

特集 | マイクロ波エネルギー伝送を用いた自律移動可能なマイクロロボット*

Development of In-pipe Microrobot Using Microwave Energy Transmission

柴田 貴行

Takayuki SHIBATA

笹谷 卓也

Takanari SASAYA

川原 伸章

Nobuaki KAWAHARA

We have developed an in-pipe microrobot which moves in a pipe of 15mm diameter without wire. The microrobot consists of a microwave (RF) module for energy supply, a control circuit and a locomotive mechanism using a piezoelectric bimorph actuator. The RF module consists of a compact antenna and rectifying circuits. The demanded energy of 200 mW is supplied via microwave. The control circuit drives the locomotive device and changes the direction of the robot according to the outside signal. The wireless robot is attained by reducing the power consumption of the actuator and reducing the weight of RF module and the control circuit.

Key Words : Microrobot, Microwave, Wireless, Energy Supply.

1. まえがき

近年、自律移動が可能なマイクロロボットの研究が進んでいるが、その大部分はバッテリーを積み込んでエネルギー源としている。しかし、バッテリーに蓄えられるエネルギーは体積に比例するので、バッテリーの寿命はロボットの小型化に伴って短くならざるをえない。

一方、有線でエネルギーを供給する方法があるが、ロボットが小さくなると供給電線の剛性や重量が無視できなくなり、動きを妨げてしまう。したがって長距離の移動は困難になる。このため、ワイヤレスでのエネルギー供給がマイクロロボットには望ましい。

筆者らは、通産省の産技プロジェクトのもとで、発電システムをメンテナンスするマイクロロボットの研究開発を進めている。ここでは、直径10mmの配管の中に入り、内部を検査するロボットを開発しており、これまでに配管内へのワイヤレスエネルギー供給手段としてマイクロ波を用いることを提案してきた。

配管内のマイクロロボットに電磁波でエネルギーを供給する場合、電磁波の波長を配管径と同じ程度にすると、配管はマイクロ波帯で常用される導波管と等価になる。導波管モードの電磁波は屈曲配管でも減衰は少なく、高効率なエネルギー伝送が行える。

開空間においては、最初のマイクロ波電力伝送実験¹⁾が1964年に行われた。その後、マイクロ波電力伝送は、宇宙太陽発電所(SPS)の提案^{2) 3)}により注目され、現在も研究が進められている。地上での応用としては飛行機、飛行船に対するマイクロ波送電^{4) 5)}や、無電池カードシステム⁶⁾などが研究されている。送信周波数はいずれも2.45 GHzである。

* (社)電子情報通信学会の了解を得て、論文B誌(2000.5発行)より一部加筆して転載

筆者らは、配管内のマイクロロボットに対してマイクロ波でエネルギー供給を行う概念を提示し⁸⁾、最終目標である直径10mm配管内のマイクロロボットに対するエネルギー供給の拡大モデルとして、直径28mm配管内のマイクロロボットへのマイクロ波エネルギー供給⁹⁾、次に直径15mm配管内のマイクロロボットへのマイクロ波エネルギー供給¹⁰⁾について検討を進めてきた。

これはモノポールアンテナと1個の倍電圧整流回路、2層の圧電バイモルフ型移動機構を組み合わせたもので、水平移動速度1mm/sを記録した。しかし、(1)供給される電力が50 mW程度と少ない、(2)圧電素子の駆動のために送信マイクロ波をAM変調していたので移動速度が遅く、また直流が必要なセンサ等の電源に使用できない、(3)アンテナが1方向の偏波しか受信できないのでマイクロロボットが回転すると受信電力が低下する、などの問題があった。

本論文ではこの問題を解決するために、アンテナをモノポールアンテナからパッチアンテナに変更することで小型化するとともに、パッチアンテナと整流回路を組みにしたレクテナ素子を4素子用いて直交偏波を受信可能とし、出力も4倍増大させた。また、マイクロ波をAM変調せずに送信し、移動機構の駆動波形をマイクロロボットに搭載する制御回路で生成することを目指して、PLD(Programmable Logic Device)とアナログスイッチを用いた移動機構の駆動回路を開発し、無索移動マシンに搭載することで、水平移動速度10mm/sで安定した動作を行うことが可能なシステムを実現した。

以後、2.ではマイクロ波エネルギー伝送システムの構成について、3.で受信アンテナの構成について、4.で整流回路について述べ、5.で移動機構と駆動回路について述べる。

2. システム構成

配管内エネルギー供給に用いるマイクロ波の周波数は、円形導波管の基本モード(TE₁₁モード)だけが通過する周波数を選択するとモード遷移によるロスがなく安定して伝送できる。本システムは直径15mmの配管なので、周波数は上記の条件を満たす14.0GHz ~ 14.5GHzを用いている。

