが示されている。提案するコネクション確立手法は，Classic のコネクション確立手順に存在する検出プロセスと確立プロセスにおいて，各端末間の状態が衝突するという課題を排除するために，隣接する端末の検出プロセスと，Classic のコネクション確立に必要な情報の交換を Bluetooth Low Energy (BLE) により実行した。BLE と Classic を併用して端末間のコネクションを確立することで，端末状態の衝突に起因するコネクション確立時間が長くなるという課題を解消し，端末間のコネクション確立を高速化する。

提案手法の効果を確認するために，実機を用いた実験を実施した。実験の結果から従来の Classic Bluetooth のみの用いたコネクション確立手法よりも，コネクション確立に

要する時間を約75%短縮できることを確認した。また、多数の端末の移動速度や端末密度が変化する環境において提案手法の効果を確認するためにシミュレーション実験を行い、人間が乗り物を利用しない移動速度の範囲内でコネクション確立を行う時、提案手法は端末移動の影響を受けず、端末間で高速にコネクションを確立できることを確認できた。さらに、BLE ビーコンが多数存在する環境において、電波干渉の発生が提案するコネクション確立手法へ与える影響を確認するためにシミュレーション実験を行い、各移動端末のコネクション確立数はフィールド上に存在するBLE ビーコン数が増えた場合でも、各移動端末数のコネクション確立数はほとんど変化しないことを確認した。

(3) 端末間接続状態に適応するデータ転送手法

端末の移動により、端末間の接続状況が頻繁に変化する Bluetooth MANET において、端末間のデータ転送を高速化することを目的に、無線マルチホップデータ転送と遅延・切断耐性ネットワーク (DTNs) のデータ転送を組み合わせたデータ転送手法を拡張した三つのデータ転送機能を、周辺の端末密度に応じて自律的に切り替えてデータ転送の高速化を図る手法を提案した。Bluetooth は無線 LAN に比べ電波出力が小さく、通信に周波数ホッピングを用いることで、端末密度が高い場合でも各端末の電波が互いに干渉せずに通信可能という特徴を持つ規格である。しかし、端末密度が高い場合には Bluetooth が使用している周波数帯域などが制限されることにより、電波干渉が避けられずに通信の切断が発生することが既存研究で示されている。さらに、MANET では端末の移動により端末密度が常に変化し、通信範囲内に端末が隣接または存在しない端末密度が疎な環境も発生する。提案するデータ転送手法は、(1)SV 交換を利用したデータ転送、(2) 無線マルチホップ転送の優先利用によるデータ転送、(3) コネクション再確立時における無線マルチホップ転送の優先利用という三つのデータ転送機能から構成されており、周辺の端末密度に応じて各機能を自律的に切り替える。提案するデータ転送手法を用いることで、端末間接続状況の変化に適応することで、端末間のデータ転送や Bluetooth MANET へのデータ伝搬に要する時間を短縮する。

提案手法の効果がデータ伝搬時間に与える影響を確認するために実機とシミュレータによる評価実験を行った。実機の実験では、DTNs よりも提案手法の方が最大で約 38% データ伝搬時間を短縮できた。また、シミュレータの実験結果より、Bluetooth MANET におけるデータ転送経路数が複数存在する場合は、Summary Vector (SV) の送信間隔を長く設定すると僅かにデータ普及率が低下するもののネットワーク上のオーバヘッドを削減できることや、マルチホップ待ち時間の設定によりデータ普及率を維持しつつ、オーバヘッドを削減できることを確認した。

5.2 今後の課題

今度の課題として以下に示すことが挙げられる。

(1) 平常時災害時両用システムのシステムアーキテクチャ検討

平常時・災害時モードの最適な情報保持時間の検討による情報伝搬の効率化，災害時モードにおけるパケットサイズの上限やパケットのリサイズ方法などの検討などを行い，システムの完成度を高めることが挙げられる。また，提案するシステムアーキテクチャを有する，平常時災害時両用システムの実用化を視野に入れた各層に存在する各種パラメータの最適化などの改良が挙げられる。

