

BLE電波測位に基づく空調機器の自動同定手法の検討

梶田 宗吾¹ Nathavuth Kitbutrawat¹ 山口 弘純¹ 東野 輝夫¹

概要：大量の空調機器の導入と管理が必要となるスマートビルディングにおいては、ネットワーク経由でそれらを一元管理および制御する技術が必須となる。しかし、制御対象となる各機器のネットワークアドレスと、そのレイアウト上の設置位置情報との対応は導入時にできていないことが多く、その紐づけをなるべく手間なく行う方法論が望まれる。これに対し、我々の研究グループでは、BLE と有線ネットワークが組み込まれた空調機を前提とし、BLE モジュール間でアドバタイズパケットを交換し、それらの電波強度をもとに空調機器間のおおよその近接関係を把握するとともに、フロアレイアウトを自動解析することで得た空調機の配置位置とマッチングすることで、空調位置と BLE の自動同定を行うことを目標としている。本論文では、その自動同定に向け、天井環境が 2.4GHz 帯の電波伝搬にどのような影響を与えるかを調査し、それに基づき研究室環境での簡易な同定実験を行ったため、それについて報告する。まず、研究室環境を対象とした天井環境の構造の調査を実施することで電波伝搬に大きく影響を与える構造物の検討を行った。その結果、一般的の電波伝搬モデルで考慮される送受信点間の距離に加え、特に H 鋼（大梁）が与える影響が大きいことが確認された。その特性に基づき同定手法の検討を行った結果、レイアウト情報から得た距離に基づくクラスタリングとグラフマッチングにより、正解を含む 2 通りの推定位置パターンに絞り込むことができ、一つの BLE の位置が特定されれば残りの BLE の位置が正しく特定可能であることを示した。

1. はじめに

電力使用のピークシフトや居住者快適性の向上に向け、業務用空調機器の電力効率化とともにネットワーク化が進んでおり、スマートビルディングや BEMS (Building Energy Management System) の普及を背景に、今後の一層の導入増が予想される。人の温熱感推定や温湿度の空間網羅的センシング情報に基づき、そういう機器をネットワークで詳細に制御することで、電力と快適性の両立などの実現も期待できる [1]。例えば、ある部屋の空調の設定温度を下げる、といった制御をネットワーク越しに制御する場合には、空調機器のネットワークアドレスとその物理的な設置位置の対応関係が把握できている必要がある。しかし、空調機器を多数設置する必要のある大規模なオフィスビルや商業施設などにおいては、この対応付け作業に大きな労力が必要となる課題がある。

一般にネットワーク上のアドレスは起動時に自動的に設定されるため、設置位置と紐付けるためには、機器を 1 台ずつ手動で起動し、自動的に設定される機器のネットワークアドレスと、起動させた機器を対応付けし、レイアウト

図にネットワークアドレスを反映させる作業が必要になる。しかし多数の空調機器に対しこの作業を一つずつ実施することは、人員および時間の観点から大きなオーバヘッドとなる。特に、空調機器などは内装工事のフェーズで導入されることが多く、作業日程が過密となる段階での作業はなるべく省力化したいといったニーズは強い。また、機器のネットワーク設定が変更または初期化された場合は、同様の作業を行う必要もある。したがって、空調機の ID とその物理的位置を紐づける自動同定手法が実現できれば管理コスト低減に大きく寄与する。

人やモノの位置特定のため、BLE (Bluetooth Low Energy) や ZigBee などの省電力無線が活用されている。BLE はイベント会場、店舗、商業施設、公共空間など様々な環境におけるスマートフォンの位置情報サービスとしての活用事例が多い。基本的には BLE タグを各所に設置し、近接する端末に位置情報を付与するアンカーとして利用する。また以前より、農場などの屋外フィールドや建物内に配置されるセンサーノード群からなる無線センサーネットワークを利用した位置推定も多く研究されている [2]。センサーネットワーク位置推定の多くは、ZigBee などのマルチホップネットワークで推定されるセンサーノード間の位置関係を組み合わせ、相対位置座標を推定する方法であり、

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology,
Osaka University

省電力あるいはコストの関係から GPS を搭載できなかったり、精度面あるいは屋内環境のために GPS が利用できなかったりするセンサーノードの位置把握技術として有用である。

ここで、BLE モジュールは今後の更なる低価格化も期待され、スマートフォンとの相性がよいことから、前述の位置情報サービスのアンカーとして空調機器に組み込む価値も高い。また、BLE モジュール間の通信も可能であり、空調機器の設置間隔（一般に数 m から十数 m）を考慮しても、前述のようなセンサーネットワーク位置推定を適用することも可能であることから、本稿では BLE モジュール内蔵型の空調機器を仮定し、BLE 間のビーコン受信情報に基づくネットワーク位置推定を試みる。

しかし、鋼材やダクトなど電波伝搬に影響を与える可能性のある様々な部材が混在する天井裏においては、電波伝搬が複雑であり、電波強度に対する正確な距離推定は容易でないと想定される。したがって、様々な天井裏構成において事前のデータ収集を行うとともに、対象建造物の利用可能な情報を用いて、なるべく正確な位置関係推定プロセスを構築する必要がある。

