

小型飛行体へのマイクロ波自動追尾送電のデモンストレーション

小田 章徳[†] 澤原 弘憲[†] 石場 舞[†] 小紫 公也^{†§}

荒川 義博[‡]

[†]東京大学大学院新領域創成科学研究科 〒277-0882 柏市柏の葉 5-1-5

[‡]東京大学大学院工学系研究科 〒113-8656 文京区本郷 7-3-1

[§]宇宙航空研究開発機構 〒252-5210 相模原市中央区由野台 3-1-1

E-mail: †akinori.oda@al.t.u-tokyo.ac.jp

あらまし ソフトウェアを用いた自動追尾送電システムは、空間を自由に動く移動体への高効率なマイクロ波無線送電を可能にする。本研究室では、MAV と呼ばれる小型飛行ロボットへの無線電力伝送システムの開発をおこなっており、これまで送電、追尾、受電のそれぞれについて研究開発を進めてきた。送電システムに 5.8GHz 用 5 素子ホーンアンテナアレーを、追尾システムに 2.45GHz パイロット信号を用いたソフトウェアリトロディレクティブを、受電システムに 5.8GHz 用フレキシブルパッチレクテナを用いる。送電システムと追尾システムを統合し、自動追尾送電の精度評価をおこなった。結果として、送電ビーム発散角 $\theta_d=9$ deg. に対して、半径方向で $\theta=1.6$ deg. 程度、円周方向で $\theta=3$ deg. 程度の誤差に抑えることができた。

キーワード マイクロ波、無線エネルギー伝送、MAV、自動追尾、フレキシブルレクテナ

Demonstration of Auto-tracking Microwave Wireless Power Transmission to MAV

Akinori ODA[†], Hironori SAWAHARA[†], Mai ISHIBA[†], Kimiya KOMURASAKI^{†§}
, and Yoshihiro ARAKAWA[‡]

[†]Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-0882

[‡]Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo, Tokyo 113-8656

[§]Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa 229-8510

E-mail: †akinori.oda@al.t.u-tokyo.ac.jp

Abstract An auto-tracking wireless power transmission system using software enables high efficiency power transmission to a vehicle moving on the fly. In our laboratory, a microwave wireless power transmission system to a Micro Aerial Vehicle (MAV). Until now, a power transmission system, a tracking system, and a power receiving system are being developed independently. The transmission system is composed of five 5.8GHz microwave horn antennas as phased array, software retro-directive function using 2.45GHz microwave was adopted as the tracking system, 5.8GHz flexible patch rectennas are chosen as the receiving system. In this paper, the power transmission system and a tracking system were combined and accuracy of auto-tracking power transmission was estimated. As a result, error of detecting MAV positions are $\theta_r=1.6^\circ$ and $\theta_c=3^\circ$, while beam divergence angle is 9° .

Keyword Microwave, Wireless Power Transmission, MAV, Auto-tracking, Flexible Rectenna

1. はじめに

化石燃料の枯渇や地球温暖化などの環境問題がさげられる今日において、環境負荷低減を目指した技術

に注目が集まっている。特に、これまでエネルギー密度の高い石油系燃料を携帯することにより、高い可動性、長い走行距離を実現してきた自動車や航空機など

の輸送システムは、その動力源を電気に置き換えようとする試みがなされているが、石油系燃料をバッテリーで置き換えることは非常に難しい。長距離の無給電走行を実現するには大きな充電容量が必要で、バッテリーに多くの鉱物資源が必要になったり、バッテリー重量が旅客・貨物重量を上回り、全体の効率の低下を生じたりしかねない。バッテリー重量・負荷を軽減するには、走行中に、あるいは小まめにステーションに行って給電を行うことが必要で、ワイヤレス・エネルギー伝送技術が重要となる。また、災害地の偵察・点検や、体内の検診などを目的とした各種のマイクロロボットは、ワイヤを付けたその重みで動けなくなるサイズであったり、ワイヤ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。バッテリーレス駆動ならば、その寿命、サイズ、可動範囲は制限を受けない。近年 mW レベルの電力でも動作する IC、センサ、LED 等の出現により、より高機能なバッテリーレスデバイスが設計可能となってきており、これまでに無いアプリケーションも期待できる。

