

Bluetooth通信を活用した 移動体間距離推定に関する研究

薄井 智貴¹・金杉 洋²・熊谷 潤³・山本 俊行⁴・森川 高行⁵

¹正会員 名古屋大学 特任准教授 経済学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: tomo.usui@nagoya-u.jp

²正会員 東京大学 特任研究員 地球観測データ統合連携研究機構 E-mail: yok@iis.u-tokyo.ac.jp

³非会員 東京大学 客員研究員 空間情報科学研究センター E-mail: kumajun@iis.u-tokyo.ac.jp

⁴正会員 名古屋大学 教授 エコトピア科学研究所 E-mail: yamamoto@civil.nagoya-u.ac.jp

⁵正会員 名古屋大学 教授 環境学研究科 E-mail: morikawa@nagoya-u.jp

通信技術やモバイルセンサの高度化・汎用化に伴い、近距離無線通信技術の一つBluetoothが爆発的に普及している。中でも、ここ一年でようやく実用化され始めた「Bluetooth4.0LE規格」は、これまで普及していたBluetoothクラシック規格とは異なり、小型、軽量、超低消費電力化され、様々な通信用途において活用が期待できる。そこで本研究では、Bluetooth4.0LE間通信によるモバイルセンシングデータを利用した、人々の位置推定や交通行動の把握、リアルタイム狭域情報提供の実現を目指す。本稿では、Bluetooth間通信を用いた位置推定を行うための一つの技術として、まず、Bluetooth通信の受信電波強度(RSSI)値による距離推定の可能性について検討する。具体的には、ワイブル分布等の統計モデルを仮定した距離推定モデルを構築し、スマートフォンアプリへ実装した結果について報告する。

Key Words : *Bluetooth Technology, Distance Estimation, Statistical Model Analysis*

1. はじめに

2001年に欧州で採択された Bluetooth クラシック規格(ver.1.1~3.0)は、搭載する近距離無線機器の相互接続が全世界で保証されており、ヘッドホンやマウス、スマートフォンなどに広く利用されている。一方、接続数や消費電力、受信・接続時間などにおいて負の面も多かった Bluetooth クラシック規格だが、2010年7月に全くの新しい規格で Bluetooth4.0LE 規格が登場し、ここ一年でようやく実用化され始めた。この Bluetooth4.0LE は、Low Energy 機能(LE)による、小型・軽量化、超低消費電力などの特徴を持ち、特にこれまで単3電池で3日程度しか持たなかった機器が、理論上、小型ボタン電池1つで1年間の利用が可能のように設計されている。

本研究では、この超低消費電力のBluetooth4.0LE間通信技術に着目し、例えば、Bluetooth間通信を活用した歩車間のための危険情報提供、観光回遊行動の調査、歩行者の断面交通量観測など、次世代ITSに向けた通信技術の新たな利活用を提案することを最終目的としている。本稿では、まず、Bluetooth間の通信状況の把握や、機器間の距離を正確に把握するための手法について検討を行った。具体的には、Bluetooth4.0LEを搭載した小型発信機の開発と、受信電波強度(RSSI: Received Signal Strength Indicator)計測のためのスマートフォンアプリケーション

の開発、および開発機器による実測結果に基づく伝搬路距離推定モデルに関する検討結果について報告する。

2. 既往研究

Bluetooth 通信に関する研究は、Bluetooth の普及に伴い2003年頃から今日まで、情報通信の分野において様々な位置推定や距離推定等が行われている。

佐藤ら¹⁾は、歩行者デバイスに組み込まれた Bluetooth と固定設置された Bluetooth 間の距離から位置推定を行う方法を提案しており、学内実測実験の中で電波強度と距離の関係性について考察している。また、山中ら²⁾は、予め固定設置した複数の Bluetooth アクセスポイントから移動する Bluetooth 端末の位置を推定する手法を提案している。一方、交通分野において、北澤ら³⁾は、Bluetooth の Mac アドレスの一意性を利用し、2地点間の計測時間差から旅行時間を推定する手法を提案し、交通調査への活用について述べている。これらの方法はいずれも複数の固定 Bluetooth 端末から距離を推定するもので、本研究のような1対1の動的端末間距離を推定するものには適用が難しい。

