

## Bluetoothで構成したアドホックネットワークの特性

三輪 祐太<sup>†1</sup> 野口 拓<sup>†1</sup> 川合 誠<sup>†1</sup>

本稿では Bluetooth で構築したアドホックネットワークの構築手法と特性について述べる。Bluetooth は低消費電力・低コストという有利性を備え、近年は携帯電話やスマートフォンなど多くのモバイル端末で実装されている。通信デバイスに ZEAL(Bluetooth 通信デバイス)、制御ハードウェアに STBee(ARM マイコンボード) を利用し、実機を用いた Bluetooth 通信の評価を行う。結果を基に Bluetooth に適したアドホックネットワークの構成を検討し、その特性に関する実機評価を目指す。

### Characteristics of an Ad-hoc Network Implemented with Bluetooth devices

MIWA YUTA,<sup>†1</sup> NOGUCHI TAKU<sup>†1</sup>  
and KAWAI MAKOTO<sup>†1</sup>

This paper presents the configuration and performances of an ad-hoc network configured with Bluetooth devices. Bluetooth whose advantages are low power consumption and low cost is equipped with by many mobile terminals like mobile and smart phones. This paper shows the performances of the Bluetooth link configured with Bluetooth devices ZEALs and control devices STBees (ARM procesors). This paper also shows the experimental results of an ad-hoc network implemented with the Bluetooth links.

#### 1. はじめに

携帯電話や家庭用 PC から業務用システムまで、現在、ほとんどの人は無意識のうちにネットワークの恩恵を受けて生活している。多くは携帯基地局などのインフラ通信網に依存

するために、大災害が発生するとインフラ設備が壊れたり、大勢が一斉に情報を求めてアクセスが集中するためにネットワークはその役割を果たせなくなる。この問題を解消する災害時のネットワーク手段としてアドホックネットワークが注目されている。アドホックネットワークは、既存のインフラ通信設備に依存する事なく端末同士が直接繋がり自律的にネットワークを構築、運用する事ができるネットワーク手法である。従来は基地局やルータのような管理端末を経由して通信していた無数のユーザ端末が送受信者としての役割だけでなく、中継者、管理者としての役割も果たすために、一部分で故障が発生しても他の端末が機能を補ったり、通信経路を変更する事でネットワークを維持できるので耐障害性、冗長性に優れる。

しかしながら、アドホックネットワークには欠点も少なくない。例えばメッセージを送るためには、送信者から受信者までの間に十分な数の中継端末が存在しなければならない。また、インフラ通信設備が故障するような状況では当然、電力の供給も見込めない。緊急時であれば、低速回線やセキュリティ不安などの欠点があっても迅速なネットワーク構築が重要視される場合もあるが、ノード数の確保と電力に関しては最低限満たさないことには、物理的に通信ができない。

この問題を解消する通信規格として、近年、モバイル端末の多くに搭載されるようになった Bluetooth に注目した。ノートパソコンや携帯電話においてマウスやヘッドホンワイヤレスで接続するために搭載され、実際に多くの人が利用している。また、この数年、Bluetooth を搭載し、小型かつ高性能でカメラなど様々なセンサを備えたスマートフォンが爆発的に普及している。つまり、多くの人が日常的に利用しているモバイル端末に搭載されている Bluetooth は災害時においても手元にある可能性が高く、Bluetooth でアドホックネットワークを構成すればネットワーク内の端末数を増やす事が期待できる。さらに、Bluetooth は小型で消費電力が少ないという特徴も備えている。電力確保が困難な状況においては、省電力である事は非常に重要である。

本研究は Bluetooth ネットワークを実デバイスを用いて実験する事で、シミュレータやデバイスの仕様では見えなかった特性を検証し、Bluetooth アドホックネットワークの実現性に関して検討を行うものである。

