

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18041

研究課題名（和文）マルチチャネル通信を利用した屋内BLE, ZigBee測位の精度向上に関する研究

研究課題名（英文）Accuracy Improvement in Indoor BLE, ZigBee Localization Systems Using Multi-Channel Communication

研究代表者

石田 繁巳 (Ishida, Shigemi)

九州大学・システム情報科学研究所・助教

研究者番号：10724388

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、BLE（Bluetooth Low Energy）やZigBee（IEEE 802.15.4）などの省電力無線通信技術を用いた屋内測位の精度向上を目的としている。BLEやZigBeeなどの省電力無線通信技術は帯域幅が狭く、壁や天井などで複雑に反射した電波が入り交じる屋内マルチパス環境においては測位精度が大幅に低下する。本研究では、チャネルを切り替えながら通信した場合にチャネルごと・場所ごとに特性差が現れることに着目し、複数チャネルの通信特性差を利用して測位精度を向上させる技術を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、ZigBeeやBLEを用いた測位において推定精度の著しい低下を防ぐ技術が確立されたと言える。これまで測位精度の問題でWi-Fiを採用せざるを得なかったようなIoT機器における通信モジュールの置き換えに大きく寄与できる。通信モジュールの置き換えは通信性能の低下につながるが、消費電力の低下に伴ってより小型なデバイスの実現も可能となるなど、副次的な面も含めると大きな波及効果が期待できる。また、広帯域化する無線通信方式にも応用ができる方式であることから、より通信とともに高精度な測位を実現するための基盤技術になりうると期待される。

研究成果の概要（英文）：This research aims to develop an accurate indoor localization technology for narrow-band, low-power wireless communication technologies such as BLE (Bluetooth Low Energy) and ZigBee (IEEE 802.15.4). Low-power narrow-band wireless communication technologies such as BLE and ZigBee tend to suffer from a low localization problem due to multiple wireless signal paths. We therefore developed an accurate indoor localization technology relying on differences in multiple channels. Wireless communication in different channels has different responses depending on location and channel. We utilize the difference to improve localization accuracy.

研究分野：無線センサネットワーク

キーワード：センサネットワーク センサ測位 測位システム フィンガープリント法

1. 研究開始当初の背景

多くのスマートフォンに GPS (Global Positioning System) モジュールが内蔵され、ユーザの位置を手軽に取得できるようになったことから、ユーザの位置に応じてサービスを提供する様々な「位置情報サービス」が提案されている。GPS は屋外のみで利用可能なことから、これまでの位置情報サービスは屋外を中心として普及が進んでいる。

屋内環境に目を向けると、ショッピングモールやイベント会場での人流の最適化、屋内位置情報サービスの実現、屋内での行動認識など、「位置」を用いたサービスの要望がある。屋内では GPS を利用できないことから、屋内で利用可能な GPS に相当する測位技術の普及が望まれている。

このような要望に対し、すでに広く普及している Wi-Fi を用いた屋内測位技術の研究が多く行われてきた。しかしながら、小型の IoT 機器など、消費電力制約の大きい機器には Wi-Fi が搭載されないことも多く、機器の位置情報を取得することはできない。IoT 機器は屋内サービスの実現に向けたセンサなどで多用されており、その位置を効率よく取得することは大きな課題となっている。

一方で、IoT 機器に搭載された BLE (Bluetooth Low Energy)、ZigBee (IEEE 802.15.4) などの省電力無線通信モジュールを用いて Wi-Fi と同様の測位を行う研究も行われているが、5m 程度の測位精度しか得られないという問題がある。通信省電力無線は送信出力が弱いこと、帯域幅が狭いため周囲の環境変化の影響を受けやすく、高い精度の実現が困難である。このため、BLE や ZigBee などの省電力無線を用いて高精度な測位を実現したいという要望が高まっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、BLE や ZigBee などの省電力無線を用いた測位における測位精度の向上である。これに向け、本研究では複数のチャンネルにおける電波伝搬特性の差を利用するマルチチャンネルフィンガープリント測位手法を提案する。マルチチャンネルフィンガープリント測位では、まず学習フェーズとして基準ノードが発したビーコン信号の受信パワーを測位対象エリアの各所で測定して「位置指紋」として記録し、位置指紋データベースに蓄積する。ついで測位フェーズでは測位ノードでビーコン信号の受信パワーを測定して位置指紋を作成し、その位置指紋ともっとも似ている位置指紋をデータベース内で探すことで位置を推定する。このとき、基準ノード・測位ノードにおいてチャンネルを切り替えながらビーコン信号の送受信を行うことでチャンネル毎に異なる電波伝搬特性を特徴量として取り入れた測位を実現する。