本研究では、災害地の偵察や、自動車の安全システムなどを目的とした、小型飛行体への無線電力実現を目指している。

2. システムの概要

本研究のコンセプトを Figure 1 に示す。^{1,2} MAV はバッテリー駆動を基本とした無人、自動操縦の小型飛行体で、バッテリー残量の少なくなった MAV がエネルギーステーション上空を旋回し、その間送電マイクロ波ビームが MAV に自動追尾して充電を行うことにより、離着陸無しエネルギー供給を可能としている。本研究のシステムは地上側にある送電システム、追尾システムと、MAV 側にある受電システムの 3 つのサブシステムから構成されている。

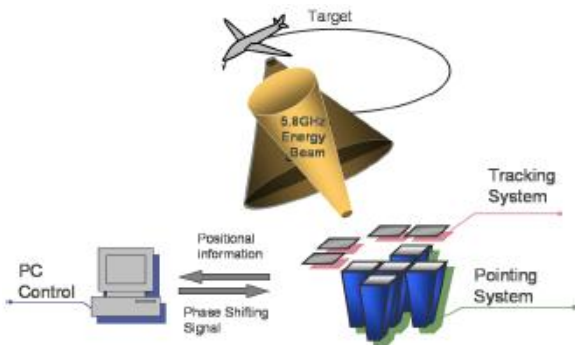


Fig.1 マイクロ波エネルギー伝送の概念図

3. 地上側システム

MAV へのマイクロ波無線電力伝送を行うために、地上側に、MAV の位置を特定し、その方向にマイクロ波ビームをステアリングする装置が必要となる。当研究室では高速で移動する飛行体をターゲットとしていることから、追尾にはレトロディレクティブ方式を、送電にはフェーズドアレイを用いることで、素早いビームステアリングを可能にしている。

3.1. 送電システム

送電システムにはフェーズドアレイアンテナを採用しており、そのブロック図を Figure 2 に示す。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、複数の Amplifier によって各列の電力を 1W の揃え、ホーンアンテナによりマイクロ波ビームを放射している。本送電システムの諸元は Table 1 のとおりで、発振波長よりも大きな口径を持つホーンアンテナを用いることにより、5 つの要素しかないにもかかわらず、全体として大きなビーム径（アレイ外径）を実現し、ビーム発散角が 9° 程度と小さく抑えてある。

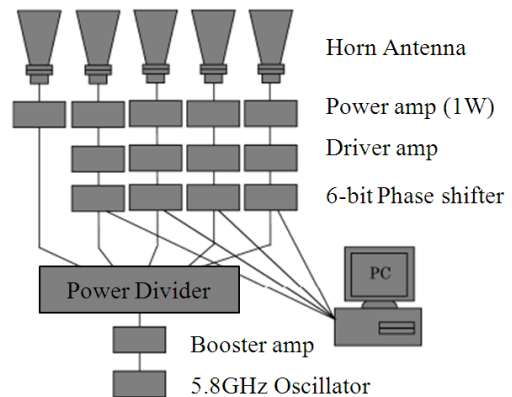


Fig.2 マイクロ波エネルギー伝送の概念図

Table1 送信システムの諸元

Parameters	Values
Microwave frequency, f	5.8GHz
Wavelength, λ	51.7mm
Total transmission power, P	5W
Antenna type	Horn antenna
Element number	5
Diameter of the array, D	330mm
Array pitch, d	110mm($d/\lambda=2$)
Steering angle, θ_{max}	9 deg.
Beam divergence angle, θ_d	9 deg.