一方、RSSIを用いて1対1の端末間位置を推定する手法は、趙ら⁴⁾がPAN(Personal Area Network)と呼ばれる短距離無線ネットワークを用い、ノード間の距離とRSSI

値の実測から確率モデルを作成し、シミュレーションを用いて距離の推定精度を評価している。また、川村ら⁹⁾は、無線 LAN 環境において複数のアクセスポイントと受信端末間の RSSI 値を計測し、最尤推定法を用いて端末の位置を推定している。

本稿においては、対象とする通信規格は異なるものの、同目的の趙らと同様の手法を用い、Bluetooth 端末を用いた計測結果から確率統計モデルを作成し、得られた RSSI 実測値から Bluetooth ノード間の距離を推定することを試みた。

3. 小型 Bluetooth4.0LE 発信機の開発と RSSI 計測用スマートフォンアプリの開発

本研究では、通信端末の携帯性向上のための小型化、継続稼働のための超省エネ化を重視し、五百円玉サイズの超小型 Bluetooth 発信機を開発した（図-1）。開発した発信機は、省電力 Bluetooth4.0LE の Class2 規格のもので、1Hz で Bluetooth 信号を継続して送信し続けるという、既製品にはない特徴を持っている。基盤の裏側には 3V コイン電池 1 個（CR-2032）を搭載し、数ヶ月～1 年間信号を送り続けることが可能である。本稿では、この送信機側が発する電波受信強度（RSSI）により端末間距離を推定することを試みた。実験イメージを図-2 に、発信機の概要を表-1 に示す。

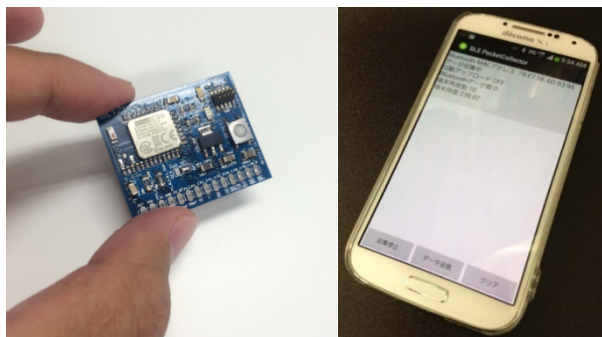


図-1 開発した小型 Bluetooth4.0LE 発信機(左)と Mac アドレスと RSSI 値を取得するスマートフォン(右)

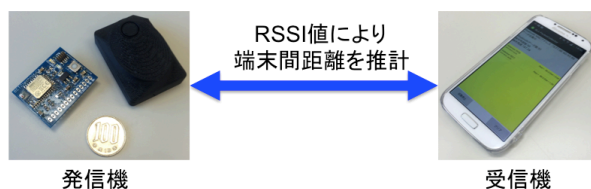


図-2 本稿の実験イメージ

表-1 小型 Bluetooth 発信機の詳細

項目	内容
規格	Bluetooth4.0LE
通信距離	Class2 (10m)
電波送信	1Hz
電力	3V リチウムコイン電池

※技術基準適合証明取得済み

次に、小型発信機から送信する RSSI 値計測のための Android スマートフォンアプリケーションを開発した。本アプリケーションは、Samsung 社製 Galaxy S4 専用アプリケーションで、Samsung API を用いて Bluetooth4.0LE 通信を受信する。特にペアリングは行わず発信された Mac アドレスと RSSI を受信し、スマートフォン内部の SD カード領域に値をファイルに記録するものである。仕様の詳細は表-2 に示す。このリアルタイムで取得した RSSI 値を距離推定モデルの入力値とすることで、端末間の距離が推定可能となる。

表-2 RSSI 計測のためのアプリケーションの詳細

項目	内容
搭載端末	Samsung 社製 Galaxy S4
OS	Android 4.2.2
規格	Bluetooth4.0LE
RSSI 受信	1 秒/回

4. 開発機器を用いた距離計測実験

本稿の目的は、Bluetooth 通信電波を用いた端末間距離計測の可能性と推定誤差レベルの確認である。そのために、まず、固定された小型発信機から発信する電波を、RSSI 値としてスマートフォンで取得可能かどうか検証を行うとともに、周辺電波の影響について検証を行う。