#### 2. Bluetooth アドホックネットワーク

##### 2.1 Bluetooth

Bluetooth とは、身の回りの空間にある機器の無線化を対象とした、無線 PAN(Wirreles

<sup>†1</sup> 立命館大学  
Ritsumeikan University

Personal Area Network) 規格の一つである<sup>3)</sup>。無線 PAN 規格は、搭載される対象がモバイル機器であることが多く、小型・軽量・省電力であることが求められる。Bluetooth はこの要求を満たし、同じ無線 PAN 規格である ZigBee より高速・広範囲かつ搭載端末が多く、IrDA のように指向性が強くないため、モバイル機器におけるデータ通信の手段として、アドホックネットワークを構成することに適している。さらに、通信デバイス自体が安価であることも非常に大きな魅力である。

Bluetooth では通信時にマスタ・スレーブが区別される。マスタは通信を行う際に開始の呼びかけをする能動的なノードであり、スレーブはこれを待ち受ける受動的なノードとなるが、リンクが確立され接続状態となればこの区別は意味をなせずに、双方向からのデータ送受信が可能となる。また、図 1 のように、マスタ 1 台に対してスレーブが複数接続される一対多の接続形態を取る。

ヘッドホンと音楽プレイヤー、パソコンとキーボードなどの接続が主用途である Bluetooth は、Piconet と呼ばれるシングルホップ接続は比較的に容易に行える。一方、Scatternet と呼ばれるマルチホップ接続を行うためには段階を踏む必要がある。Scatternet は図 1 のような Piconet (一対または一対多で接続された状態) を複数組み合わせ、図 2 のように数珠つなぎで Piconet 間の接続を切り替えることで実現されている。

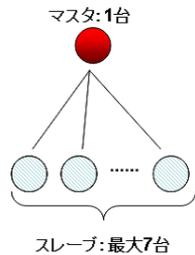


図 1 Piconet 接続イメージ

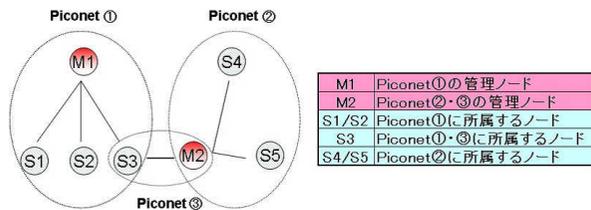


図 2 Scatternet 接続イメージ

## 2.2 Bluetooth アドホックネットワークの優位性

Bluetooth で構成されたアドホックネットワークには主に以下のような 3 つの優位性がある。

### 1) 低消費電力

アドホックネットワークが力を発揮する災害時やインフラ通信設備の設置が困難な状況で

は電源の確保も困難であるケースが多い。そのため、電力消費を抑える事がネットワークシステムを長時間維持する事に直結し、Wi-Fi や 3G 回線よりも消費電力が少ない Bluetooth はアドホックネットワークを構成する端末の通信デバイスとして優れている。

### 2) 高速転送

省電力で小型という似た性質を持つ同じく無線 PAN 規格の ZigBee がデータ転送速度が 20Kbps-250Kbps であるのに対し、Bluetooth は最大で Ver3.0 の 24Mbps、一般的な機器に搭載されている Ver2.0(2.1)+EDR でも 3Mbps と高速である。Wi-Fi などと比べれば低速だが、文字データや画像であれば問題なく送受信できる速さであり災害時にはカメラ映像などをやりとりできる。

### 3) 導入容易性

1 章でも述べたように、Bluetooth は現在多くのモバイル機器に内蔵されているために誰でも利用可能な状態である。くわえて、デバイス単価が安く、プロトコルが実装されているため開発者は Bluetooth に関する知識をほとんど必要とせず無線デバイスとして利用することができる。これは、新たにデバイスを導入したり性能を検証したりする面で非常に大きなメリットとなる。

低消費電力、画像も取り扱える転送速度、導入の容易さ、この 3 つの特徴は”いつでも・どこでも・簡単に”ネットワークを構築できる要素を秘め、災害時への応用を狙いとする、アドホックネットワークに優位な通信デバイスの 1 つであると考えられる。