3. 研究の方法

マルチチャンネルフィンガープリント測位の実現に向けて以下の 3 つの課題に対する解決策を探求する。

(1) 環境変化を考慮した位置指紋

マルチチャンネルフィンガープリント測位では複数チャンネルで測定した受信パワー情報を利用して位置指紋を作成するが、省電力無線はチャンネル帯域幅が狭いためマルチパスの影響を受けやすく、人間の動作などによって特定のチャンネルで受信パワーが短時間に大きく変化することが予想される。このような場合には測位ノードが短時間で測定した受信パワーと比較的長時間の観測で作成した位置指紋の受信パワーとが大きく異なるものとなり、複数チャンネルで測定した受信パワーをそのまま位置指紋として用いると測位誤差の増加を招く。このため、短時間の環境変化による不安定さが混入している可能性を考慮して特徴量を抽出して位置指紋を作成する技術を確立する。

(2) 位置指紋情報データ量の削減

マルチチャンネルフィンガープリント測位では (基準ノード数) × (チャンネル数) の受信パワー情報が存在するため、位置指紋データベースのデータ量増加とともに位置指紋の類似度計算の計算量が問題となることが予想される。異なるチャンネルで測定した 1 つの基準ノードに関する受信パワーにはいくつかのチャンネルで相関性があると考えられるため、チャンネル間の相関性を分析して測位精度を低下させることなく位置指紋情報を削減する技術を確立する。

(3) 異種無線モジュールを用いた位置指紋収集

フィンガープリント測位の実現に向けては学習フェーズにおける位置指紋収集のコストが大きな課題となる。Wi-Fi フィンガープリント測位においてはスマートフォンを持ち運ぶユーザの協力によって位置指紋収集を行う手法が提案されているが、省電力無線を用いた IoT 機器などの測位の場合には IoT 機器を日常的に持ち運んでもらう必要があり、適用が困難である。このため、Wi-Fi など他の無線モジュールを用いて位置指紋を収集し、これを用いて省電力無線ノードの測位を可能とする技術を確立する。

4. 研究成果

本研究課題で得た主な成果は以下の通りである。

(1) 統計的な検定を用いたマルチチャンネルフィンガープリント測位

研究課題(1)及び(2)に向けては、RSS(受信信号強度: Received Signal Strength)情報を統合して扱うことが必須である。実環境ではRSSが大きく揺らいでおり、フィンガープリント測位で平均値だけで類似性を判定すると大きな測位誤差を生じる。そこで本研究では、複数のチャンネルの測定したRSSのサンプルの統計的な性質を用いてフィンガープリント測位を行う技術を開発した。

具体的な成果は以下の通りである。

- 2.4GHz帯においては16個のZigBeeチャンネルが存在する。これらのチャンネル全てでRSSを測定して測位を行うと、揺らぎの影響の大きい膨大なRSSの測定データを用いて測位を行うことが必須となる。本研究では、統計的な検定を用いて類似性の高いチャンネルを統合することでRSSの揺らぎの影響の軽減及び扱うデータ量の削減を試みた。
- 統計的特徴としてWelchのt検定を用いてRSSサンプルの母平均が統計的に高い類似度を持つと推定されるチャンネルを統合し、チャンネルを区別せずに平均値を計算してフィンガープリント測位を行うことで、必要となるRSSデータを削減する技術t-MultiLocを開発した。
- t-MultiLocでは統合後のRSSサンプル数が多くなることから、多くの場合において平均化の効果が大きくなり、RSSの揺らぎの影響が軽減される。このことからデータ量を削減しながら測位精度を向上させることができる。
- 実環境で取得した複数チャンネルのRSSサンプルを用いて、複数チャンネルを統合してマルチチャンネルフィンガープリント測位を行うt-MultiLocの測位精度を評価した結果、全チャンネルのRSSを平均した測位と比較して測位精度を約22%向上できることを確認した[1]。

(2) Wi-Fi フィンガープリントを用いた ZigBee センサノードフィンガープリント測位

研究課題(3)に向けては複数のチャンネルを切り替えながら異種無線モジュールから送信された信号を検出する技術が必須である。本研究では、その最たる例として、Wi-Fiの広帯域な信号を複数のZigBeeチャンネルで検出する技術を開発し、Wi-Fi測位システムのフィンガープリントデータを用いてZigBeeセンサノードの測位を試みた。

