

京都大学	博士 (工学)	氏名	高林 伸幸
論文題目	Power Beaming and Receiving Systems for Microwave Power Transmission to Fly Drone (ドローン飛行のためのマイクロ波電力伝送のパワービーミング及び受電システムに関する研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、ドローンへのマイクロ波電力伝送用パワービーミング/受電システムに関する技術・開発についてまとめたものである。具体的には、電力受電面に均一に電力を照射する高効率のフラットトップビーム (FB) を放射する送電アンテナの開発・評価と、マイクロドローンに搭載する軽量かつ高出力のレクテナアレイの開発・評価についてまとめてあり、全 7 章から構成される。</p> <p>第 1 章は序論であり、本論文の研究背景として、飛翔体へのマイクロ波送電 (MPT) に関する過去 60 年にわたる研究例がまとめられ、更に MPT の対象が実験的な模型飛行機から実用的なドローンへ移り変わっていることが述べられている。2022 年には総務省の省令改正により屋内で MPT システムの実用化が見込まれている。MPT の実用化及び利用促進のためには魅力的な応用例の提案が欠かせず、本論文ではその一例としてマイクロドローンを使用した屋内監視システム内における MPT 利用を提案している。さらに提案システム実現のため、ドローン送電に適したパワービーミングシステム、受電システムの開発の必要性を論じている。</p> <p>第 2 章は受電面内で均一な電力密度分布を持つ FB が従来のビームと比較して受電デバイス (レクテナアレイ) の性能指標である変換効率 (PCE) ・出力電力の向上にいかにか寄与するかについてまとめている。まず周波数 2.45 GHz、32 素子の送電アンテナで設計・開発した FB を、37 素子アンテナにより受電した際のパターンが、電磁界シミュレーション及び実測にて確かめられた。そして FB が従来のユニフォームビームと比較し、総受電電力およびビームの均一度を表す変動係数 (CV) が向上することを確認した。しかし、フラットトップビームの均一度において、シミュレーション値と比較し実測値が低いことも示した。更に理想的な FB を整流回路アレイに入力することで変換効率を従来のビームと比較し向上させることが可能であると論じている。</p> <p>第 3 章は C 帯での FB 送電アレイの設計とシミュレーション・実測評価の結果についてまとめている。ブロック型シーケンシャルアレイ (BSA) の導入と分配比を考慮したマイクロ波分配器の設計により、軸比特性を改善した 196 素子の大規模 FB アレイを製作した。送電アンテナから 0.8m 離れた受電面で、ビーム効率が 37%、電力密度分布の変動係数 (CV) が 0.20、受電面内での軸比が 3dB 以下である FB が形成されていることを実測により確認した。また電力配分が低くなるアレイエレメントの削除と FB 性能の関係を解析により評価し、全素子中 65% の素子がアレイアンテナ内に残っていれば、FB の均一性 (CV) が維持されることを確認した。BSA のブロック数と FB 性能及び受電面軸比の関係を電磁界シミュレーションにより評価し、ブロック数が向上するにつれてビーム効率が低下する一方で電力密度分布の均一性が向上し、軸比も向上することを確認した。FB のビーム効率の理論と実測の差についても論じ、シーケンシャルアレイ化、シミュレーション・実測でのアンテナ利得差、分配回路の製作誤差が実測でのビーム効率の低下に影響していることを示した。放射ビーム形状・アンテナ素子数と伝送可能距離の関係について考察し、本論文で開発した送電アンテナのアレイサイズ (70cm 角、14x14 素子) が屋内監視用のマイクロドローンへの送電に適した規模であることを示した。</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	高林 伸幸
<p>第4章はマイクロドローンに搭載するC帯20W級軽量レクテナアレイの設計とシミュレーション・実測評価の結果についてまとめられている。アンテナ層にアラミドハニカム基板、整流回路素子にGaAsのショットキーバリアダイオードを採用しアレイ化することで、軽量かつ高出力16素子レクテナアレイの製作を行った。そして、第3章で開発したアレイを用いたフラットトップビームの照射下で20W級軽量レクテナの直流変換性能を実測により評価した。注入同期型のマグネトロンを導入した送電系により134WのRF電力が送電アンテナポートに励振され、受電レクテナ側で最大27W/19VのDC出力が確認された。シミュレーションと実測の両面でFBの性能指標の1つである受電電力の変動係数(CV)とPCEの関係が明らかにされた。アレイ化した際のPCEの低下を軽減するためには受電レクテナに照射するフラットトップビームのCVは少なくとも0.2以下でなければならないことを示した。</p> <p>第5章は第3章のFB用大規模送電アンテナアレイと第4章の20W級軽量レクテナアレイを用いたマイクロドローン(X400W)への送電及び飛行実験についてまとめている。送電アンテナアレイから送電されたFBが80cm先の受電レクテナアレイに到達しDCDCコンバータを介してX400Wに供給された。マイクロ波による給電のみで7分間の連続飛行が確認された。</p> <p>第6章は画像認識を用いた人体検知機能付きのアクティブフェイズドアレイの開発についてまとめている。PythonのOpenCVライブラリーを用いることで人体の肌色の検知を行った。受電アンテナに添付されたARマーカ―を認識することにより受電アンテナの位置を特定した。得られた情報をもとに同期されたシンセサイザーIC(MAX2871)をRaspberry Pi 4で制御し、受電アンテナでの受電電力を最大化するビーム制御が行われた。画像認識を用いたアクティブフェイズドアレイの性能が実測され、受電アンテナでの受信電力が3dB以上向上したことを確認した。</p> <p>第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約されている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文はマイクロドローンへのマイクロ波電力伝送(MPT)用パワービーミング/受電システムに関する技術・開発に関してまとめたものである。本論文で得られた主な成果は以下の通りである。