(2) 異なる Bluetooth 規格を併用した高速コネクション確立手法

Bluetooth の冗長符号化を含む，送信データのエラー回復機能を実装し，各手法により構築できる Bluetooth MANET の規模を比較することやネットワークへのデータ普及速度の違いを確認すること，提案手法において BLE と Classic の各種パラメータが与える影響について調査することなどが挙げられる。また，BLE ビーコンや Bluetooth 機能を有するスマートフォンなどが複数存在する環境において提案手法を実装した実機を用いた評価を行い，Classic のコネクション確立に与える影響がシミュレーションの結果と同様の傾向となるかを確認する。

(3) 端末間接続状態に適応するデータ転送手法

複数の隣接端末とコネクションを確立している環境下で，マルチホップ転送用待ち時間と SV 送信間隔のパラメータを最適化させ，ネットワークの通信オーバーヘッドを削減しつつ，データ伝搬時間の短縮を実現することがある。また，複数の隣接端末とコネクションを確立している環境でネットワーク上のオーバーヘッドを削減しつつ，データ伝搬速度をより高速化するために，隣接する端末間で連携して端末密度の変化や一時的な通信切断に対応するデータ転送手法の検討が挙げられる。

謝辞

日頃より熱心に御指導下さった本学情報科学研究科の角田良明教授，ならびに，本論文の細部にまで目を通し，貴重な助言を下された石田賢治教授と西正博教授，及び河野英太郎准教授に心より感謝致します。

また，御討論頂いた，大田知行准教授，井上伸二助教および本学情報科学研究科ネットワークソフトウェア研究室の諸氏に感謝致します。

参考文献

- [1] 総務省, “令和元年版情報通信白書”. <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r01/>
- [2] 総務省, “平成 29 年通信利用動向調査,” 情報通信統計データベース, 2018.
- [3] 吉次由美, “東日本大震災に見る大災害時のソーシャルメディアの役割,” 放送研究と調査, vol.61, no.7, pp.16–23, 2011.
- [4] D. Reduction and H.R. institution, “平成 26 年 8 月豪雨による広島市における土砂災害現地調査報 (第 2 報),” DRI Survey Report, no.38-2, pp.1–4, 2014.
- [5] 8.20 豪雨災害における避難対策等検証部会, “平成 26 年 8 月 20 日の豪雨災害避難対策などに係る検証結果,” 避難対策等検証部会最終報告書, pp.1–72, 2015.
- [6] 入江さやか, 西久美子, “北海道ブラックアウト どのメディアが機能したのか,” 放送研究と調査, vol.69, no.2, pp.38–47, 2019.
- [7] 北海道総合通信局, “平成 30 年北海道胆振東部地震ブラックアウトにおける通信放送の被害状況”. http://www.soumu.go.jp/main_content/000585075.pdf
- [8] Bluetooth SIG, “Specification of the bluetooth system v4. 0,” 2010.
- [9] H. Nishiyama, M. Ito, and N. Kato, “Relay-by-smartphone: realizing multihop device-to-device communications,” IEEE Communications Magazine, vol.52, no.4, pp.56–65, 2014.
- [10] 高知市, “高知市津波 sos アプリ”. <https://play.google.com/store/apps/details?id=jp.kochi.tsunamisosapp>
- [11] 間瀬憲一, 松井貴宏, 長谷川貴史, 八木啓之, 柄沢直之, “大規模ブルートゥースネットワークの新たな構成法: Mbnet,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.89, no.8, pp.1441–1452, 2006.