具体的な成果は以下の通りである。

- Wi-FiとZigBeeは同じ2.4GHz帯を用いていることから、Wi-Fiビーコン信号の周期性を利用してZigBee無線ノードでWi-Fiビーコン信号を検出できる。これまでにこの原理を応用した信号検出技術を開発しており、この技術を応用して、複数のZigBee無線ノードで同一のWi-Fi APの信号強度を測定する技術を開発した。
- 測定したRSSを用い、Wi-Fi測位システムのフィンガープリント情報を用いて測位を行うフィンガープリント測位技術を開発した。Wi-Fiビーコン信号をZigBee無線ノードで検出し、そのRSSを測定してフィンガープリント測位を行う方式はこれまでに提案している。この技術を応用し、複数のチャンネルで測定したRSSを統合して広帯域で測定したRSSを擬似的に作成し、これを用いて測位を行うMultiZigLocを開発した。
- 屋内環境でZigBee無線ノードを用いて実証評価を行った結果、1つのZigBeeチャンネルで測定したRSSを用いる場合と比べて測位の正答率を10ポイント以上向上できることを確認した[2]。

(3) BLEを用いたチャンネル区別フィンガープリント測位

ZigBee以外にIoT機器で多用される省電力無線通信としてBLEが挙げられる。本研究では、マルチチャンネルを用いた測位が、ZigBeeに加えてBLEにおいても有効であることを検証するため、BLEを用いたマルチチャンネルフィンガープリント測位技術を開発した。

具体的な成果は以下の通りである。

- BLEはチャンネルを切り替えながら通信を行うため、ビーコン信号を取得しても複数のチャンネルで送信された信号が混ざり、区別することができない。このため、チャンネル情報を付加したビーコン信号を送信し、チャンネルを区別しながらフィンガープリント測位を行うチャンネル区別測位方式をこれまでに提案してきた[3][4]。本研究では、まずこの手法を実環境中で詳細に評価する実験を行った。その結果、チャンネルを区別しないでフィンガープリント測位を行う場合に比べて、測位精度を約28.5%改善できることを確認した[5]。
- 上述の評価を行う中で、チャンネル区別測位方式は測位精度を向上させる一方で、最大誤差を増加させるという問題があることを明らかにした。
- この問題の解決に向け、2段階に分けてチャンネル区別測位を行う2段階チャンネル区別測位技術を新たに開発した。2段階チャンネル区別測位では、従来のBLEフィンガープリント測位と同様にチャンネルを区別せずに測位を行って位置を粗く推定し、位置の候補エリアを絞り込む。そして、その候補エリア内でチャンネル区別測位を行って精密な測位を行う。これにより、測位精度を改善するとともに、従来の測位よりも最大誤差が大きくなることを防止する。実環境でRSSデータを取得して評価を行った結果、測位精度を61.5%改善するとともに、最大誤差を約1/3に削減できることを確認した[6][7]。