本研究では、BLE と制御用有線ネットワークが組み込まれた空調機器を前提とし、それらの BLE モジュール間でアドバタイズパケットを交換し、それらの電波強度をもとに空調機器間のおおよその近接関係を把握するとともに、フロアレイアウトを自動解析し、可能性のある空調配置場所と上記で得られた近接関係のマッチングを試みることで、空調位置の自動同定を行う方法論を検討する。この目的のため、まず天井環境における電波伝搬に着目し、研究室環境を対象とした天井環境の構造の調査を実施することで電波的に影響が大きいと想定される要因の抽出を行う。例えば、図 1 に示すように、天井環境には空調機本体、パイプ、H 鋼、ダクトおよび石膏ボードなどが存在し、それらの設置密度や組み合わせが電波に影響を与えると考えられる。調査結果より、一般的な電波伝搬モデルで考慮される送受信点間の距離および H 鋼（大梁）の存在が電波伝搬に与える影響が大きいことが確認できた。次に、その特性に基づいて同定手法の検討を行った。その結果、一般的な電波伝搬モデルで考慮される送受信点間の距離に加え、特に H 鋼（大梁）が与える影響が大きいことが確認された。その特性に基づき同定手法の検討を行った結果、レイアウト情報から得た距離に基づくクラスタリングとグラフマッチングにより、正解を含む 2 通りの推定位置パターンに絞り込むことができ、一つの BLE の位置が特定されれば残りの BLE の位置が正しく特定可能であることを示した。

2. 関連研究

2.1 RSSI に基づく位置推定とその応用

電波強度（RSSI、受信信号強度）に基づく位置推定技術

は、特に Wi-Fi を用いた屋内環境でのスマートフォントラッキングなどに用いられる [2–5]。これらの基本的なアプローチは、Wi-Fi アクセスポイントをアンカーと捉え、アクセスポイントから送信される電波の減衰量を推定距離情報に変換し、アンカーからの相対的な位置関係を割り出し、地図上にマッピングすることにある [6]。Wi-Fi のみならず、BLE に代表される省電力無線も、同様のアプローチにより、人やモノの位置特定に広く活用されている [7]。例えば、BLE タグはイベント会場などの空間に設置し、近接する端末に位置情報を付与するアンカーとして利用され、スマートフォンの位置情報サービスなどに役立っている。文献 [8] では渋谷の大規模商業ビルを対象に、BLE フィンガープリントを生成し、歩行者自律航法と連携しながら視覚障害者をナビゲートするシステムを構築している。

また無線通信端末群が協調して位置を推定する技術も多く研究されている [9]。例えば、文献 [10, 11] では、緊急時にモバイル端末同士で Wi-Fi ビーコンを送信しあうことでの RSSI を、互いの位置関係の把握に利用している。文献 [12] では、スマートフォン間で Bluetooth によりビーコンを送出し合うことで測定された RSSI を集約し、イベント会場などにおいて複数の歩行者が同一グループとして行動しているのかの判定に使用されている。一方で、BLE の RSSI の観測値は安定しないことが報告されており、十分長期の観測を行うなどの対応策も求められる [13]。

2.2 電波伝搬モデルとそのシミュレーション

電波伝播モデルは、電波伝搬シミュレーションなどにおいて、距離情報などから RSSI の値を推定するために用いられる。しかし、特に室内環境での電波伝搬はモデル化が難しく、これまでに様々な環境を対象とした研究がなされている [14]。例えば、文献 [15] では屋内環境における 2.4GHz 帯のパーティションによる減衰量の計測データを示している。文献 [16] では一般建築に使われている材料が電波伝搬における透過反射特性に対し、どうのような影響を与えるかを実測している。より精度の高い電波伝搬シミュレーションとしてレイトレンジング技術もしばしば用いられる。レイトレンジングでは、アンテナから送出される電波をトラッキングし、壁や窓、ドアや机といった物体表面での反射を鏡像で捉え、反射減衰係数を加味したうえで、実際の送信元からの直接波とみなして電波強度を計算する。例えば文献 [17] では、レイトレンジング技術を活用した屋内電波マップの構築を行っている。本研究では、天井環境のより精細な電波伝搬モデルを取得するため、レイトレンジングを実行可能なネットワークシミュレータ Scenargie [18] を活用する。

2.3 RSSI に基づく自動同定手法

本研究で取り扱う空調機といった設備機器の分野におい



(a) 空調機や H 鋼

(b) ダクトやドレン管

(c) 研究室

図 1 天井環境の様子

て、機器の個別制御のため、設置位置と機器の同定手法の研究が進められている。文献 [19] は、Bluetooth の電波測位に基づく自動同定手法を提案しており、設計図面といった設計情報と RSSI の測定値を入力とし、設置候補箇所の組み合わせから、距離情報と RSSI 値の関係の不適合度が最も少なくなるような解へ収束するよう、遺伝的アルゴリズムへのコード化を行っている。しかし、障害物が電波伝搬に与える影響が考慮されておらず、本研究で取り扱う天井裏環境といった、送受信点間に多様な障害物が存在する環境への直接の適用は困難と想定される。

近年、BIM (Building Information Modeling) など、建造物の設計段階で三次元モデルが作られていることも多く、二次元の図面情報を三次元へ変換するツールも登場している。また、文献 [20, 21] などで見られるように、フロアマップの図面解析やその結果に基づく位置推定手法などの研究も盛んである。本研究では、これらのようなフロアマップの自動解析を組み合わせ、電波伝搬予測を実施することで、精度の高い自動同定手法を検討する。