## 2.3 関連研究

Bluetooth アドホックネットワークに関する研究では、マルチホップブロードキャストを行なうためのプロトコル設計<sup>1)</sup> や Scatternet のオペレーションプロトコルに関する研究<sup>2)</sup> がシミュレータで行なわれている。

文献 1) では、Scatternet 上でマルチホップブロードキャストを行うための新たな piconet 間接続手法を提案している。文献 1) はブロードキャストを対象としており、ルーティングの必要なユニキャストを対象とする本研究とは通信形態が異なる。文献 2) は、ノードの地理的分布とノード間トラヒックが与えられた場合に、連結性の高い Scatternet を構築するためのアルゴリズムを提案している。文献 2) は、Scatternet 構造の最適化に主眼を置いており、性能評価もシミュレーション実験である。一方、本研究は Bluetooth 実機を用いた実証実験によりマルチホップ通信の実性能を明らかにすることを目的としている。

### 3. 実験システムの構成

#### 3.1 全体構成

本実験では端末同士を無線接続する通信デバイスに ZEAL, 通信デバイスや経路制御を行なうための制御ハードウェアとして STBee を用いた. 端末は STBee(制御ハードウェア)と ZEAL(通信デバイス)の一組で構成し, STBee-ZEAL 間は UART ポートを用いてシリアル接続を行った.



図 3 ZEAL 外観



図 4 STbee 外観

#### 3.2 通信デバイス

図 3 の ZEAL は RS232C シリアル通信の無線化に適した通信デバイス<sup>4)</sup>で, STBee などのマイコン機器との UART 接続が可能である. Bluetooth 認証もされているため手続きが不要なうえ, SPP(シリアルポートプロトコル)という Bluetooth でシリアル通信を行うプロトコルが実装されている. そのため, マイコン側は UART でシリアル通信を行うのと同様に他端末との通信が可能となり, マイコンで制御する無線端末を作製するのにとても適している. 主な仕様は表 1 に示すとおりである.

表 1 ZEAL の主な仕様

認証	Bluetooth Ver2.1+EDR 準拠
対応プロファイル	SPP, DUN
伝送速度	3Mbps
送信電力	+4dBm (class2)
電源	3.3V
外形	15.0*20.0*4.9mm 約 1g

#### 3.3 制御ハードウェア

STBee は Cortex-M3 コアを採用したマイコンのひとつである STM32 が使用できるマイコンボードであり, Cortex-M3 は ARM 社が提供するマイコンの中で今後, 組み込みマイコンの中心をになうと最も期待されているコアである<sup>5)6)</sup>. STM32 は Cortex-M3 の中でも, ファームウェアが無償で提供されており, さらに, STBee のような安価な開発ボードが存在するため, システム導入も低コストで実機実装に適している. STBee の主な仕様は表 2 に示すとおりである.

表 2 STBee の主な仕様

CPU	STM32F103VET6
動作クロック	72MHz
フラッシュ	512Kbyte
RAM	64Kbyte
I/O ポート	80 本
シリアル通信ポート	I2C, SPI, USART 他
電源	4.5V-12V
消費電流	50mA-60mA

### 4. 実験システムの特長

#### 4.1 実験環境

Bluetooth でアドホックルーチングを行なうため, マイコンによって制御された Bluetooth デバイスの特性に関して以下の実験を行なった.

- 1) ホップ数増加に伴う接続・切断までの所要時間の変化
- 2) データ通信におけるスループット
- 3) 初回と 2 回目以降の接続時間

各ノードは 3 章で示したハードウェアを使用し, 室内の見通し環境で直線型のトポロジを用いて行なった. 図 5 は, ノード間隔に対するリンク確立までの所要時間の変化を示している. 図 5 から, ノード間隔は通信時間に影響を与えないことが分かる. また, Bluetooth には, Wi-Fi のような電波受信状況によって伝送速度を調整する機能もないため, 以降の実験ではノード間距離は約 20cm に固定した.

