

博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏名 平田 明史
学位 博士 (工学)
学位記番号 新大博 (工) 第 53 号
学位授与の日付 令和 2 年 9 月 23 日
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 2 項該当
博士論文名 直接波を特定する高分解能電波到来方向推定による屋内位置検出に関する研究

論文審査委員
主査 教授・山田 寛喜
副査 教授・佐々木 重信
副査 教授・山崎 達也
副査 教授・中野 敬介
副査 准教授・西森 健太郎
副査 教授・大平 孝

博士論文の要旨

近年、屋外のみならず屋内においても、高精度に位置が検出できる仕組みの研究開発が注目されている。人の動向や荷物の位置を追跡してサービスを提供したいという事業者ニーズや IoT (Internet of Things) による位置情報収集への関心は高く、種々の屋内位置推定方法が提案されている。中でも、2019 年 1 月にリリースされた Bluetooth v5.1 では、電波出射方向や電波到来方向を推定できる仕様が盛り込まれ、屋内位置推定精度を向上させる取り組みが活性化している。

電波到来方向推定を利用した位置検出は多数報告されているが、屋内多重反射波が存在する環境での精度の良い位置検出は確立されておらず、様々なアプローチが検討されている段階である。屋内マルチパス環境では、壁面からの反射波の影響で直接波の到来方向を誤認識することが知られており、この反射波に対する対策を講じることが屋内位置推定の精度を向上させるための課題となっている。

屋内位置推定の実現には、対象となる端末までの距離や電波強度のみならず、電波到来方向方向を活用することが精度向上のための一つの鍵といえる。到来方向推定には複数の受信ポートを備えたアレーアンテナを用いることが一般的であるが、アレーアンテナの利用は装置の大型化のみならず、コストの増加をもたらす。したがって実用化されたものはほとんど存在しておらず、低コストなアンテナシステムでの実現が大きな課題であった。

このような事柄を背景として、本論文では、まずリアクタンストメイン信号処理という概念に基づく可変指向性アンテナであるエスパアンテナに着目した。エスパアンテナは単一給電素子からなるアンテナであり、アレーアンテナに比べ低コストで実現可能なアンテナシステムである。このアンテナでは、アレーアンテナのように複数素子の受信データを用いず、指向性の切り替えにより得られるデータで到来方向推定を行う点に特徴がある。本論文では、このエスパアンテナを用いた到来方向推定アルゴリズムを考案し、さらに屋内における端末の位置推定への応用を検討し、以下のような成果を得た。

(1) 単一給電アンテナの周囲にリアクタンスを装荷した無給電アンテナを配置したエスパアンテナにおいて、指向性切り替えにより得られるデータを用いた到来方向推定を可能とするリアクタンスドメイン信号処理を構築した。これは単一給電アンテナであるエスパアンテナのデータを、複数給電されたアレーアンテナに相当するデータに変換する信号処理手法である。その手法を用いることにより、通常、単一給電アンテナでは不可能である到来方向推定が実現可能となることを明らかにした。さらに正確な到来方向推定を実現するためのキャリブレーション手法を構築し、MUSIC アルゴリズムを用いた到来方向推定実験により、その有効性を示した。

(2) 屋内位置検出では多数のマルチパス波が存在する。それらのマルチパス波の信号相関が非常に高いため、MUSIC 法の適用が困難となる場合がある。この問題点を解決するため、エスパアンテナの素子配置を利用した空間平均法に基づく信号相関抑圧手法を考案した。具体的には、7 素子円形エスパアンテナにおけるアルゴリズムを示し、その有効性を実験により示した。

(3) 多数のマルチパス波が存在する屋内での端末位置推定のため、素子数を拡張した 25 素子エスパアンテナを提案し、Bluetooth v5.1 での到来方向推定の仕様に合わせた位置推定手法を考案し、シミュレーションにより、その有効性を明らかにした。この推定手法では、多数の到来波から直接波を特定するアルゴリズムを組み込み、マルチパス波による誤推定を回避している。さらに有効な Bluetooth 受信局の配置方法に関して検討し、屋内壁面から離して配置することにより 90%以上の確率で検出誤差 1m 未満の位置推定精度が実現されることを示した。

審査結果の要旨

本論文において示されたエスパアンテナによる到来方向推定手法を利用した屋内羽扇端末の位置推定に関する研究は、リアクタンスドメイン信号処理という給電系が一つのみのアンテナにおいて、周辺素子との結合量の変化により指向性を切り替えるというユニークな構造を有するアンテナを用いた研究である。このようなアンテナを用いたマルチパス波の高分解能到来方向推定アルゴリズムの検討は、ほかには見られず新規性、独創性の高いものである。さらに多数の給電系を必要とするアレーアンテナではなく、単一給電系のアンテナシステムでの高分解能到来方向の実現は、実用的な観点からも高い有効性が認められる。さらに、このエスパアンテナを Bluetooth v5.1 での到来方向推定に用い、屋内無線端末位置推定への応用を提案している。エスパアンテナの新たな応用を開拓した点の独創性に加え、直接波を特定するアルゴリズムを組み合わせ、位置推定精度を向上している点にも新規性が見られる。これらの成果は、新たな屋内無線端末の位置推定の実現に寄与するばかりでなく、リアクタンスドメイン信号処理による高分解能到来方向推定手法の確立は、今後の様々な周波数帯域におけるセンシング応用に対しても有効であり、得られた成果の将来の発展性も極めて高い。これらの成果は4編の参考論文として、論文誌に掲載されており、参考論文数も専攻の基準を満たしている。

以上のように、本研究には、独創性、新規性、有効性が認められ、内容として博士論文に値するものである。よって、本論文は博士（工学）の博士論文として十分であると認定した。