3. 天井環境の調査と BLE 電波測位

本研究では、空調機に BLE を組み込み、BLE 間のアドバタイズパケットの送受信によって取得できる RSSI をもとに、空調機器間のおおよその近接関係を把握する。同時に、空調機の位置情報などを含む天井環境のレイアウトを解析し、得られた近接関係とレイアウト解析結果のマッチングにより、自動同定を行う手法の構築を目指す。これに対し、まず天井環境における電波伝搬を考慮するため、天井環境の構成要素の列挙、およびその中で電波伝搬に影響を与える可能性のある要素の抽出を行う。

3.1 天井環境の構成要素

図 1 で見られるように、天井環境は一般の屋内環境と比較して空間が狭く、電波伝搬の障害物となりうる物体が密に存在している。実際にどのような物体が存在しているのかを調べるために、我々の研究室の天井環境を対象にした調査を実施し、以降の BLE による電波測位実験でもこの環

表 1 天井環境の部材

| | | |
|----|--------------|------------------------------|
| 空調 | 冷媒系統 換気系統 | カセット機/冷媒配管/ドレン管 換気扇/換気ダクト |
| 構造 | 線 面 | 大梁/小梁/柱 デッキボード/石膏ボード |

境を用いた。

大阪大学情報科学研究科棟のフロアレイアウトを図 2 に示す。本研究では、図 2 中の赤枠で囲った部分を対象としており、学生が入室する大居室と、廊下を挟んで向かい側の教授室を含む 3 部屋の計 4 部屋を対象としている。なお、天井裏に関する設計図面は手に入れることができなかつたため、実際に天井裏を覗き込み、空調機や換気扇、H 鋼（梁）、ダクトや配管の位置関係およびその大きさをレーザー距離計と目視で測量した。

その結果を図 1、図 3 および表 1 に示す。表 1 に示した通り、天井環境には、大きく分けて空調と構造という 2 種類の役割を持つ物体が存在している。空調機はいわゆるエアコンを含む冷媒系統と換気扇などの換気系統の 2 種類に大まかに分類される。それらの位置を図 3 (a) に示す。なお、冷媒系統の空調機を黒箱で、換気扇を白箱で示す。カセット機には、冷媒配管とドレン管の 2 種類の管がそれぞれ 1 本ずつ接続されている（それぞれ、図 3 (c) の黒色線と水色線で示す）。また、換気扇にも、換気ダクトが 2 本接続されている（図 3 (c) の青色線と橙色線で示す）。図 1 (b) に示すように、ダクトは冷媒配管やドレン管と比較して太いことがわかる。

建造物の強度保持のために構造上設置される物体（構造体）には、梁や柱といった線的なものと、天井環境における床や天井を形成する面的なものがある。図 3 (b) に梁（H 鋼）の位置を示す。図 1 (a) に示したような空間の天井環境の大部分を遮るような物体は橙色で示している。天井環境は、石膏ボードを床としデッキボードを天井とした非常に狭い環境となっており、研究室において、その高さは 1m 程度である。

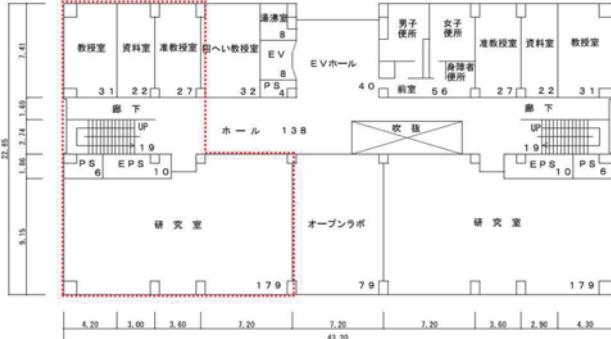


図 2 研究室のフロアレイアウト

3.2 天井環境の BLE 測定

図 3 に示した研究室の天井環境において、各空調機の付近に BLE を設置し、各 BLE 設置場所における RSSI の測定実験を行った。空調機に対する BLE の設置面は図 3 中の赤点で示している。本研究では、BLE を空調機に組み込むことを想定しているため、機器ごとに一定の面に設置すべきであるが、天井を覗き込むことができる場所の制約により、そのような設置はできない。BLE の設置環境の様子を図 4 に示す。図 4 (a) に示すように、空調機の横に BLE デバイスを設置しており、電源には単三乾電池式のモバイルバッテリーを使用した。設置箇所によっては、図 4 (b) に示すように、真上にダクトが存在するような場合もある。設置した各 BLE よりアドバタイズパケットを送信させ、RSSI の計測は作成したロガーアプリ（スマートフォン端末：Nexus 6P）で行った。ロガーアプリでは、パケットに含まれる送信元 BLE デバイス名と RSSI および取得タイムスタンプを記録している。計測結果は、ロガーアプリ起動直後のデータを無視した 1 分間のデータとなっている。石膏ボード下のレイアウト（机や椅子のある日常生活空間）の違いによる影響の有無を確認するため、図 3 に緑色で示されている扉を全て開けた状態と全て閉めた状態の 2 通りの状態で測定を実施した。

測定結果を表 2 および表 3 に示す。表 2, 表 3 ともに、1 分間で取得できた RSSI の値の平均値 (dBm) を示している。表 2 より、ほとんどの場合において、同組について対称的な RSSI の値を示していることを確認した。例えば、BLE1 から BLE6 への測定結果と BLE6 から BLE1 への測定結果は同様に観測なしとなっている。一方で、BLE1 と BLE2 の組のように、観測された RSSI が非対称である場合が一部確認された。本研究では、双方向データを用いることが結果的により安定的なデータを取得可能であるという仮定のもと、以降では、表 3 に示した両方向の全計測値を平均化したものを取り扱うものとする。なお、表 3 において、扉の開閉状態の比較を行った結果、RSSI の測定値には大きな影響が無いことがわかった。このことから、石膏ボードより下の環境の変化は、天井環境の電波伝搬に対し、数 dBm 程度の僅かな差異しか与えないものとし、表

