小型飛行体へのマイクロ波無線給電システム^{*1}

Microwave Wireless Power Supply System to a Micro Aerial Vehicle

小 田 章 徳^{*2}・澤 原 弘 憲^{*2}・石 場 舞^{*2}・嶋 根 愛 理^{*2}・小 松 周 平^{*2}
Akinori ODA, Hironori SAWAHARA, Mai ISHIBA, Eri SHIMANE, Shuhei KOMATSU,
勝 永 健 太^{*2}・小 澤 亮 二^{*3}・Hanno ERTEL^{*2}・小 紫 公 也^{*2}・荒 川 義 博^{*3}
Kenta KATSUNAGA, Ryoji OZAWA, Hanno ERTEL, Kimiya KOMURASAKI and Yoshihiro ARAKAWA

Key Words : Wireless Power Transmission, Microwave, Active Phased Array, Micro Aerial Vehicle

Abstract : A microwave power beaming system was developed to realize wireless power supply to a Micro Aerial Vehicle. This system consists of transmitting, tracking, and receiving systems. In the transmitting system, a 5.8 GHz microwave beam was irradiated from an active phased array antenna. Transmitting power was 4 W and the beam divergence angle was 9 deg. In the tracking system, a 2.45 GHz pilot signal was detected by a two-dimensional tracking antenna and the position was deduced through the software retro-directive function. The maximum tracking error was 1.97 deg in the azimuth direction and 1.79 deg in the radial direction. In the receiving system, a light-weight flexible patch rectenna was developed using felt pad as substrate. The maximum rectenna efficiency of 45.3% was obtained with a 100 Ω load at 63 mW input power. By integrating these systems, auto-tracking wireless power supply was demonstrated to a MAV model circling at the altitude of 1,500 mm. As a result, a motor was kept rotated. Received power was 24.3 mW at maximum and 17.6 mW on average and the total transmission efficiency was estimated at 0.60%.

記 号 の 説 明

D : 送電アンテナアレー径
 d_1 : 送電アンテナ間隔
 d_2 : 追尾アンテナ間隔
 E : 電界
 h : 送電アンテナ開口面からの高さ
 r : 旋回半径
 t : 時間
 V_{out} : 出力信号電圧
 α : パイロット信号入射角
 α_{azi} : アジマス方向誤差
 α_{rad} : ラジアル方向誤差
 θ : 旋回角
 θ_{div} : 送電ビーム発散角
 θ_{ste} : 送電ビームステアリング角
 η : 主ローブに含まれる電力割合
 λ : 波長

1. は じ め に

災害地の偵察・監視や、体内の検診などを目的としたマイクロロボットは、近年の mW レベルの電力で動作する IC、センサ、モータ、LED 等の出現により、より高機能な

設計が可能となってきた。これらはバッテリー駆動を想定しているが、駆動時間とバッテリー質量はトレードオフの関係にあり長期間の作動は見込めない。一方、有線で電力を供給しようとする、線の重みで動けなくなるサイズであったり、線を引きずっては進めない場所に展開されるものであったりする。従って、これらの電力を無線で供給することができればマイクロロボットの用途が広がる。

マイクロ波ビームを用いた無線給電技術は、宇宙太陽発電衛星から地球への送電^{1,2)} や、モバイル PC や携帯電話、電気自動車への給電³⁾ など、様々な用途に応用^{4,5)} が試みられており、本研究ではこの技術を三次元空間を移動するマイクロ飛行体への無線給電システム⁶⁾ へ適用することを試みる。

2. マイクロ波ビームを用いた無線給電システム

2.1 システムの概要 本研究で開発するマイクロ波ビームを用いた移動体への無線給電システムの概略を第1図に、地上システムの写真を第2図に示す。本システムでは特に移動体を捕捉、追尾し、そこへビームを正確に指向させる技術が重要となる。

送電システムの上空を旋回するマイクロ飛行体 (Micro Aerial Vehicle) が発するパイロット信号を、地上の複数の追尾アンテナが受信し、その信号の位相のずれから到来方向を特定するレトロディレクティブ方式を用いている。得られた位置情報はアクティブフェーズドアレイを用いた送電システムに送られ、マイクロ波のデジタル位相制御によってビーム形成および指向を行う。移動体側では薄型軽量レ

^{*1} © 2011 日本航空宇宙学会

平成 23 年 3 月 30 日原稿受付

^{*2} 東京大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻

^{*3} 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻

第1図 マイクロ波無線給電システム全体の概念図

第2図 地上側システムの写真

クテナ（整流機能付きアンテナ）によってマイクロ波を受電するとともに、直流電流に変換してプロペラの駆動に用いる。電力送電には5.8 GHz、パイロット信号には2.45 GHzのマイクロ波を用いる。