##### 4.1.1 ホップ数増加に伴う接続・切断までの所要時間の変化

Bluetooth アドホックネットワークは Scatternet によって構成される. そのため, Scat-

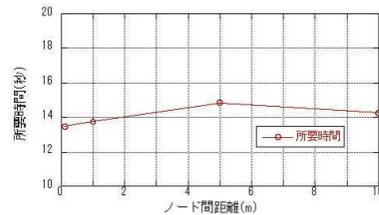


図 5 ノード間距離の変化と通信の所要時間

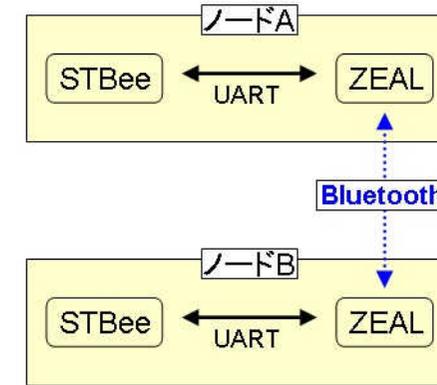


図 6 ノード間・ノード内の通信

ternet 構成に不可欠要素であるマルチホップについて、ホップ数と 1 サイクルに必要な時間を測定した。Bluetooth 通信のサイクルは

- I 送信元 (S) が接続可能なノードを探す
  - II S は検索したノードから接続先を選択する
  - III S が接続要求を送る
  - IV 受信先 (D) は接続に応答する
  - V S-D 間でデータ通信が行われる (双方向)
  - VI S, D のどちらかが切断要求を出し相手がこれに答える
- この一連の動作によって行われる。

本来は IV でリンクが確立しているため、この時点で通信可能となるが、Bluetooth の規格上、ノードは 2 つの Piconet に同時に所属できない、すなわち中間のノードはデータ中継を行なう度に、接続相手を切り替える必要があるため切断までの処理が必須となる。よって、マルチホップ実験ではデータの授受である V を除いた I から VI までの処理を 1 つのサイクルとしてホップ数ごとの本サイクルに掛かる時間の変化を調べた。

また、中継ノードが Piconet を切り替えるとき、現在の通信の切断と新しい通信の探索の間におよそ 0.5 秒以下の待機時間を設けた。これは ZEAL 側の切断から探索への処理でロスが発生するのを防ぐためであり、1 サイクル全体の所要時間から考えればそれほど大きいものではないと考えられる。

#### 4.1.2 データ通信におけるスループット

実験端末のスループットを計測した。スループットは、端末同士のリンクが確立した状態でデータの送受信にかかる時間を用いて、(1) 式で算出した。

$$\text{スループット (bps)} = \frac{\text{送信データ (bit)}}{\text{受信完了時間 (s)} - \text{送信開始時間 (s)}} \quad (1)$$

図 6 は、ノード A, B 間の通信を図示したものである。ノードを構成する STBee と ZEAL は UART(図 6 中の実線矢印) で接続されており、この間の通信速度がシリアルポートレートである。この UART は、ノード A からノード B へ送るためのデータ以外にも、STBee が ZEAL を制御するための信号伝達にも利用される。ノード同士を接続するのは Bluetooth(図 6 中の点線矢印) となり、この部分の通信速度がスループットとなる。データ生成を STBee で行い UART を経由して ZEAL へ送られるため、スループットの最大値はシリアルポートレートに依存する。

本実験環境では、シリアルポートレート 460.8Kbps の時、STBee と ZEAL の間で、相手ノードへの送信データに、921.6Kbps の時は、STBee と ZEAL 間で、送信データよりも極めて情報量の少ない制御コマンドにもロスが生じた。これは、処理の簡略化と接続ピン数の省略のため非同期通信の UART で STBee と ZEAL を接続したためである。UART は仕様上、シリアルポートレート 115.2Kbps までしか対応せず、230.4Kbps では正常に動作したが、それ以上の伝送速度を設定するとデータロスなどの不具合が発生しやすくなる。そのため、9.6Kbps, 19.2Kbps, 38.4Kbps, 57.6Kbps, 115.2Kbps, 230.4Kbps の各シリアルポートレートを用いて実験した。