表 2 RSSI 測定結果（単方向の測定結果の平均値、扉開状態）

| Location | Rx | | | | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Tx | - | -77.0514 | -77.865 | -69.7644 | -64.3504 | 観測なし | 観測なし | -87.3578 |
| | -68.2692 | - | -69.1911 | -66.6751 | -70.0783 | 観測なし | -93.9818 | -86.5979 |
| | -76.5045 | -71.83 | - | -67.4788 | -75.1889 | 観測なし | 観測なし | -89.2667 |
| | -76.4977 | -73.4037 | -72.5533 | - | -70.5556 | -92.1636 | -88.6833 | -89.4458 |
| | -68.013 | -76.246 | -76.3925 | -70.2064 | - | -93.36 | -92.1379 | -85.2202 |
| | 観測なし | -94.6486 | -94.8933 | -93.184 | -93.9231 | - | -67.7413 | -82.7562 |
| | -95.1967 | -93.9762 | -98.5714 | -87.9838 | -91.2407 | -72.7092 | - | -72.5222 |
| | -92.2105 | -90.2037 | -91.1399 | -87.1556 | -90.3195 | -83.6611 | -68.7118 | - |

3 の扉開状態のデータに基づき、自動同定手法の検討を進める。

4. 自動同定手法の検討

4.1 天井環境における電波伝搬特性

以下では、一般的な電波伝搬モデルで用いられるパラメータである距離に加え、送受信点間に存在する障害物といった要素が電波伝搬に与える影響度を、実測データに基づいて検証していく。これらの知見は、RSSI 測位による近接関係とレイアウト上の位置関係を紐付けるアルゴリズムにおいて、レイアウト解析により空調機間（組み込まれた BLE 間）の RSSI 予測を行うために活用する。

4.1.1 距離が RSSI に与える影響

自由空間においては RSSI は距離の 2 乗に反比例するため、送受信点間の距離は考慮すべき非常に影響の大きい要素といえる。レイアウト図における送受信点間の距離は、図 3 に示したような BLE 設置位置ならびに図面縮尺が与えられていれば容易に取得できる。距離の増加にともない RSSI が減衰するという仮定に基づけば、ある相対位置関係が推定できるが、天井環境という狭く、障害物が密に設置された環境においても、その推定が同様に機能するのかを検証する。

この検証として、相対的に距離が大きい BLE 間の測定 RSSI は低くなると考え、レイアウト上の BLE 設置位置間の距離と、測定した RSSI の順位相関を調べた。その結果、スピアマンの順位相関係数は -0.92 となり、非常に強い逆相関を確認することができた。つまり、距離は天井環境においても影響が大きい要素であり、レイアウトから得られる考慮すべきパラメータの一つであると考えられ、相対的に距離が大きい BLE 間の測定 RSSI は低くなるといった大まかな位置関係を把握することに有効であると考える。

4.1.2 天井構成物が RSSI に与える影響

天井環境においては、図 1 に示したように、梁やダクト、空調カセット機および換気扇など、電波伝播において障害物となる可能性がある物体が密に存在している。その一方で、それぞれの物体およびその材質の種別がどれほど電波伝播に影響を与えるのかを一つずつ検討することは容易ではない。これを実現するには、無響室を用意し外乱を取り除いた上で、デッキボードと石膏ボードに上下を挟まれた天井を再現した測定空間を構築する必要がある。また、その測定環境において、送受信点間の距離や、送受信点から