2.2 送電システム 正確かつ素早いビーム制御を可能にするため、送電システムにはアクティブフェーズドアレイアンテナを採用している⁷⁾。そのブロック図を第3図に示す。アンテナを機械的に指向させる方法とは異なり、マイクロ波の位相制御によりビームの形成、指向を行うため、大きな設備においても慣性の制約を受けることなく、より高速なビーム指向が可能となる。

まず主発振器において5.8 GHzのマイクロ波を発生させ、分配器によって5系列に分ける。最も左側の列を基準とし、

第3図 送電システムのブロック図

第4図 送電用アンテナアレイの配置

残りの各列において6ビットデジタル移相器によって必要な位相を加える。そして、サブアンプによりデジタル移相器に伴う電力損失を補い、電界効果トランジスタアンプによって各列の電力をそれぞれ1Wに揃え、1mの同軸フレキシブルケーブルを経て送電用方形ホーンアンテナに送っている。電力測定の結果、フレキシブルケーブルでの損失が約1 dB（約20%）であり、放射される電力は合計4.0 Wである。アンプをアンテナに直接接続すれば、この損失は無くすることができる。

ホーンアンテナアレイの配置を第4図に示す。ビームの発散角 θ_{div} とアンテナ径 D は(1)式のように反比例の関係があるため、大きな開口を用いると指向性が高まるが、逆に最大ステアリング角 $\theta_{\text{ste,max}}$ （主ローブとグレーティングローブの大きさが同じになる角）は(2)式のようにアンテナ間隔 d_1 （アンテナ中心間の距離）と反比例の関係があり、間隔が広がるとステアリング角が小さく制限される。

$$\theta_{\text{div}} = \arctan(2\lambda/\pi D) \quad (1)$$

$$\theta_{\text{ste,max}} = \arcsin(\lambda/2d_1) \quad (2)$$

僅か5つのアンテナ要素で2次元のビーム形成および指向を実現するため、アンテナ間隔を $d_1 = 110\text{mm}$ 、アンテナ

第 5 図 放射電力密度分布測定結果

第 6 図 送電波偏波形状の測定結果

直径を $D = 330 \text{ mm}$ とし、ビーム発散角 9 deg 、最大ステアリング角 12 deg を実現している。

さらに、MAV のヨー角は時々刻々と変化するため、偏波方向に依存しない円偏波による送受電を行う必要がある。そこで方形ホーンアンテナから放射される直線偏波を円偏波に変換する金属グリッド型サーキュライザ⁸⁾を設計製作し、ホーンアンテナアレイ開口部に装着した。

第 5 図に高さ $1,500 \text{ mm}$ における放射ビームの電力密度の測定値、第 6 図に偏波性能の測定値を示す。複数のアンテナから放射されるマイクロ波が空間で合成され、ビーム品質 $M^2 = 1.6$ 、発散角 9 deg のガウシアンビームを形成することができている。偏波は完全には円偏波となっていない。

アンテナ間隔がマイクロ波の波長 51.7 mm よりも大きいので、サイドローブの他にグレーティングローブが生じる。特にステアリング角を大きくとると、グレーティングローブが相対的に大きくなり、主ローブに含まれる電力の割合が低下する (第 7 図)。この関係より、およそ有効なビームステアリング角はおよそ 9 deg であると考えられる。

第 7 図 ステアリング角と主ローブのビーム発散角および主ローブに含まれる電力割合の関係 (数値シミュレーション結果)

第 8 図 追尾システムのブロック図

2.3 追尾システム 旋回する MAV の追尾には位相比較法によるソフトウェアリトロディレクティブ方式を採用した。そのブロック図を第 8 図に示す。MAV 側から送信された 2.45 GHz のパイロット信号を、地上 (x - y 平面) に二次元配列された 2 対の追尾アンテナで受信する。対になったアンテナのうち一方の受信波に位相差 90 deg を加え、利得の高いログアンプで増幅することで電圧振幅を合わせた後、ミキサーにより合成している。2 つの波が同位相の場合は強め合い、逆位相の場合は弱め合う。この合成波を整流して得られた電圧値から、 x 軸方向、 y 軸方向それぞれについての信号入射角を LabVIEW を用いて算出する。各ラインのコンポーネント誤差も LabVIEW プログラム内で修正できるため、精度の高い追尾が可能である。追尾アンテナのアンテナ間隔は $d_2 = \lambda$ (2.45 GHz で 122 mm) とした。これにより、パイロット信号入射角が $-12 \text{ deg} \leq \alpha \leq 12 \text{ deg}$ の範囲で、入射角と出力信号値の関係は第 9 図に示すような 1 対 1 の対応をとる。つまり、この範囲であれば入射角を推定できる。

MAV に搭載するパイロット信号アンテナには、当研究

第9図 パイロット信号入射角と合成波の出力信号値

第10図 推定された入射角 α_x, α_y の時間変化
高度 $h = 1,500$ mm, 旋回半径 $r = 237$ mm, 周期 1.62 sec.