#### 4.1.3 初回と 2 回目以降の接続時間

Bluetooth は初回接続時にペアリングを行う。2 回目以降に同一ノード同士が接続する場合にはこの作業が不要であることから、接続にかかる時間が短縮される。この実験では、

4.1.1 の III, IV に該当する箇所のみに必要な時間を, 初回接続時, 2 回目以降の接続時と比較する.

## 4.2 実験結果

### 4.2.1 ホップ数増加に伴う接続・切断までの所要時間の変化

図 7 はホップ数の増加に伴う Bluetooth の通信サイクル, 具体的には 4.1.1 における I から VI (データの送受信である V 部分は除く) の処理に必要な時間を表している. また, グラフ中のタイムアウトは Bluetooth が接続候補となる機器を検索する最大時間であり, 1 単位当たり 1.28 秒となる.

いずれのタイムアウト値に対しても, ホップ数の増加に比例して所要時間も増加している. この結果からホップ数が増加するにつれて End-to-End のリンク確立までに要する時間は増すが, 1 ホップあたりのリンク確立に要する時間は常に 12 秒程度であり, ノード数が増えても 1 ホップの所要時間が著しく増えることがなく安定している.

検索最大時間で見ると, タイムアウトが 3.84 秒 (グラフ青線) の方が接続・切断時間, すなわち通信サイクルに要する時間が少ないと言える. しかし, タイムアウト 2.56 秒 (グラフ緑線) の場合, 1 回の検索では機器を見つけきれずに検索処理 (4.1.1 における I の動作) を 2 回行っているため必要な時間が増加した.

表 3 は, ホップ数とタイムアウト時間ごとの経路探索成功率を表したものである. 経路探索成功率は検索処理 (4.1.1 の I) を 2 回行い, 接続先が見つかる確率である. 表 3 から, タイムアウト 5.12 秒, 3.84 秒では 100% だった検索成功率が, タイムアウト 2.56 秒では 60% と著しく低下したことがわかる.

表 3 ホップ数とタイムアウト時間による経路探索成功率の変化

	1 ホップ	2 ホップ	3 ホップ
タイムアウト 5.12 秒	100%	100%	100%
タイムアウト 3.84 秒	100%	100%	100%
タイムアウト 2.56 秒	60%	60%	60%

### 4.2.2 データ通信におけるスループット

図 8 はシリアルポートレート 9.6Kbps から 230.4Kbps におけるスループットを表したものである. グラフから明らかであるように, スループットはシリアルポートレートに依存する. シリアルポートレートがこの実験における理論上の最大値であるが, シリアルポートレート 9.6Kbps に対してスループット 7.6Kbps, 230Kbps に対して 180Kbps と, シリア

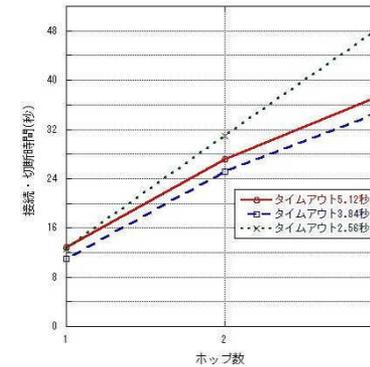


図 7 ホップ数増加に伴う接続・切断までの所要時間の変化

ルポートレートの最大値に対して約 80% の性能が発揮できているため, 実機運用という観点から見ても十分に利用できる結果となっている. スループットの理論値と実測値間で生じる約 20% のロス, (1) 式における送信データに Bluetooth ヘッダが含まないため生じたと考えられる.