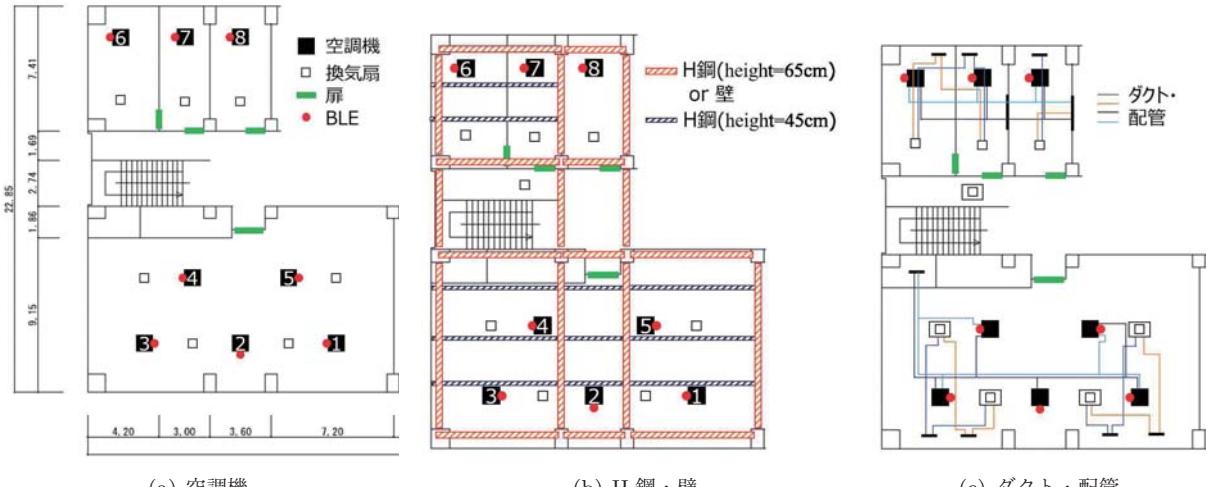


図 3 天井レイアウト



図 4 BLE およびロガーの設置環境

対象物体までの距離といったパラメータをできるだけ細かい粒度で計測する必要あり、非常にコストが高い。

そこで本研究では、レイアウト情報から BLE 間に障害物がある場合とない場合（種別が異なる場合）で比較可能な BLE 組を抽出し、実測 RSSI の比較実験を行った。例えば、図 5 に示すような、BLE1 からほとんど等距離に存在する BLE2 および BLE5 を対象として、それぞれの組の間に存在する障害物の種別の違いによる影響の比較を行った。この例では、BLE1 と BLE2 の間にはダクト、換気扇および H 鋼（大梁）が存在するのに対し、BLE1 と BLE5 の間にはダクトと H 鋼（小梁）しか存在せず、見通し環境も良い。こうした比較可能な組の抽出には、BLE 間に存在する物体検出が必要であるが、距離情報と同様に、2 次元レイアウト図の画像処理などによって取得可能な情報であると考える。比較実験の結果、H 鋼（大梁）を挟む組と挟まない組の比較の全通りについて、H 鋼（大梁）を挟んだ場合の RSSI が、挟まない場合の RSSI に比べて低いことが確認された（図 5 の例など）。つまり、H 鋼（大梁）を組間に挟んだ場合の RSSI 値は、距離情報のみで予測したものよりは減衰量が大きくなる傾向があるため、距離のみでの推論に誤りを発生させる可能性があるといえる。その一方で、一般のビルにおいて任意の 2 点間を考えた場合、

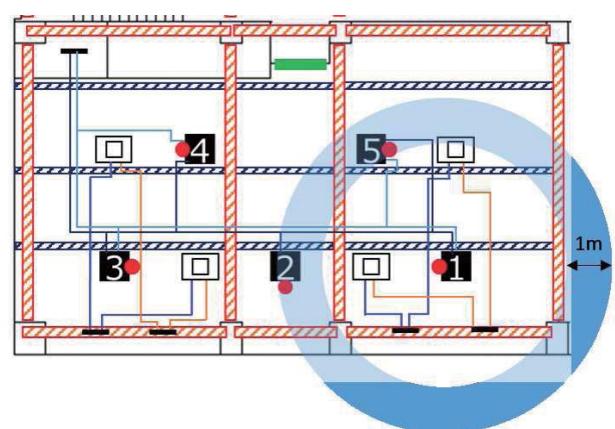


図 5 RSSI 比較実験例（等距離・障害物種別）

距離に比例して H 鋼を介在する可能性が高くなると想定できるため、今回の実験環境における廊下を挟んだ部屋間など、距離と合わせて H 鋼による減衰によって、より明確にその傾向が RSSI の実測値に現れると考えられる。

4.2 同定手法の検討

4.1 節で確認した電波伝搬特性に基づいて、同定手法の検討を行う。具体的には、レイアウト情報から得られる距離情報に基づきクラスタリングを実施することで、相対的

表 3 RSSI 測定結果（両方向の全測定結果の平均値、左：扉開状態、右：扉閉状態）

| Location | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | Location | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | -72.0269 | -77.0775 | -73.2178 | -66.1699 | 観測なし | -95.1967 | -89.8386 | 1 | -71.7722 | -77.4707 | -74.0256 | -67.6372 | -99 | -95 | -91.5686 |
| 2 | - | -70.3744 | -69.8989 | -72.8441 | -94.6486 | -93.9784 | -88.8533 | 2 | - | -69.1796 | -69.5657 | -73.4647 | -96.1667 | -92.7895 | -92.5231 |
| 3 | - | - | -69.7875 | -75.8005 | -94.8933 | -98.5714 | -90.4163 | 3 | - | - | -69.1575 | -74.0531 | -95.3151 | -94.1613 | -89.642 |
| 4 | - | - | - | -70.3936 | -92.9266 | -88.1551 | -87.8783 | 4 | - | - | - | -69.8148 | -90.2246 | -90.2984 | -89.1174 |
| 5 | - | - | - | - | -93.6783 | -91.7054 | -87.7774 | 5 | - | - | - | - | -97.3571 | -90.3286 | -89.8049 |
| 6 | - | - | - | - | - | -70.2077 | -83.2058 | 6 | - | - | - | - | - | -70.1916 | -82.2439 |
| 7 | - | - | - | - | - | - | -70.6334 | 7 | - | - | - | - | - | - | -70.6444 |

に距離が近い（同じ部屋内もしくは隣接する部屋に存在するような）BLE 組を選び出す。4.1 節において距離（および H 鋼による減衰）と測定 RSSI の間に非常に強い負の相関関係を確認することができたことを利用し、同様な手法に基づきクラスタリングを実施して得た相対的に RSSI が強い BLE 組は距離が近い BLE 組の中に含まれ、測定した RSSI によって大まかな部屋レベルの位置関係の推定が可能であると確認した。また、レイアウトの線対称性を活用することにより、クラスタ内の軸上の設置点の同定が可能であることを確認した。

