

論文の内容の要旨

論文題目 電磁界共振結合を用いたセンシングとその応用に関する研究

氏名 中村 壮亮

本論文では、電磁界共振結合を用いたセンシングとその応用に関して論ずる。電磁界共振結合は、古くから帯域通過フィルタへ応用されており、近年ではワイヤレス電力伝送での有用性が示されたことで再び脚光を浴びている物理現象である。その原理は、同一の共振周波数を持つ物体同士で電磁エネルギーの受け渡しが行われるというものである。同一の共振周波数を有する音叉における振動エネルギーの受け渡しとの類推で理解できる。このように、双共振という特異な状況においては受け渡される電磁エネルギーは増幅されるため、マイクロストリップライン同士で利用した場合に帯域通過フィルタとして使用できたり、アンテナ同士で利用した場合にワイヤレス電力伝送として使用できる。しかし、電磁界共振結合のセンシングへの応用に関する研究は行われてこなかった。厳密には位置センサに応用した研究事例がわずかに存在するが、それらも電磁エネルギーの増幅という双共振特有の現象に着目したのではなく、誘起電圧を測定するといった既存の電磁誘導の延長上の技術であった。

そこで、本論文では電磁エネルギーに着目した電磁界共振結合のセンシング手法について研究を行う。未だ厳密な議論は行われていない未踏の領域であるため、電磁界共振結合の物理現象としての定義に基づくセンシング手法の体系化から着手した。まず、電磁界共振結合を電磁結合および双共振の複合現象と定義した。ここでは、電磁界共振結合を引き起こす二つの物体をそれぞれ送信機および受信機と呼び、送信機には絶えず外部電源から電磁エネルギーが流入するものとした。次に、センシング手法の体系化を行った。ここでは、電磁結合および双共振の大きさは送受信機間で受け渡される電磁エネルギーと関係を有するため、電磁エネルギーを測定することでこれらの計測が可能であると考えた。電磁界共振結合では放射エネルギーを抑えた構成をとるため、電磁エネルギーは系内で保存される。従って、原理的には一か所における電磁エネルギー(電力)を測定すれば系全体のエネルギーフローが分かる。そこで、送信機における進行電力と反射電力の比に相当する反射係数を測定することで電磁結合および双共振の大きさを計測する、結合度センシングおよび双共振度センシングの二種類のセンシング手法を提案した。送信機において測定を行う理由は、受信機に対する機器装着が不要となり、応用上の利点が大きいためである。本論文では、電池交換が不要の位置センサや機器装着を必要としない人体検出などへの応用例を示している。

結合度センシングに関しては、その応用として磁界共振結合を用いた位置センサを提案した。位置センサの送受信機は磁界共振結合の発生に向いているヘリカルアンテナと補償キャパシタを組み合わせたものを用いた。補償キャパシタを利用して、送受信機の双方におけるアンテナの共振周波数が一致するように調整を行うことで、

磁界共振結合を発生した。まず、位置推定法について提案した。ここでは、結合度センシングによって得られたアンテナ間の結合係数と実空間上のアンテナ間の相対位置を結び付けるため、ノイマンの公式を利用する手法を提案した。ノイマンの公式を利用することで全て計算機上で位置の導出が可能であるため、手動でキャリブレーションを行う方法などに比べて利便性が高いと考えられる。次に、設計上の制約条件に関する考察を行った。本手法で利用するノイマンの公式は、電流値が回路内の位置によらず一定となるモデルを仮定しているため、アンテナの電気長が長い場合には破綻すると考えられる。検証のため、電気長をパラメータとして電磁界解析とノイマンの公式の比較を行った。その結果、アンテナの電気長を抑えた設計とすることが制約条件として示された。最後に、双共振度(Q値)とセンシング領域の関係について考察した。磁界共振結合では双共振により電磁エネルギーが増幅されるため結合度のセンシング範囲が拡張でき、さらに結合度とアンテナ間の距離は関係するため、位置センサとして利用可能な領域が拡張されると考えられる。そこで、Q値とセンシング領域の関係について理論的考察を行った結果、高いQ値ではより遠方まで推定誤差を抑えることができるが、近傍領域における推定誤差が増加するというトレードオフの存在が明らかとなった。一般に、推定不能となる近傍領域の許容範囲は利用目的で決定される仕様である。従って、その仕様を満たす条件下で出来るだけアンテナのQ値を高めることが最適の設計であると結論付けた。以上により、磁界共振結合を用いた位置センサに関して、設計上の制約条件やQ値とセンシング領域の関係を明らかにした。これらの知見は、位置センサの実装において基本的な設計指針を与えるものであり、その学術的意義は大きいといえる。

さらに、位置センサの応用として二つのシステムを提案した。一つ目は、位置推定に基づく高効率ワイヤレス電力伝送システムである。このシステムでは、提案した位置推定に基づいてアンテナ間の相対位置を最適化することで高効率ワイヤレス電力伝送が実現される。位置推定と電力伝送はほぼ同一のハードウェア構成で実現できるため、システムはコンパクトなものとなる。二つ目は、中継アンテナによるマルチホップ位置センサシステムである。中継アンテナを用いることで電磁界の伝搬距離を延長することが可能であるため、送信アンテナの低減すなわち配線の簡略化が期待できる。さらには、高効率ワイヤレス電力伝送システムと複合することで、究極的には中継アンテナによる高効率ワイヤレス電力伝送システムなども原理的には実現可能であると考えられる。また、双共振度センシングの応用例として選択的人体検出システムについても研究を進めてきた。ここでは、人体を選択的に検出するための属性情報として人体の共振周波数を利用した。しかし、本稿では主に結合度センシングとその応用例に関して扱ったため、付録とするに止めた。将来的な構想として、社会への実装も検討している。近年、人間の生活空間において人間と共生し様々なサービスを提供するサービスロボットが高齢化社会を支える次世代技術として期待されている。これらのロボットは自律移動により所定の目的を達成することが望まれる。自律移動は、自己位置推定に基づき環境地図やセンサ情報を頼りに行われる。また、所定の目的を達成するため様々なマニピュレータが用いられる。そして、センサ・マニピュレータ・駆動系などの電力は搭載された二次電池から供給されるものが主流である。以上が、サービスロボットに要求される機能群であるが、このうち位置推定や電力供給は本論文で培った技術で代替可能と考えられる。具体的には、位置推定および電力伝送を同時実現するシステムを床下に実装することで、サービスロボットへの位置情報の提供やワイヤレスでの給電が実現できる。これにより、サービスロボットは電池容量の低減による小型化・軽量化や自己位置

推定における複雑な処理の省略が可能となる．このように，空間側に分散配置したセンサ・アクチュエータ群により知能・機能を実現する技術は空間知能化と呼ばれている．