3.2. 追尾システム

旋回する MAV の追尾には、ソフトウェアレトロディレクティブ機能を用いる。追尾システムのブロック図を Figure 3 に、装置の写真を Figure 4 に示す。MAV 側から 2.45GHz のパイロット信号を送信し、地上にある二次元配列されたアンテナで受信する。各軸に 2 つずつアンテナを配置し、各アンテナで受信した信号の位相差から、それぞれの軸方向のパイロット信号到来角をコンピュータのプログラム(LabVIEW)を用いて算出する。パイロット信号受信アンテナには JRC (日本無線) 製作の 2.45GHz 円偏波用パッチアンテナを用い、各軸方向のアンテナ間隔を 1.39λ ($=170\text{mm}$) とした。この値は送電ビームに干渉することのない最小値である。

Figure 3 のようにアンテナ、半波長回路、分配器、合成器を組み合わせる。これにより、 x 軸方向の出力信号 V_{com1} , V_1 及び、パイロット信号入射角 α_x には Figure 5 に示すような関係が得られる。アンテナ間隔を 1.39λ としたことにより、パイロット信号入射角が $-10.4 \text{ deg.} \leq \alpha \leq 10.4 \text{ deg.}$ の範囲で、入射角と出力信号値の関係は図に示すような一対一の対応をとる。つまり、この範囲であれば出力信号が分かれば入射角を推定できるのである。推定可能な入射角の範囲は $-10.4 \text{ deg.} \leq \alpha \leq 10.4 \text{ deg.}$ であるが、送電用マイクロ波ビームのステアリング角 $\theta = 9 \text{ deg.}$ から考えて十分な範囲である。

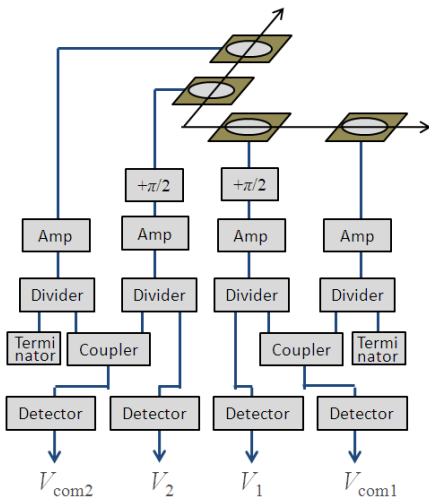


Fig.3 追尾システムのブロック図

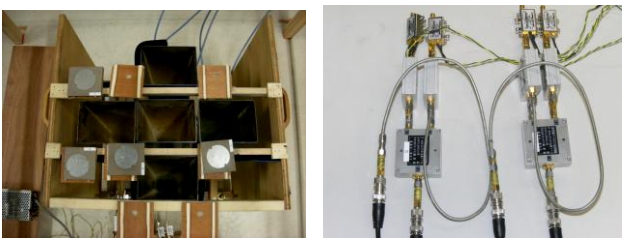


Fig.4 追尾装置の写真

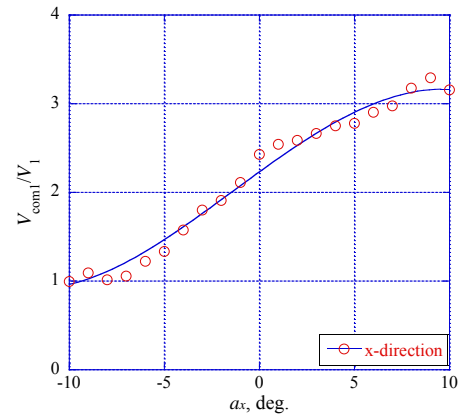


Fig.5 出力信号と入射角の関係(x方向)

3.3. インテグレーション

送電システムと追尾システムを統合し、MAV の旋回を模擬した装置を用いて、旋回するターゲットの二次元追尾実験をおこなった。地上にあるパイロット信号受信アンテナの間隔は x 軸, y 軸ともに 1.39λ とし、その上空 $h=1000\text{mm}$ の高さにおいて、2.45GHz 発振器付きアンテナを旋回半径 $r=100\text{mm}$, 回転周期 0.79sec. (モータ回転速度 $\omega=75.9 \text{ rpm}$) で旋回させた。計測で得られた出力信号 V_{com1} , V_1 , V_{com2} , V_2 から推定された入射角の時間変化を Figure 6 に示す。