4.2.1 距離・測定 RSSI に基づくクラスタリング

距離に基づくクラスタリングを実施することで、相対的に距離が近い BLE 組をレイアウト情報から取得する。クラスタリングアルゴリズムには、階層的クラスタリングの単連結法を適用した。距離に基づくクラスタリングの結果を、図 6 に示す。縦軸はクラスタ間の距離を示し、横軸に示す BLE 組のラベルを示している。BLE 組のラベルは、図 3 に示す BLE の ID を辞書順ソートした順で、0 から 27 まで割り当てている。図 6 中の赤色で示されているクラスタが、比較的距離が近いと判断された BLE 組の集合である。図 8 (a) に、これら BLE 組をグラフで表現している。結果として、大部屋内に 5 つ設置された全 BLE 組および廊下を挟んで向かい側の 3 部屋に設置された BLE の全組み合わせが抽出された。

4.1 節において距離（および H 鋼による減衰）と測定 RSSI の間に非常に強い負の相関関係を確認することができたことを利用し、同様の手法を用いて、RSSI によるクラスタリングを実施した。RSSI に基づくクラスタリングの結果を図 7 に示す。図中の緑色で示されているクラスタが、相対的に RSSI が強いと判断された BLE 組の集合である。図 8 (b) に、これら BLE 組をグラフで表現している。それぞれのクラスタリング結果より、BLE6 と BLE8 の組を除き、他の全ての BLE 組が検出されることを確認した。レイアウトからは距離の情報のみを利用しているため、実際には送受信点間に存在する障害物によって RSSI の値は小さくなると考えられ、実測ベースのクラスタリングの結果において BLE6 と BLE8 の組が除外されていると解釈できる。つまり、このようにいくつかのリンクが除かれる可能性があるものの、実測した RSSI に基づいて作成したグラフはレイアウトから導出したグラフの部分グラフとなる。したがって、得られた 2 つのグラフの部分同型判定アルゴ

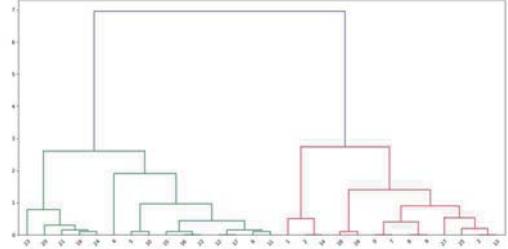


図 6 BLE 間距離に基づくクラスタリング結果

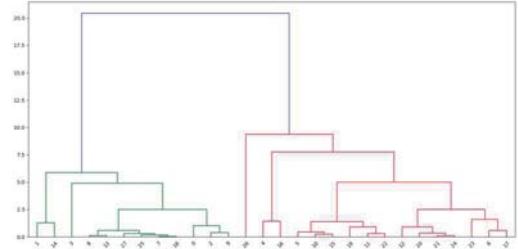


図 7 測定 RSSI に基づくクラスタリング結果

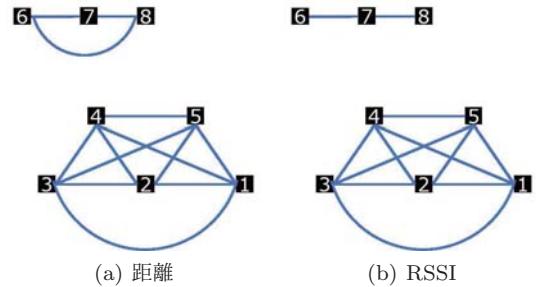


図 8 クラスタリング結果に基づいて構築したグラフ

リズム [22] を適用することで、同じ部屋もしくは隣接する部屋レベルで形成されるクラスタとして BLE の同定が可能である。

4.2.2 BLE 設置位置の線対称性

クラスタ内の BLE の同定を、RSSI の差異のみに基づき実施することは難しい。これは、クラスタ内の BLE 組の距離には差がないため、レイアウト情報から明確に RSSI に差異が観測されると想定され比較可能な BLE 組が少ないと想定される。こうした問題に対し、本研究で対象としている研究室環境において、図 8 (a) で確認したクラスタ毎のレイアウト上のトポロジーが線対称となっていることに着目した（図 9）。建造物の中にはトポロジーに対称性を持

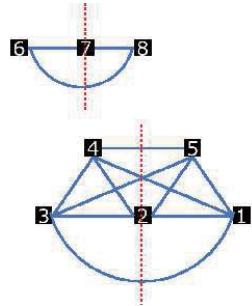


図 9 クラスタ内の中対称なトポロジー

たない設置位置も考えられるものの、この性質は天井環境の汎用パターンを検討する上で考慮すべき特性の一つであると考えられる。距離に基づく測定 RSSI の関係と、この特性を活用した同定手法の検討を行った。

線対称の軸となる直線上にある設置点を端点とした全 BLE 組の RSSI 測定値群とその他の設置点を端点とした全 BLE 組の RSSI 測定値群では、測定値の分散が相対的に大きくなると予測される。これは、軸上の設置点からの各 BLE 組の距離の分散が相対的に小さくなることを利用している。例えば、図 9 の BLE6 から 8 のクラスタについて、軸上の BLE7 から他の BLE への距離は、軸を跨ぐような BLE6 と BLE8 間の距離と比較し小さい。この結果、相対的に分散の小さい距離集合を持つ BLE7 からの RSSI と比較すると、その他 BLE6 や 8 で観測される RSSI の値の分散が大きくなる。

BLE1 から 5 のクラスタ、BLE6 から 8 のクラスタのそれぞれについて、各 BLE において測定された RSSI の集合に対し分散を評価するために標準偏差を求めた結果、両クラスタで軸上の BLE2, BLE7 の標準偏差が最も小さくなることを確認した。