実験は、様々な電波干渉や反射が想定される 10m 四方の一般的な大学内の教室を利用した室内実験（図-3(a)）と、完全な無電波環境を実現した電波暗室の 2 カ所において実施した（図-3(b)）。電波暗室は、部屋の広さが約 24m² で、暗室外からの電磁波を遮断し、暗室内での電磁波の反射を防ぐことが可能な部屋である。



図-3(a) 室内実験会場（左）と室内実験計測（右）



図-3(b) 電波暗室入口（左）と室内（右）

まず、教室による室内計測実験は、図 3(a)のように、部屋の中心に発信機を設置し、受信機であるスマートフォンを少しずつ遠ざけながら電波と距離を計測した。また、電波暗室での計測実験の方法を図-4に示す。写真のように、開発した小型発信機を部屋奥の壁手前の高さ110cm付近に固定し、計測アプリケーションを搭載したスマートフォンの距離を少しずつ後方へ遠ざけながらRSSI値の計測を行った。計測は、端末間距離1mまでは10cm間隔で、1m以上は50cm間隔で100~200点ずつ行い、2時間かけて2,400点のRSSI値を取得した。

さらに、周辺の電波干渉によるRSSI値の変化を調べるため、発信機および受信機周辺に合計16台の電波発生源（BluetoothやWiFi機器）を設置し、同様の実験を行った。ただし、データ取得間隔は50cmに固定し、観測点は5,314点とした。

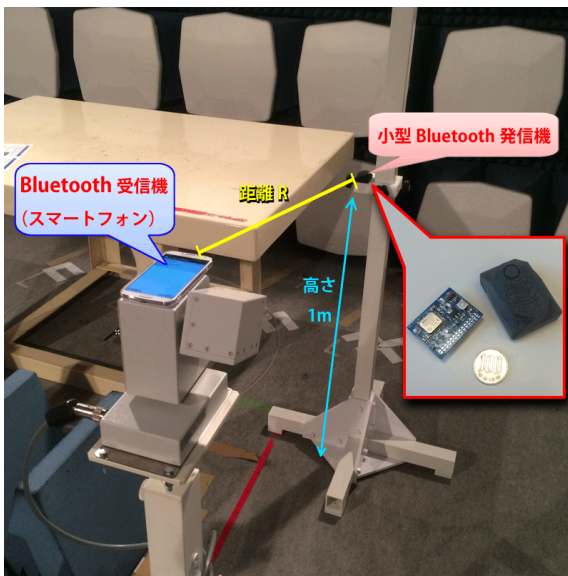


図-4 電波暗室内での距離計測実験

室内計測結果および電波暗室における計測結果を図-5、図-6に示す。まず、図-5は、電波暗室における測定結果と一般の教室等における測定結果を比較したものである。図を見ると、双方とも同じ距離でも分散が大きく同じ距離でもRSSI値に幅があるため、この値だけで距離を推定することは困難なことが伺える。ただし、値は距離に比例して減衰している傾向が伺える。これは、Wi-Fiや他

の通信電波と同様の電波特性であり、趙ら⁴⁾と同様、確率モデルを用いることである程度の距離推定の可能性を示唆している。また、電波暗室で取得したRSSI値に比べ、教室内で測定した値はやや低い値を示しており、実空間においては何らかの電波干渉や反射の影響があるものと推測できる。

次に、電波干渉や反射の影響を調べるため、同じ電波暗室において電波を故意に発信し、電波干渉の影響を確認した。図-6は機器周辺に電波を発信した場合とそうでない場合のRSSI値の比較である。双方とも同様のばらつきがあり、値に大差は見られないことがわかる。つまり、電波発生源が周辺に多数存在している場合でも、RSSI値に大きな変化は見られず、電波干渉は起こらないことが見てとれる。以上のことから、機器自身が発生させる電波のマルチパスによる電波反射の影響で数値が乱れる可能性があることが分かった。