<引用文献>

- [1] 山本貴宏, 石田繁巳 他, “[ポスター講演] t-MultiLoc: t 検定を用いたマルチチャンネルフィンガープリント法の提案”, 革新的無線通信技術に関する横断型研究会 (MIKA 2018) , Sep 2018.
- [2] 木元亮太, 山本貴宏, 石田繁巳 他, “ZigBee のチャンネル間特性差を利用した屋内測位手法の初期的評価”, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO2018) , pp.596-602, Jul 2018.
- [3] S. Ishida, Y. Takashima, S. Tagashira, and A. Fukuda, “Proposal of Separate Channel Fingerprinting Using Bluetooth Low Energy”, IIAI International Congress on Advanced Applied Informatics (AAI), ESKM, Kumamoto, Japan, pp.230-233, Jul 2016.
- [4] S. Ishida, Y. Takashima, S. Tagashira, and A. Fukuda, “Design and Initial Evaluation of Bluetooth Low Energy Separate Channel Fingerprinting”, New Trends in E-Service and Smart Computing, Studies in Computational Intelligence, vol.742, Springer, T. Matsuo et al. (eds), pp.19-33, Jan 2018.
- [5] S. Ishida, S. Takaki, T. Yamamoto, S. Tagashira, and A. Fukuda, “Evaluation of BLE Separate Channel Fingerprinting in Practical Environment”, IIAI International Congress on Advanced Applied Informatics (AAI), ESKM, Yonago, Japan, pp.121-124, Jul 2018.
- [6] 山本 貴宏, 石田 繁巳, 木元 亮太, 田頭 茂明, 福田 晃, “2 段階チャンネル区別 BLE 測位手法の設計と評価”, 情報処理学会研究報告, モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会, vol.2019-MBL-90, no.5, Mar 2019.
- [7] T. Yamamoto, S. Ishida, R. Kimoto, S. Tagashira, and A. Fukuda, “Design of BLE 2-Step Separate Channel Fingerprinting”, IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring), Online, pp.1-6, May 2020.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Masato Uchino, Billy Dawton, Yuki Hori, Shigemi Ishida, Shigeaki Tagashira, Yutaka Arakawa, and Akira Fukuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Initial Design of Two-Stage Acoustic Vehicle Detection System for High Traffic Roads	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. Int. Workshop on Pervasive Computing for Vehicular Systems (PerVehicle)	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shigemi Ishida, Yutaka Arakawa, Shigeaki Tagashira, and Akira Fukuda	4. 巻 32(1)
2. 論文標題 Wireless Local Area Network Signal Strength Measurement for Sensor Localization without New Anchors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 97-114
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18494/SAM.2020.2592	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Masahiko Miyazaki, Shigemi Ishida, Akira Fukuda, Tomoki Murakami, and Shinya Otsuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Initial attempt on outdoor human detection using IEEE 802.11ac WLAN signal	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. IEEE Sensors and Applications Symposium (SAS)	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masato Uchino, Shigemi Ishida, Kazuo Kubo, Shigeaki Tagashira, and Akira Fukuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Initial design of acoustic vehicle detector with wind noise suppressor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. Int. Workshop on Pervasive Computing for Vehicular Systems (PerVehicle)	6. 最初と最後の頁 814-819
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Ishida, S. Takaki, T. Yamamoto, S. Tagashira, and A. Fukuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Evaluation of BLE Separate Channel Fingerprinting in Practical Environment	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IIAI International Congress on Advanced Applied Informatics (AAI), ESKM	6. 最初と最後の頁 121-124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IIAI-AAI.2016.22	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Yamamoto, S. Ishida, R. Kimoto, S. Tagashira, and A. Fukuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Design of BLE 2-Step Separate Channel Fingerprinting	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring),	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9128872	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 内野 雅人, 石田 繁巳, 田頭 茂明, 荒川 豊, 福田 晃
2. 発表標題 多車線道路に対応した2段階音響車両検出システムの初期的評価
3. 学会等名 情報処理学会第27回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp.84-90
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内野 雅人, 石田 繁巳, 田頭 茂明, 荒川 豊, 福田 晃
2. 発表標題 ステレオマイクを用いた車両検出及び車線推定手法の検討
3. 学会等名 情報処理学会ITS研究会, ITS研究シンポジウム, ポスター
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 内野 雅人, Dawton Billy, 堀 祐貴, 石田 繁巳, 田頭 茂明, 荒川 豊, 福田 晃
2. 発表標題 音響車両検出システムの多車線道路における車線推定手法の提案
3. 学会等名 情報処理学会全国大会, 7U-02
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本 大生, 高橋 遼, 石田繁巳, 田頭茂明, 福田 晃
2. 発表標題 無線LANを用いたデバイスフリー室内混雑度推定の初期評価
3. 学会等名 情報処理学会全国大会, 6W-07
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本 貴宏, 石田 繁巳, 木元 亮太, 田頭 茂明, 福田 晃
2. 発表標題 2段階チャネル区別BLE測位手法の設計と評価
3. 学会等名 情報処理学会研究報告, モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会, vol.2019-MBL-90, no.5, pp.1-7
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮崎 雅彦, 石田繁巳, 田頭茂明, 福田 晃, 村上 友規, 大槻信也
2. 発表標題 WLAN信号を用いた屋外人体センシングシステムの初期評価
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会, p.1, B-18-1
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本 貴宏, 石田繁巳, 田頭茂明, 福田 晃
2. 発表標題 BLE測位精度向上に向けた2段階チャンネル区別測位の初期評価
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会, p.1, B-18-4
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本 貴宏, 石田 繁巳, 田頭 茂明, 福田 晃
2. 発表標題 [ポスター講演] t-MultiLoc: t 検定を用いたマルチチャンネルフィンガープリント法の提案
3. 学会等名 革新的無線通信技術に関する横断型研究会 (MIKA 2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木元 亮太, 山本 貴宏, 石田 繁巳, 田頭 茂明, 福田 晃
2. 発表標題 ZigBeeのチャンネル間特性差を利用した屋内測位手法の初期的評価
3. 学会等名 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOM02018)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------