室で設計した薄型軽量円偏波パッチアンテナを、追尾用アンテナには JRC 社製作の円偏波パッチアンテナを用いた。MAV を模擬したパイロット信号発信装置を用いて、旋回するターゲットの二次元追尾実験を行った。追尾アンテナの上空 $h = 1,500$ mm の高さにおいて、2.45 GHz 発振器付きアンテナを旋回半径 $r = 237$ mm, 回転周期 1.62 sec (モータ回転速度 $\omega = 37.0$ rpm) で旋回させた。この条件での最大入射角は 9° である。計測で得られた出力信号から推定された入射角の時間変化を第10図に示す。振幅が $\alpha = \pm 9^\circ$ で周期が 1.62 sec であることから、パイロット信号を正しく追尾できていることがわかる。

第10図で得られたデータを元に、追尾システムの精度を評価した。実際の MAV モデルの位置と算出された位置との誤差を、ラジアル方向およびアジマス方向 (第11図)、それぞれに対し原点を中心とした角度で算出した。結果はラジアル方向誤差 $-1.79^\circ \leq \alpha_{\text{rad}} \leq 0.41^\circ$, アジマス方向誤差 $-1.97^\circ \leq \alpha_{\text{azi}} \leq 0.47^\circ$ となった。送電ビーム発散角 $\theta_{\text{div}} = 9^\circ$ を考慮すると、十分な精度であることがわかる。

第11図 自動追尾実験の概略図

第12図 軽量フレキシブルレクテナ

第13図 レクテナの構造

2.4 受電システム 照射されたマイクロ波ビームを受電し直流電力を得るため、軽量フレキシブルレクテナを開発した。アンテナにはマイクロストリップパッチ円偏波アンテナを用いた。一般に、誘電体基板にはエポキシ等の硬い材料が用いられるが、本レクテナでは市販のフェルト材を用い、アンテナパッチと地板およびマイクロストリップラインには銅箔テープを用いることによって、軽量化とフレキシブル化を実現した。フェルト材の厚さは約 1 mm で、スペクトルアナライザを用いて測定したアンテナ放射の周波数特性から推定した比誘電率は 1.003 である。開発したレクテナの写真を第12図に示す。左側はアンテナ面であり、右側は整流回路面である。地板は2枚のフェルト材に挟まれており、第13図に示すようなサンドウィッチ構造になっている。

ホーンアンテナからレクテナに照射される電力が 13.2 mW のときの、負荷抵抗とレクテナ効率、出力電圧の関係を第14図に示す。この電力は JRC 社製パッチアン

第 14 図 レクテナ効率、出力電圧と負荷抵抗の関係
マイクロ波入力電力 13.2 mW.

第 15 図 レクテナ効率の入力電力依存性
負荷抵抗 100 Ω.

テナとマイクロ波パワーメータによって校正している。図に示すように、100 Ω の負荷がこのレクテナでの最適負荷であり、最適負荷は入力電力を変えても変わらない。

第 15 図は最適負荷 (100 Ω) において、ホーンアンテナからの距離を変化させて入力電力を変化させたときのレクテナ効率である。効率は入力電力の増加にともない上昇し、63 mW で最大効率の 45.3% を迎える。低電力域で効率が低いのは、ダイオードの立ち上がり電圧分だけ整流できていないためである。一方 63 mW 以上で急に効率が低下するのは、ダイオードの耐圧を超えたためであると考えられる。まだ整流回路に反射損失やジュール損失が存在するが、数十 mW レベルのマイクロ波をさらに高い効率で整流するには、それに適したダイオードの開発が効果的である。

3. システムの統合とデモンストレーション

送電・追尾・受電システムを統合し、旋回する MAV モデルへの自動追尾送電のデモンストレーションを行った。レクテナを搭載した MAV モデルの写真を第 16 図に示す。MAV モデルには最小作動電力 1 mW、負荷抵抗 10 Ω の

第 16 図 送電デモンストレーション実験系 (左), MAV モデル (右上), 翼下面に配置されたレクテナアレイ (右下)

第 17 図 旋回時の受電電力
負荷抵抗 10 Ω.