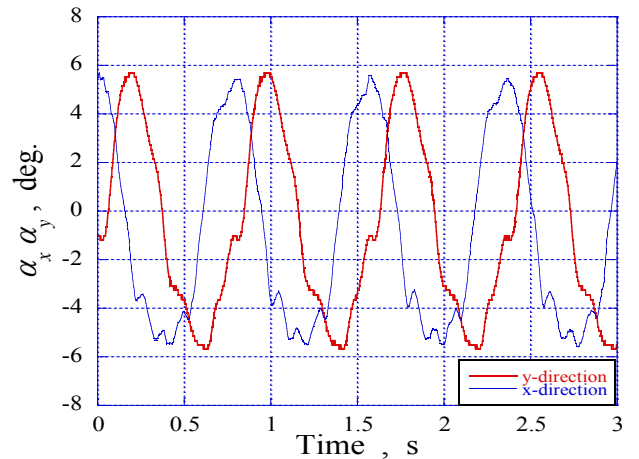


Fig.6 入射角の時間変化(旋回)

Figure 6 から分かるように、高さ $h=1000\text{mm}$ で旋回半径 $r=100\text{mm}$ のときの入射角 $\alpha = \pm 5.7 \text{ deg.}$ で x 軸, y 軸方向ともに最大値, 最小値をとっている。また、最大値同士の間隔が 0.79 sec. になっていることから、パイロット信号発信器の周期的な位置変化を推定することができた。

3.4. 追尾推定精度の評価

Figure 6 から得られたデータを元に、半径方向及び、円周方向の位置を算出した結果を Figure 7 に、実験の

概略図を Figure 8 に示す．算出された値が，実際のパイロット信号発信器の位置とどの程度の誤差があるか，また，送電ビームが十分にターゲットに照射されるのか評価する．

実験では旋回半径 $r=100\text{mm}$ で旋回させているのだが，算出されたデータでは $r_m=100\text{mm}$ を中心に周期的に振動し，最大で $r_m=120\text{mm}$ ，最小で $r_m=72\text{mm}$ という値がえられた．この値から，送電ビームステアリング角にして最大で $r_m=72\text{mm}$ のとき $\theta_r=1.6\text{ deg.}$ 程度の誤差が生じていることが分かるが，送電ビームの発散角 θ_d が約 9 deg. あるため，ターゲットに対して送電ビームを十分届けることができる．

一方，円周方向では，一定の回転周期 0.79 sec. で旋回装置のモータを作動させているのだが，算出されたデータでは θ_c は単調増加しているものの，一部で傾きが変化している点がある．算出された曲線と，傾き一定(モータ回転速度 ω =一定)とした理想的な直線を比較したところ，最大で $\Phi_c=31\text{ deg.}$ 程度の誤差が生じてしまっていることが分かった．これは推定位置と実際位置との直線距離 $d_c=52\text{mm}$ で，送電ビームステアリング角にして最大で $\theta_c=3\text{ deg.}$ 程度の誤差が生じている．半径方向に比べ誤差が大きくなってしまっているが，送電ビームの発散角 θ_d が約 9 deg. あるため十分許容できる誤差である．

半径方向，円周方向ともに，算出した値と実際の値とに許容はできるが無視できない程度の誤差が生じてしまっている．この大きな要因として，パイロット信号送信・受信アンテナのヨー角に対する依存性が考えられる．Figure 6 に示した波形には二つの波の強めあい弱めあいを表す位相差の情報(位相差による電圧値の変化)だけではなく，送信・受信アンテナの相対角の変化によって受信効率が変わり，受信信号の強さ変化の情報(ヨー角に依存する電圧値変化)がのってしまっているからであると考えられる．今後，さらに精度の良い追尾送電を実現するには位相差の情報のみを取り出せる仕組みにする必要がある．