4.2.3 BLE 配置候補の抽出

4.1.2 項で確認したように、レイアウト上の距離が同じ場合でも、H 鋼を介在するか否かで電波伝搬に大きな差異がある。このように、等距離であるものの、一方は H 鋼を含み、一方は含まない組であれば、前者の RSSI は後者の RSSI よりも小さいはずである。こういった比較可能な BLE 組をレイアウト情報から抽出し、その関係性を満たすような BLE 配置候補を考えればよい。本研究ではこれまでの考察から、障害物として H 鋼（大梁）の介在のみを考慮するものとし、距離が等しいが介在する障害物が異なる場合と同じ障害物を介在するが距離が大きく異なる場合を比較可能な BLE 組とする。

比較可能な組の例を図 10 に示す。図中の上の例は、図 5 で確認したものであり、距離が等しい BLE 組について H 鋼を介在する場合としない場合の RSSI を比較することで候補の抽出を行っている。その結果として、BLE1 と BLE5, BLE3 と BLE4 を対とした組み合わせ総数である 8 通り配置候補が選ばれた。また、H 鋼を 2 つ介在した BLE 組に

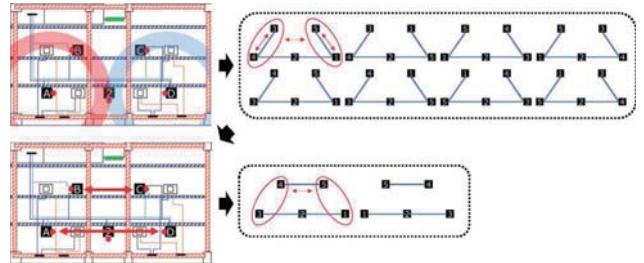


図 10 BLE 配置候補の削減

おいて距離が異なる場合の RSSI を比較することにより、候補抽出を行った結果、2通りの配置候補が選び出された。これらの結果から、対象とする研究室環境においては、スマートフォンを用いたテスターなどの協力により、1つの BLE の位置を同定することができれば、他の BLE の配置は自動的に同定できることができた。このように、得られた RSSI 情報だけからは一意に決定できなくても、十分に候補を絞り込むことで、テスターの手間は大幅に削減される。

5. まとめ

空調機器をネットワーク経由で一元管理する技術が期待されている一方で、制御対象となる機器のレイアウト上の設置位置情報は必須であり、ネットワーク上のアドレスの対応付けがなされる必要がある。本研究では、空調機に BLE を組み込み、BLE モジュール間でアドバタイズパケットを交換し、それらの電波強度をもとに空調機器間のおおよその近接関係を把握する。それを、フロアレイアウトを自動解析することで得た空調機の配置位置とマッチングすることで、空調位置の自動同定を行うことを目標とする。この目標へ向け、天井環境における電波伝搬に着目し、研究室環境を対象とした天井環境の構造の調査を実施することにより、電波的に影響が大きいと想定される要因の抽出を行った。その結果として、一般的な電波伝搬モデルで考慮される送受信点間の距離および H 鋼（大梁）の存在が電波伝搬に与える影響が大きいことを確認した。確認した特性に基づいて同定手法の検討を行った結果、一般的な電波伝搬モデルで考慮される送受信点間の距離に加え、特に H 鋼（大梁）が与える影響が大きいことが確認された。その特性に基づき同定手法の検討を行った結果、レイアウト情報から得た距離に基づくクラスタリングとグラフマッチングにより、正解を含む 2 通りの推定位置パターンに絞り込むことができ、一つの BLE の位置が特定されれば残りの BLE の位置が正しく特定可能であることを示した。

今後の課題として、ビル設計時の図面情報から空間の広さや構成要素の大きさおよび素材情報などを抽出し、仮想空間上に再現することで、三次元電波伝搬シミュレーションを可能とする。具体的には、BIM などの建造物の 3 次元モデルを扱うことが可能なソフトウェアである Autodesk [23]

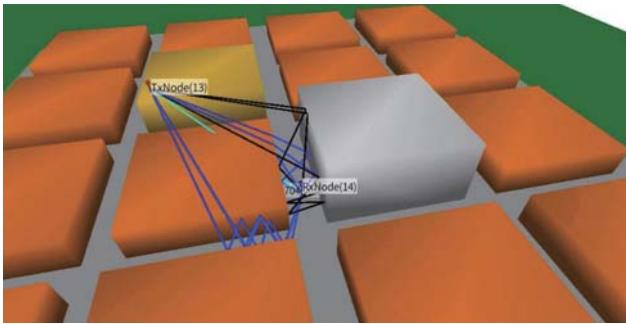


図 11 Scenargie レイトレーシング

と図 11 に示すようなレイトレーシングが可能な電波伝搬シミュレータ Scenargie [18] の連携による、天井環境シナリオの構築を行う。建造物の設計段階で三次元モデルが作られていることも多く、二次元の図面情報を三次元へ変換するツールも登場してきているため、既設の建造物に対してはこうした手法の活用によりシナリオ構築へ役立てる。多様な天井環境を網羅的にシナリオに落とし込むことは難しいため、シナリオ構築をしていく中で汎用パターンの構築を目指す。これにより、実測のコストを削減しつつ、汎用的な活用が期待できる電波伝搬モデルの構築を目指す。得られたシミュレーション結果から、電波的に影響の大きい天井構成要素を選定し、パラメータ化することで、フロアレイアウトの自動解析への応用を行い、より精度の高い自動同定手法を実現する。