また, UART の仕様を越えた 230Kbps のシリアルポートレートでもロスが発生しなかったことを踏まえると, UART の代わりに同期接続方式の USART (シリアルポートレート 4.5Mbps まで対応) を採用する事で, Bluetooth 2.1 の理論上の最大伝送速度 3Mbps に近づくことも期待できる.

### 4.2.3 初回と 2 回目以降の接続時間

図 9 は初回接続のペアリングを行う場合と, 2 回目以降のペアリングを行わない場合の接続 (4.1.1 の III, IV) に要する時間である.

この結果より, 2 回目以降の接続では, 初回接続に比べて接続に必要な時間が約 0.8 秒短縮される.

## 4.3 考察

実験結果から Bluetooth 通信がホップ数の増加やデータ伝送に対して安定していること, 比較的大きな情報をロスなく伝達できることが明らかとなった. 反面, リンク確立にかかる時間が大きくマルチホップでデータを転送する際, データの授受そのものよりも接続ノードの切り替えにかかる時間のほうが大きくなるケースも少なくない. さらに, 4.2.3 より一度利用されたリンクを経由する場合, 1 ホップにつき 1 秒弱ではあるが必要な時間が短縮さ

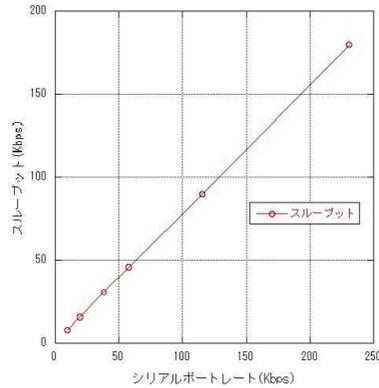


図 8 データ通信におけるスループット

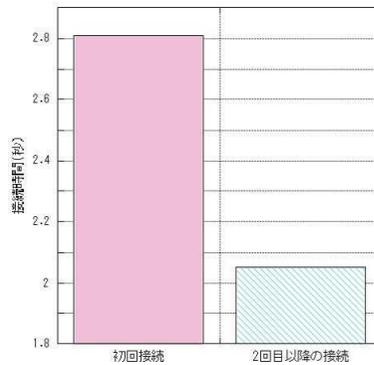


図 9 初回接続と 2 回目以降の接続作業に必要な時間比較

れる。

これより、Bluetooth アドホックネットワークの構築においては、一旦、経路構築を行った後は頻りに経路が変化しない状態、静的なトポロジにおいて画像などのデータを取り扱うケースに威力を発揮すると考えられる。

## 5. おわりに

Bluetooth アドホックネットワーク構築のため、マイコンによって制御された Bluetooth デバイスを用いて通信の特性やマルチホップの実用性について検証した。実機実験で確認したリンク確立までの所要時間、安定した伝送速度、およびロス発生の少なさを考慮して、今後はアドホックルーチングプロトコルを実装する。また、ルーチングはテーブル駆動型のようにあらかじめ収集した経路情報を使い、経路収集作業を最小限に抑える方式が適していると考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) 平田千浩, 二木志郎, 大島勝志, 三好匠, "Bluetooth におけるマルチホップブロードキャスト方式の設計と実装", IEICE Technical Report NS2005-199, (2006-3).
- 2) 佐藤正, 間瀬憲一, "Bluetooth アドホックネットワークにおける分散型スキヤッタネットオペレーションプロトコル", IEICE Technical Report RCS2002-4, (2002-4).
- 3) 宮津和弘, "テクノロジー解体新書 Bluetooth 技術解説ガイド (第 1 版)", リックテレコム (2001-6) .
- 4) 無線化.com, <http://www.musenka.com/>, refetenced 2012/01.
- 5) マイコン徹底入門, <http://miqn.net/>, refetenced 2012/01.
- 6) 川内康雄, "STM32 マイコン徹底入門", CQ 出版社 (2010-12) .