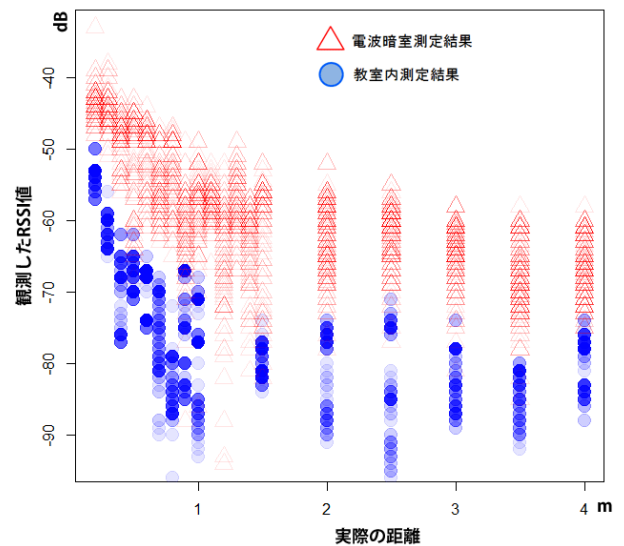


図-5 電波暗室と教室でのRSSI値測定結果の比較

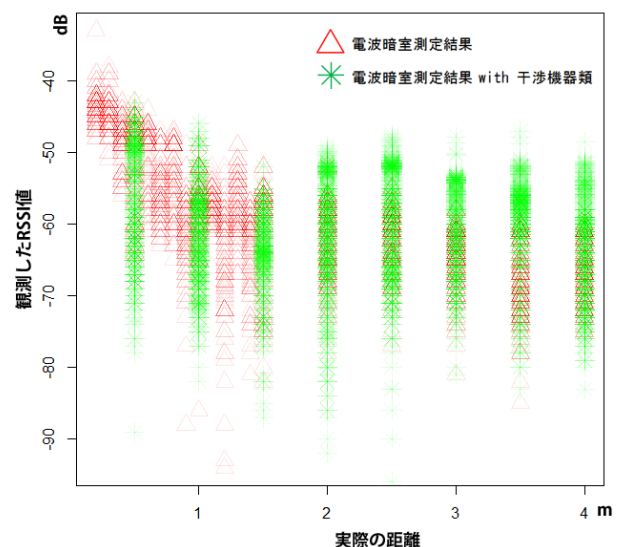


図-6 電波暗室でのRSSI値測定結果と周辺干渉機器を設置したときのRSSI値測定結果比較

5. 伝搬路距離推定モデルの作成と考察

本研究では、実世界での距離推定を目的としているため、まずは、4.で計測された教室測定結果を用いて、RSSI 値から距離を推定するための伝搬路距離推定モデルの構築を行った。

統計モデルは、分布系が指数分布に近似されていることから、図-7 のような 5 つの線形・非線形回帰モデルを推定し、それぞれ RMSE（平均二乗誤差）と AIC（赤池情報量）を求めた。結果を表-3 に示す。

推定結果より、最も AIC が低く、RMSE が小さいワイブル分布モデルを適用し、スマートフォンアプリに実装することとした。

ワイブル分布は、装置故障など生存時間モデルや市場データの解析に多く使われる確率分布である（式 1）。

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^m \right] \quad \dots \text{式1}$$

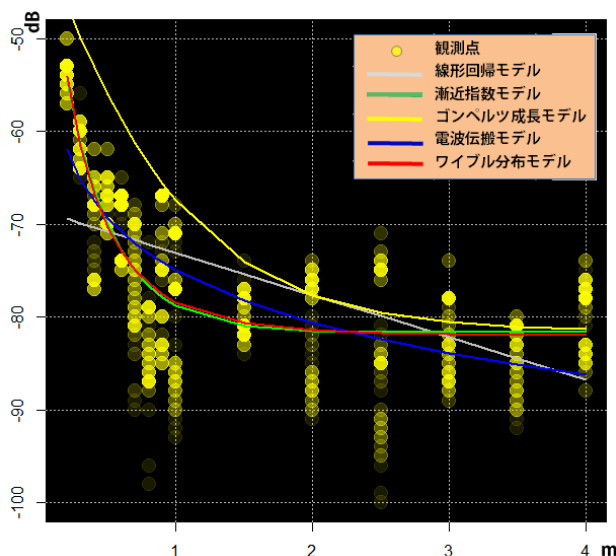


図-7 RSSIと距離の関係を示した散布図と推定回帰曲線

表-3 推定結果と観測値の誤差量とモデル評価の比較

線形／非線形回帰モデル	RMSE	AIC
線形モデル	10.86	11,637
漸近指数モデル	5.24	10,360
ゴンペルツ成長モデル	5.34	10,924
電波伝搬モデル	6.83	10,366
ワイブル分布モデル	5.12	10,357