- [12] M. Inoue, M. Ohnishi, C. Peng, R. Li, and Y. Owada, “Nervenet: A regional platform network for context-aware services with sensors and actuators,” *IEICE transactions on communications*, vol.94, no.3, pp.618–629, 2011.
- [13] C.K. Toh, *Ad hoc mobile wireless networks: protocols and systems*, Prentice Hall, 2001.
- [14] S. Basagni, M. Conti, S. Giordano, and I. Stojmenovic, *Mobile ad hoc networking*, John Wiley & Sons, 2004.
- [15] C.S.R. Murthy and B. Manoj, *Ad hoc wireless networkd: Architectures and protocols*, Prentice Hall, 2004.
- [16] A. Takahashi, H. Nishiyama, and N. Kato, “Fairness issue in message delivery in delay-and disruption-tolerant networks for disaster areas,” *Proc. the International Conference on Computing Networking and Communications(ICNC)*, pp.890–894, Jan. 2013.
- [17] A. Ito, Y. Kakuda, T. Ohta, and S. Inoue, “New safety support system for children on school routes using mobile ad hoc networks,” *IEICE transactions on communications (IEICE/IEEE Joint Special Section on Autonomous Decentralized Systems Technologies and Their Application to Networked Systems)*, vol.E94-B, no.1, pp.18–29, Jan. 2011.
- [18] Y. Kitaura, Y. Tsutsui, K. Taketa, E. Kohno, S. Inoue, T. Ohta, and Y. Kakuda, “The assessment information acquisition and dissemination system based on delay and disruption tolerant manets for the hiroshima national confectionery exposition,” *Proc. First International Symposium on Computing and Networking (CANDAR’13)*, 6th International Workshop on Autonomous Self-Organizing Networks (ASON’13), pp.476–479, Dec. 2013.
- [19] Y. Minami, Y. Kitaura, Y. Tsutsui, E. Kohno, S. Inoue, T. Ohta, and Y. Kakuda, “Design and implementation of dual-purpose normal and disaster situations systems based on delay and disruption tolerant bluetooth manets,” *Proc. 20th IEEE Asia-Pacific Conference on Communications (APCC2014)*, pp.9–14, Oct. 2014.
- [20] Y. Minami, Y. Kitaura, Y. Tsutsui, E. Kohno, S. Inoue, T. Ohta, and Y. Kakuda, “Implementation and evaluation of dual-purpose normal and disaster situations sys-

- tem based on delay and disruption tolerant bluetooth manets,” *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, vol.8, no.9, pp.342–357, Sep. 2015.
- [21] Bluetooth SIG, “Specification of the bluetooth system-v2. 1+ edr,” 2007.
- [22] A. Carfang, M. Zaturenskiy, J. Lloyd, and D. Roberson, “Performance of wi-fi and bluetooth in mobile ad hoc networks,” *Proc. 5th IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems*, 2008. MASS 2008., pp.701–706, Oct. 2008.
- [23] R.A. Gheorghiu, V. Iordache, M. Minea, and A.C. Cormos, “Bluetooth latency analysis for vehicular communications in a wi-fi noisy environment,” *Proc. 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing*, pp.148–151, July 2017.
- [24] T. Salonidis, P. Bhagwat, L. Tassiulas, and R. LaMaire, “Distributed topology construction of bluetooth personal area networks,” *Proc. IEEE INFOCOM 2001*, vol.3, pp.1577–1586, 2001.
- [25] 中矢猛, 杉浦彰彦, “周波数ホッピングを用いた近距離無線通信方式の他局間干渉低減法の影響評価,” *情報処理学会論文誌*, vol.44, no.12, pp.2912–2924, 2003.
- [26] I. Howitt, “Mutual interference between independent bluetooth piconets,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.52, no.3, pp.708–718, 2003.
- [27] V. Cerf, S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, R. Durst, K. Scott, K. Fall, and H. Weiss, “Delay-tolerant networking architecture,” *Technical report*, RFC4838, 2007.
- [28] Y. Kitauro, Y. Minami, E. Kohno, and Y. Kakuda, “A self-organized approach for the communication method to adapt connectivity of terminals in bluetooth manets,” *Proc. 17th IEEE Symposium on Object/ Component/ Serviceoriented Real-time Distributed Computing (ISORC2014), 5th IEEE Workshop on Self-Organized Real-Time Systems (SORT2014)*, pp.342–347, June 2014.
- [29] Y. Kakuda, T. Ohta, and M. Malek, “Self-organizing real-time services in mobile ad hoc networks,” *Self-Organization in Embedded Real-Time Systems*, pp.55–74, Springer, 2013.