プロペラ付き小型モータを取り付けた。しかし自力では飛行できないため、サポーターバーに取り付け、それをモータで回転させ旋回させている。

翼下面にはレクテナ 10 素子を並列接続することにより、モータとのインピーダンスマッチングを行っている。アンテナアレイのピッチを変えて測定したところ最適ピッチは 0.85λ ($= 44$ mm) であった。このときのアンテナ 1 個当たりの有効面積は $1,930 \text{ mm}^2$ である。

第 16 図右下写真にある翼面中央の大きなアンテナはパイロット信号送信用の 2.45 GHz 円偏波パッチアンテナである。

デモンストレーションは、MAV モデルを $h = 1,500$ mm, $r = 237$ mm の条件で、いろいろな速度で旋回させながら伝送実験を行った。このときビームステアリング角は 9 deg である。その結果、どのような条件でもプロペラは回転を続けた。

同じ実験系を用いて受電電力の測定を行った。負荷抵抗は 10 Ω を使い、その結果を第 17 図に示す。受電電力は位置により上下はあるものの、最低 13.2 mW、最大 24 mW、平均 17.6 mW の電力を得ることができた。位置によって受

電電力が異なっているのは、送電波やレクテナにまだヨー角依存性があるためである。さらに、第15図に示したように、レクテナ効率が入力電力の変化に敏感であり、ヨー角依存によるレクテナへの入力電力の変化が受電電力に増倍されて影響したものである。

本システムの伝送効率を評価すると、送電電力 4.0 W に対し受電電力は最大 24 mW であるから、総合伝送効率は 0.60% 程度である。その内訳は、ビームステアリング角 9 deg のとき主ローブに含まれる電力が放射された電力の約 33% で、 $h = 1,500 \text{ mm}$ で主ローブの面積は $173,000 \text{ mm}^2$ であるのに対し、アンテナの有効面積は $1,930 \text{ mm}^2 \times 10$ 個であるから、捕獲効率は 11.2% である。さらにレクテナ効率が約 20%（出力 2.4 mW 時）であり、総合的には 0.74% と計算される。上記の測定結果と比較して妥当な値であると考えられる。実際には、ガウシアンビーム中心がレクテナ配置中心より前方に位置したこと（追尾された位置はパイロット信号アンテナの位置）やレクテナを並列接続する際の損失、またアンテナのヨー角依存性のばらつきなどの影響で幾分低下しているものと考えられる。

4. ま と め

マイクロ波無線給電システムを構築し、旋回している小型飛行体モデルに対して自動追尾を行いながら、アクティブフェーズドアレイを用いてマイクロ波ビームを指向させ、4.0 W の電力を無線で供給するデモンストレーションを行った。

フェルト材を基板として用いた軽量フレキシブルレクテ

ナ 10 素子を搭載した MAV モデルを、高度 1,500 mm、半径 237 mm で旋回させ、モデルに搭載した小型モータを駆動させることに成功した。

同実験条件で、 10Ω の負荷抵抗を用いて受電電力を測定した結果、MAV モデルには平均 17.6 mW、最大 24 mW の電力を供給できていることがわかった。すなわち、総合伝送効率は最大で 0.60%、平均で 0.44% であった。

効率は決して高くないが、バッテリーなしでモータが駆動できる点が重要で、将来の移動小型ロボットの駆動方法として、無線電力供給の可能性を示すことができた。

参 考 文 献

- 1) Glaser, P. E.: Power from the Sun: Its Future, Science, **162** (1968), pp. 857–861.
- 2) 松本 紘, 篠原真毅: 宇宙太陽発電所とマイクロ波エネルギー伝送技術, 信学技報, SAT95-77, MW95-119, 1995, pp. 31–36.
- 3) 篠原真毅, 松本 紘: マイクロ波を用いた電気自動車無線充電に関する研究, 信学論誌 C, **J87-C** (2004), pp. 433–443.
- 4) Lafleur, J. M. and Saleh, J. H.: System-Level Feasibility Assessment of Microwave Power Beaming for Small Satellites, J. Propul. Power, **25** (2009), pp. 976–983.
- 5) Shibata, T., Aoki, Y., Otuka, M., Idogaki, T. and Hattori, T.: Microwave Energy Transmission System for Microrobot, IEICE Trans. Electron, **E80-C** (1997), pp. 303–308.
- 6) 小紫公也: エネルギーハーベスティング技術の最新動向, シーエムシー出版, 東京, 2010, pp. 40–48.
- 7) Komatsu, S., Katsunaga, K., Ozawa, R., Komurasaki, K. and Arakawa, Y.: Power Transmission to a Micro Aerial Vehicle, AIAA Paper 2007-1003, 2007.
- 8) 古田島博, 川村京太郎: 金属グリッド形サーキュライザの設計, 信学技報, SST98-69, MW98-195, 1999, pp. 87–92.