参考文献

- [1] Chiguchi, M., Yamaguchi, H., Higashino, T. and Shioda, Y.: Human thermal comfort estimation in indoor space by crowd sensing, *2016 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, pp. 45–50 (online), DOI: 10.1109/SmartGridComm.2016.7778736 (2016).
- [2] Chintalapudi, K., Padmanabha Iyer, A. and Padmanabhan, V. N.: Indoor Localization Without the Pain, *Proceedings of the Sixteenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '10)*, pp. 173–184 (2010).
- [3] Zhuang, Y., Syed, Z., Georgy, J. and El-Sheimy, N.: Autonomous Smartphone-based WiFi Positioning System by Using Access Points Localization and Crowdsourcing, *Pervasive and Mobile Computing*, Vol. 18, pp. 118–136 (2015).
- [4] Denkovski, D., Angelichinoski, M., Atanasovski, V. and Gavrilovska, L.: RSS-Based Self-Localization Framework for Future Wireless Networks, *Wireless Personal Communications*, Vol. 78, No. 3, pp. 1755–1776 (2014).
- [5] Murata, M., Ahmetovic, D., Sato, D., Takagi, H., Kitani, K. and Asakawa, C.: Smartphone-based Indoor Localization for Blind Navigation across Building Complexes, *Proc. of 2018 IEEE Int. Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom '18)* (2018).
- [6] Bahl, P. and Padmanabhan, V. N.: RADAR: An In-building RF-based User Location and Tracking System, *Proceedings of the Nineteenth Annual Joint International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2000)*, pp. 775–784 vol.2 (2000).
- [7] Faragher, R. and Harle, R.: Location Fingerprinting With Bluetooth Low Energy Beacons, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 33, No. 11, pp. 2418–2428 (2015).
- [8] Murata, M., Ahmetovic, D., Sato, D., Takagi, H., Kitani, K. and Asakawa, C.: Smartphone-based Indoor Localization for Blind Navigation across Building Complexes, *Proc. of 2018 IEEE Int. Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2018)* (2018).
- [9] Maekawa, Y., Uchiyama, A., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Car-level Congestion and Position Estimation for Railway Trips Using Mobile Phones, *Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, UbiComp '14*, New York, NY, USA, ACM, pp. 939–950 (2014).
- [10] Noh, Y., Yamaguchi, H., Lee, U., Vij, P., Joy, J. and Gerla, M.: CLIPS: Infrastructure-free Collaborative Indoor Positioning Scheme for Time-critical Team Operations, *Proc. of 2013 IEEE Int. Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom '13)*, pp. 172–178 (2013).
- [11] Noh, Y., Yamaguchi, H. and Lee, U.: Infrastructure-Free Collaborative Indoor Positioning Scheme for Time-Critical Team Operations, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Vol. 48, No. 3, pp. 418–432 (online), DOI: 10.1109/TSMC.2016.2615652 (2018).
- [12] Higuchi, T., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Context-supported Local Crowd Mapping via Collaborative Sensing with Mobile Phones, *Pervasive Mob. Comput.*, Vol. 13, pp. 26–51 (2014).
- [13] Faragher, R. and Harle, R.: Location Fingerprinting With Bluetooth Low Energy Beacons, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 33, No. 11, pp. 2418–2428 (2015).
- [14] Akl, R., Tummala, D. and Li, X.: Indoor Propagation Modeling at 2.4 GHz for IEEE 802.11 Networks (2006).
- [15] Anderson, C. R. and Rappaport, T. S.: In-building Wideband Partition Loss Measurements at 2.5 and 60 GHz, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 3, No. 3, pp. 922–928 (2004).
- [16] 遠藤哲夫, 吉野涼二, 寺田矩芳, 東山潤司 : 屋内電波環境推定のための一般建築材料の透過反射特性に関する実験的検討, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 70, No. 587, pp. 71–78 (2005).
- [17] Ji, Y., Biaz, S., Pandey, S. and Agrawal, P.: ARIADNE: A Dynamic Indoor Signal Map Construction and Localization System, Vol. 2006, pp. 151–164 (2006).
- [18] Space-Time Engineering, LLC: Scenargie, <http://www.spacetime-eng.com/>.
- [19] 米澤祐紀, 坂本岳文, 土井裕介 : BluMatch: アンカーノードを用いない無線設備機器の自己配置推定, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2016 論文集, Vol. 2016, pp. 123–128 (2016).
- [20] Dosch, P., Tombre, K., Ah-Soon, C. and Masini, G.: A Complete System for the Analysis of Architectural Drawings, Vol. 3, pp. 102–116 (2000).
- [21] Lymberopoulos, D., Liu, J., Yang, X., Choudhury, R. R., Handziski, V. and Sen, S.: A Realistic Evaluation and Comparison of Indoor Location Technologies: Experiences and Lessons Learned, *Proceedings of the 14th International Conference on Information Processing in Sensor Networks, IPSN '15*, New York, NY, USA, ACM, pp. 178–189 (online), DOI: 10.1145/2737095.2737726 (2015).

- [22] Zemlyachenko, V. N., Korneenko, N. M. and Tyshkevich, R. I.: Graph isomorphism problem, *Journal of Soviet Mathematics*, Vol. 29, No. 4, pp. 1426–1481 (1985).
- [23] Autodesk, Inc.: Autodesk, <https://www.autodesk.co.jp/>.