- [30] 亀田弘行, 角本繁, 畑山満則, “災害緊急時と平常時の連携による総合防災情報システムの構築: リスク対応型地域空間情報システムの実現に向けて (1),” 地理情報システム学会講演論文集, vol.7, pp.29–32, 1998.
- [31] 角田良明, 大田知行, “アドホックネットワークルーティング,” オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, vol.48, no.3, pp.189–195, Mar. 2003.
- [32] K. Obraczka, K. Viswanath, and G. Tsudik, “Flooding for reliable multicast in multi-hop ad hoc networks,” *Wireless networks*, vol.7, no.6, pp.627–634, Nov. 2001.
- [33] 鄭立, Bluetooth LE 入門, (株) 秀和システム, 2014.
- [34] K. Taketa and Y. Kakuda, “A method for effective discovery and connection in bluetooth manet consisting of android terminals,” Proc. 8th International Conference on Broadband Communications and Biomedical Applications (IB2COM 2013), pp.78–83, Dec. 2013.
- [35] A. Vahdat and D. Becker, “Epidemic routing for partially connected ad hoc networks,” Technical Report CS-200006, Duke University, 2000.
- [36] 森井幸希, 角田良明, “Bluetooth manet に基づくネットワークアーキテクチャの構築とその適用事例,” 信学技報, pp.25–30, Jan. 2013.
- [37] A. Mathew, N. Chandrababu, K.M. Elleithy, and S.S. Rizvi, “Interference of 802.11 b wlan and bluetooth: Analysis and performance evaluation,” *International Journal of Computer Networks and Communications (IJCNC)*, vol.52, no.3, pp.140–150, 2010.
- [38] “Qualnet network simulator by scalable network technologies”. <http://www.scalable-networks.com/>
- [39] D.B. Johnson and D.A. Maltz, “Dynamic source routing in ad hoc wireless networks,” in *Mobile Computing*, vol.353, pp.153–181, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [40] K. Morsi, X. Huagang, and G. Qiang, “Performance estimation and evaluation of bluetooth frequency hopping selection kernel,” Proc. IEEE Joint Conferences on Pervasive Computing (JCPC), pp.461–466, 2009.
- [41] W.S. Jeon, M.H. Dwijaksara, and D.G. Jeong, “Performance analysis of neighbor discovery process in bluetooth low-energy networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.66, no.2, pp.1865–1871, 2017.

- [42] Apple Inc., “ibeacon for developers”. <https://developer.apple.com/ibeacon/>
- [43] Google LLC, “Eddystone for developers”. <https://developers.google.com/beacons/eddystone>
- [44] M. Ji, J. Kim, J. Jeon, and Y. Cho, “Analysis of positioning accuracy corresponding to the number of ble beacons in indoor positioning system,” Proc. 17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), pp.92–95, July 2015.
- [45] K. Morsi, G. Qiang, and X. Huagang, “Interference impact on throughput performance of bluetooth scatternets under different traffic loads,” Proc. 5th International ICST Conference on Communications and Networking in China (CHINACOM), pp.1–5, Aug. 2010.

業績リスト

学会誌発表論文

1. Y.Minami, Y.Kitaura, Y.Tsutsui, E.Kohno, S.Inoue, T.Ohta, and Y.Kakuda, “Implementation and evaluation of dual-purpose normal and disaster situations system based on delay and disruption tolerant Bluetooth MANETs,” *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, vol.8, no.9, pp.342-357, Sep. 2015. doi: 10.4236/ijcns.2015.89033
2. 南 雄也, 坂 涼平, 河野英太郎, 角田良明, “遅延・切断耐性を有する Bluetooth MANET の端末間接続状態に適応するデータ転送方式,” *電子情報通信学会論文誌 B (ネットワークソフトウェア技術とその応用論文特集)*, vol.J102-B, no.5, pp.356-365, May 2019. doi:10.14923/transcomj.2018NSP0004
3. 南 雄也, 坂 涼平, 河野英太郎, 角田良明, “Classic Bluetooth と Bluetooth Low Energy を併用した Bluetooth MANET の高速コネクション確立手法,” *電子情報通信学会論文誌 B (通信技術の更なる発展に向けた若手論文特集)*, vol.J102-B, no.8, pp.545-554, Aug. 2019. doi:10.14923/transcomj.2018WFP0013

国際会議発表論文

1. Y.Kitaura, Y.Minami, E.Kohno and Y.Kakuda, “A self-organized approach for the communication method to adapt connectivity of terminals in Bluetooth MANETs,” *Proc. 17th IEEE Symposium on Object/Component/Service-oriented Real-time Distributed Computing (ISORC2014), 5th IEEE Workshop on Self-Organized Real-Time Systems (SORT2014)*, pp.342-347, June 2014.
2. Y.Minami, Y.Kitaura, Y.Tsutsui, E.Kohno, S.Inoue, T.Ohta, and Y.Kakuda, “Design and implementation of dual-purpose normal and disaster situations systems based on delay and disruption tolerant Bluetooth MANETs,” *Proc. The 20th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC2014)*, pp.9-14, Oct. 2014.