1. 通信分野で主に利用され、MPT 技術における有効性も示唆されてきたフラットトップビーム(FB)が、受電デバイスであるレクテナアレイの直流変換効率および出力 DC 電力の向上に大きく寄与することを、解析、シミュレーション、実測の3手法により示した。
2. MPT に適した FB を放射するアレイアンテナは、ビーム効率を向上させるためアレイ素子数を増やして指向性を高めなければならない。また軸比改善の観点からシーケンシャルアレイ化が必須である。シーケンシャルアレイを考慮した大規模アレイの分配回路設計は非常に煩雑となり、新たに簡略かつ有効な FB のアレイウェイトの給電手法が必要であった。本論文ではブロック型シーケンシャルアレイと分岐点での電力分配比を最小化するマイクロストリップラインでの給電手法を導入し、受電電力の変動係数(CV)が 0.2 程度で受電面内の軸比が 3dB 以下のフラットトップビームを 0.8m の伝送距離で形成することに成功した。
3. マイクロドローンに搭載するレクテナアレイの要件として出力電力 20W 以上、電力質量比 334mW/g 以上を満たすレクテナアレイは先行研究では見られない。本論文では、レクテナアレイのアンテナ層はアラミドハニカム基板、整流回路は 0.127mm の誘電体基板と GaAs ショットキーバリアダイオードで形成されている。開発したレクテナアレイの実測出力電力、電力質量比はそれぞれ 27W、720mW/g を示し、マイクロドローンへの搭載要件を満たすレクテナアレイの開発に成功した。
4. 受電面内で均一電力密度分布、低軸比分布を持つ FB と最大 27W 出力可能な軽量レクテナアレイを用いてマイクロドローンに 80cm 先から無線給電を行った。バッテリーレスのマイクロドローンがマイクロ波による無線電力のみで 7 分間連続飛行できることを実証した。
5. 画像認識機能を持つアクティブフェイズドアレイの開発を行った。画像認識は送電エリア内への人体の侵入検知、受電アンテナ位置の座標検知の2つの役割を担う。画像認識により取得された座標を基に2素子の同期したシンセサイザIC の出力位相をコントロールしアンテナでの受電電力を 3dB 以上向上させることに成功した。

以上要するに、本論文での成果はマイクロドローンを用いた屋内監視システムで利用されるマイクロ波無線電力伝送システムの実現に大きく貢献するものであり、無線電力によるドローンのオペレーション時間の延伸とシステム内のドローンの必要機体数削減が期待される。本論文で得られた成果は学術上、實際上寄与するところが少なくない。令和4年5月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公開可能日： [令和4年10月25日以降](#)