6. スマートフォンアプリへの実装

5.で構築した距離推定モデル式を用いて端末間距離を可視化するプログラムを開発し、スマートフォンアプリケーションとして実装した。今回実装した可視化は非常にシンプルで、端末間距離に

応じて3段階に画面が変化するものである（図-8）。これにより、スマートフォンが小型端末を検出していない状態、つまり端末間距離が大きい場合は画面上は通常と変化なく、端末を発見し距離が1m以上ある場合は画面が黄色に変化し、そして、端末間の距離が1m以内に近づけばスマートフォン画面が赤色になる（表-4）。

このアプリを利用することで、例えば、端末の距離に応じた情報提供や、周辺端末数のカウント、そのおおよその距離が把握可能になる。ただし、現段階では、3段階程度のおおよその距離しか把握することが難しいため、今後、その他のセンサの利用や、より高精度な距離推定手法の検討を行うことが望まれる。

表-4 距離に応じて変化

条件	スマートフォン画面の変化
端末未検出	通常（白色）
端末検出、距離：1m以上	注意（黄色）※図-8
端末検出、距離：1m未満	警告（赤色）

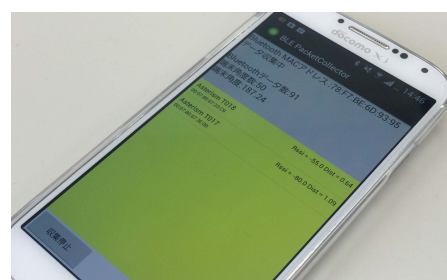


図-8 距離を色で表すアプリ実行画面
(画面黄色：1m以上の距離)

7. まとめと今後の課題

低コスト、超低消費電力のBluetooth4.0LE通信技術の社会的価値創出に向け、本稿では、まず通信機器の開発および通信アプリケーションの開発を行った。また、それらを機器から得られる実測データを用いて機器間距離推定手法の検討およびワイブル分布に基づく距離推定モデルを構築し、端末間距離を3段階で示すスマートフォンアプリケーションに実装した。

今後、他のセンサ値との連携による距離推定精度の向上を試みる予定である。

謝辞：

本研究は、文部科学省科学研究費 基盤研究(B)[研究課題番号 25289162]の支援により、文科省リーディング教育の一環として実施したものである。また、機器およびアプリケーション開発にあたり、リベラ株式会社の本丸勝也様には多大なる協力を頂いた。ここに感謝致します。

参考文献

- 1) 佐藤智美, 小宮山哲, 下田雅彦, 劉渤江, 横田一正, “Bluetooth の電波強度を用いた位置推定方式の検討”, deim2011proceedings, 2011.
- 2) 山中康正, 橋浦正樹, 上村進, 佐藤誠治, “Bluetooth による位置情報提供システムの開発とその評価”, シャープ技法, No.19, 2003.
- 3) 北澤俊彦, 塩見康博, 田名部淳, 菅芳樹, 萩原武司, “Bluetooth 通信を用いた旅行時間計測に関する基礎的分析”, 土木計画学研究・講演集, vol.47, CD-ROM, 2013.
- 4) 趙大鵬, 高島雅弘, 柳原健太郎, 武次潤平, 福井潔, 福永茂, 原晋介, 北山研一, “センサネットワークにおける受信信号電力を用いた最尤位置推定法”, 電子情報通信学会技術研究報告. NS, ネットワークシステム 104(690), 409-414, 2005.
- 5) 川村諒, 久保田真一郎, 副島慶人, 古川誠一, 杉谷賢一, “既設アクセスポイントを利用した屋内位置情報取得システムのための位置推定精度による分析”, 情報処理学会論文誌, vol.52, No.3, pp.1357-1364, 2011.

(2014. 4. 1 受付)

A Study on Distance Estimation between Moving Objects using Bluetooth Technology

Tomotaka USUI, Hiroshi KANASUGI, Jun KUMAGAI,
Toshiyuki YAMAMOTO and Takayuki MORIKAWA