3. Y.Minami, Y.Kitaura, E.Kohno, S.Inoue, T.Ohta, and Y.Kakuda, “Delay- and disruption-tolerant Bluetooth MANET-based dual-purpose systems for normal and disaster situations,” Proc. 2014 IEEE 11th Intl Conf on Ubiquitous Intelligence & Computing and 2014 IEEE 11th Intl Conf on Autonomic & Trusted Computing and 2014 IEEE 14th Intl Conf on Scalable Computing and Communications and Its Associated workshops, pp.615-619, Dec. 2014.
4. N.Kajikawa, Y.Minami, E.Kohno, Y.Kakuda, “On availability and energy consumption of the fast connection establishment method by using Bluetooth classic and Bluetooth low energy,” Proc. Fourth International Symposium on Computing and Networking (CANDAR2016), 9th International Workshop on Autonomous Self-Organizing Networks (ASON 2016), pp.286-290, Nov. 2016, doi: 10.1109/CANDAR.2016.0058 .
5. Y.Minami, N.Kajikawa, R.Saka, Y.Nakao, E.Kohno and Y.Kakuda, “Arbitration-based Deadlock Mitigation Mechanism for Fast Connection Establishment in Autonomous Self-organized Bluetooth MANETs,” Proc. 2018 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced & Trusted Computing, Scalable Computing & Communications, Cloud & Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovations, at the Seventeenth International Workshop on Assurance in Distributed Systems and Networks (ADSN2018), pp.1611-1616, Oct. 2018.
6. Y.Minami, R.Saka, E.Kohno and Y.Kakuda, “On the Effect of BLE Beacons on Fast Bluetooth Connection Establishment Scheme,” Proc. Seventh International Symposium on Computing and Networking (CANDAR2019), 12th International Workshop on Autonomous Self-Organizing Networks (ASON 2019), pp.28-32, Nov. 2019.

国内研究会発表論文

1. 南 雄也, 河野英太郎, 井上伸二, 大田知行, 角田良明, “Bluetooth MANET に基づく平常時災害時両用システムにおける見守り機能の設計と実装,” 電子情報通信学会 2014 年ソサイエティ大会論文集, BS-3-8, Sep. 2014.
2. 南 雄也, 安川 遼, 河野英太郎, 角田良明, 宇都宮栄二, “3G・LTE 通信と Bluetooth MANET 通信のノード間距離に基づいた自動選択・切替え通信方式,” 電子情報通信学会 2015 年総合大会論文集, pp.S-128-S-129, Mar. 2015.

3. 北浦優也, 南 雄也, 筒井悠吏, 河野英太郎, 井上伸二, 大田知行, 角田良明, “ [技術展示] 遅延・切断耐性 Bluetooth MANET のための端末同士の接続状態に適応する転送方式,” 知的環境とセンサネットワーク研究会, 信学技報, vol. 114, no. 418, ASN2014-130, pp. 119-124, Jan. 2015.
4. 南 雄也, 北浦優也, 梶川伸廣, 河野英太郎, 角田良明, “遅延・切断耐性 Bluetooth MANET における端末間接続状態に適応したデータ転送手法の設計と評価,” 電子情報通信学会 平成 27 年度第 1 回アシュアランスシステム研究会, pp.21-28, Sep. 2015.
5. 南 雄也, 梶川伸廣, 河野英太郎, 井上伸二, 大田知行, 角田良明, “ [技術展示] 遅延・切断耐性 Bluetooth MANET の省電力化を目指したネットワーク構築手法,” 電子情報通信学会 知的環境とセンサネットワーク研究会, Jan. 2016.
6. 南 雄也, 梶川伸廣, 河野英太郎, 角田良明, “Bluetooth Classic と Bluetooth Low Energy の組み合わせによる高可用性を持つコネクション確立手法,” 電子情報通信学会 情報通信マネジメント研究会, Mar. 2016.
7. 梶川伸廣, 南 雄也, 河野英太郎, 角田良明, “Android 端末による Bluetooth Low Energy を用いた MANET 構築におけるデータ分割転送技術の実装,” 電子情報通信学会 2016 年総合大会, Mar. 2016.

特許出願

1. 南 雄也, 梶川伸廣, 河野英太郎, 角田良明, “情報処理装置および情報処理方法,” 特開 2017-157988.