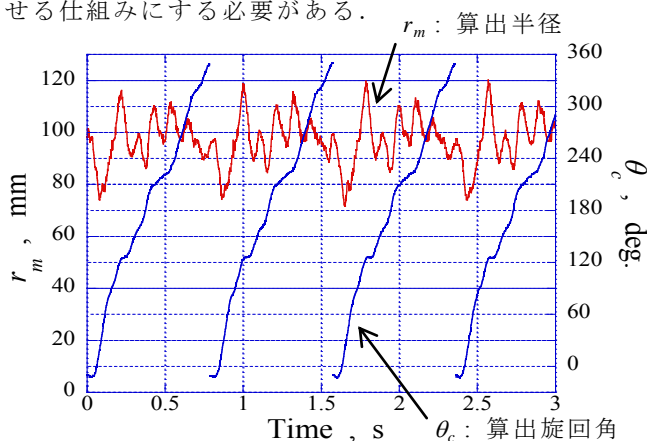


Fig.7 半径方向，周方向の測定値

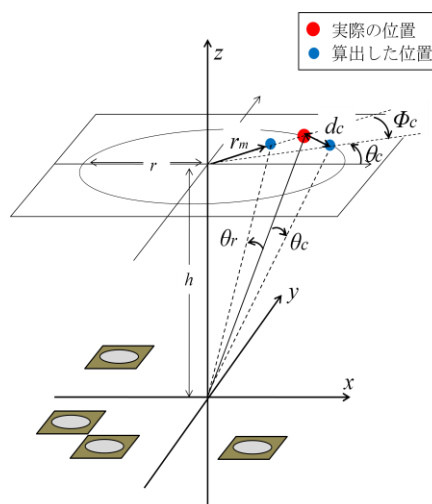


Fig.8 自動追尾実験の概略図

4. MAV側(受電)システム

マイクロ波を受信し，その電力をバッテリー充電やモータ駆動に用いるために，MAV側にレクテナを搭載する必要がある．比較的利得が高く，製作が容易なことからパッチアンテナが最適であるが，これまでのレクテナは硬くて重い誘電体基板を用いるのが一般的であり MAV への搭載には問題があった．そこで，従来の硬い誘電体基板を用いるのではなく，柔軟でかつ軽量の誘電体を用いたウェアラブルアンテナが提案された．³ 本研究室ではフレキシブルアンテナを開発し，MAV への搭載を目指している．

4.1. フレキシブルレクテナ

試作したレクテナの写真を Figure 9 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．Figure 10 にレクテナの構造を示す．レクテナはサンドウィッチ構造をしており，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は銅箔テープを，誘電体部分はフェルトを用いる．フェルトは市販のもので，厚さ約 1mm ，推定した比誘電率は 1.003 である．

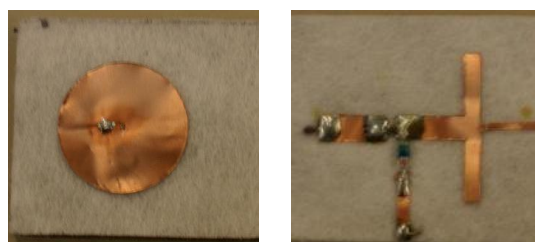


Fig.9 試作レクテナの写真

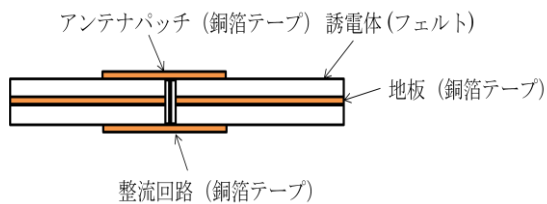


Fig.10 フレキシブルパッチレクテナの構造

レクテナの効率測定結果を Figure 11 に示す。効率はいずれの分かっているアンテナで交流電力を測定し到来電力を求め、レクテナで受電した直流電力との比で算出した。効率は、入力電力の増加とともに高くなるが、グラフの傾向からある点でピークができることが考えられる。

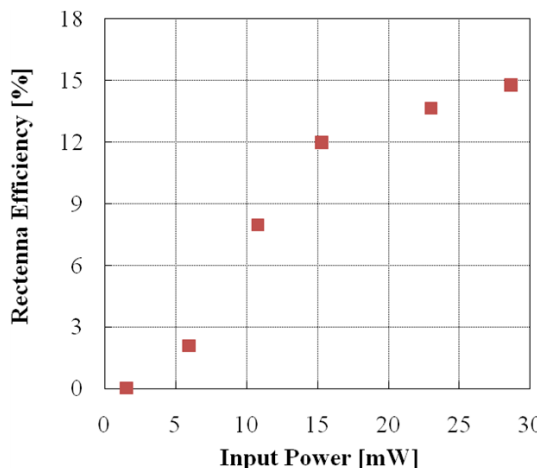


Fig.11 レクテナの効率測定結果

5. まとめと今後の展望

ソフトウェアレトロディレクティブを用いた二次元追尾システムを構築し、送電システムと追尾システムを統合した。MAV を模擬した旋回装置で、 $h=1000\text{mm}$ の高さにおいて、 2.45GHz 発振器付きアンテナを旋回半径 $r=100\text{mm}$ 、回転周期 0.79sec で回転させ追尾実験を行った。算出した結果から、パイロット信号発信器の周期的な位置変化を推定することができた。また、得られたデータから算出半径 $r_m=72\text{mm}$ のとき $\theta_r=1.6\text{deg}$ 程度の誤差が生じ、旋回角誤差 $\phi_c=31\text{deg}$ のとき $\theta_c=3\text{deg}$ 程度の誤差が生じることが分かったが、送電ビームの発散角 θ_d が約 9deg あるため、十分許容できる誤差で送電ビームを送ることができる。

また、受電システムでは、従来のレクテナの応用範囲を広げる目的から、フレキシブルレクテナを提案し、レクテナの試作、評価を行った。その結果、レクテナ効率は入力電力 28mW において約 15% であり、まだ

整流回路として使用するには小さい値であった。今回試作したフレキシブルレクテナは、整流効率は小さいものの、重量は約 79mg/cm^2 と、従来のパッチレクテナに比べ 2 ケタほど軽くきている。今回試作したフレキシブルレクテナは、軽量でフレキシブルであるという利点から、応用範囲が通常のレクテナよりも広く、十分有用性があると考えられる。

以下に今後の課題を述べる。追尾推定の精度評価では、送電ビームの発散角 θ_d が約 9deg あることから誤差を許容できるとしたが、やはり無視することはできない。高効率なマイクロ波送電を可能にするには追尾の高精度化が必要である。今回の追尾実験装置では、位相比較法を用い、位相差による電圧変化を読み取りようとしたが、実際にはアンテナのヨー角依存性の影響により正確な位相差の情報を得ることができなかった。したがって、これを改善すべく位相差検出器などを追尾システムに新たに導入し、位相差の情報のみを正確に読み取れるような装置に改良する必要がある。

また、受電システムでは、試作したレクテナの整流効率はまだ低く、マイクロストリップラインの形状を変化させることで更なる高効率化を図る必要がある。さらに、今回のアンテナは直線偏波用であり、将来様々なアプリケーションに応用することを考えると、ヨー角依存のない円偏波用のアンテナにする必要がある。したがって、これらを改善すべく新たなレクテナを試作する予定である。また、今回は軽量でフレキシブルな誘電体としてフェルトを使用した。フェルト以外の誘電体でも試作を行う予定である。

文 献

- [1] Komatsu S., Katsunaga K., Ozawa R., Komurasaki K., and Arakawa Y.: Power Transmission to a Micro Aerial Vehicle, AIAA paper 2007-1003, 2007.
- [2] Shimane E., Komatsu S., Komurasaki K., and Arakawa Y.: A MAV Flight using Microwave Power Supply, AIAA paper 2008-1149, 2008.
- [3] Tanaka M. and Jang J.: Wearable Patch Antenna. Technical report of IEICE AP2002-76(2002-7)