システムの構成をFig.1に示す。円形配管中のマイクロロボットは、配管の軸を中心とする回転方向の自由度をもつ。そのため、マイクロ波は円偏波で送信することが望ましく、送信側にはポラライザが入っており、受信アンテナは直交偏波が受信可能な構造となっている。減衰器は配管入り口とアンテナの間に生じる定在波を低減するのに有効であり、移動時の受信電力の変動が3dB以下になるように減衰器の値を実験より求め、5dBの減衰量に設定した。そのうえで周波数を14GHz ~ 14.5GHzでスイープし、マイクロロボットがどの位置にいても受信電力が一定になるようにしている。(Fig.2)

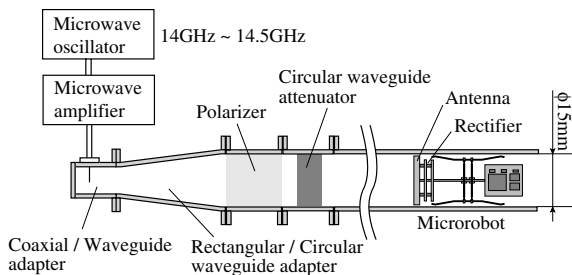


Fig.1 In-pipe microwave energy supply system.

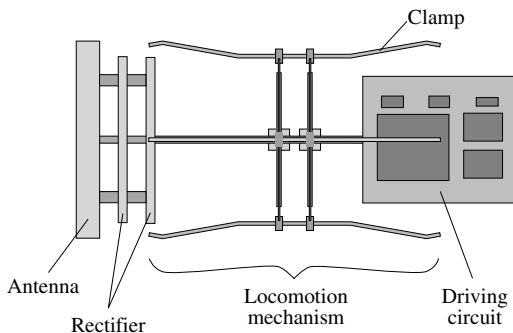


Fig.2 Autonomous locomotive robot.

3. 自律移動ロボットの構成

自律移動ロボットはマイクロ波の受信アンテナ、マイクロ波整流回路、移動機構の駆動波形発生と反転制御の回路、移動機構に分かれるがこのうち移動機構¹⁾以外の部分についての検討結果を以下に示す。

3.1 受信アンテナ

配管内のマイクロロボットに搭載するアンテナは、円偏波を受信しつつ、小型軽量なことが求められる。従来はセミリジッドケーブルを用いたモノポールアンテナを用いていたが、アンテナ高(マイクロマシンに搭載する際は配管軸方向)が13mmあり、マイクロロボットの全長が長くなる大きな要因となっていたため、新たにFig.3に示す4素子のパッチアレーアンテナを開発した。厚み2.25mm、比誘電率2.95の液晶ポリマ基板上に4個の方形パッチを軸対称に配置することにより、直交偏波を受信することができる。

また各素子に整流回路を接続することにより、分配回路を用いることなく出力を増大させることができる。文献²⁾では、2点給電アンテナに2個の整流回路を接続しているが、本方式は給電点の位置をアンテナ基板の外側に近づけやすく、後で述べる整流回路のレイアウトに有利なため採用した。

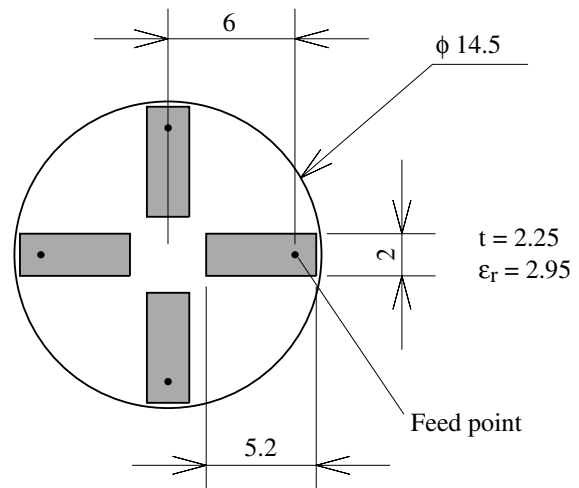


Fig.3 Structure of antenna.

アンテナ直前の配管断面を通過する電力に対して、4素子のアンテナが受信した電力の合計をアンテナの変換効率と定義する。アンテナを導波管に挿入して受信電力を測定した結果、変換効率はFig.4に示すように14.5GHzにおいて約70%で、モノポールアンテナを直径14.5mmの反射板に取り付けて測定した場合と同等のレベルを確保しながら高さを2.25mmに抑えている。

アンテナの変換効率がともに70%程度にとどまるのは、配管直径が15mmであるのに対し、アンテナ基板が管壁に接触しないように直径14.5mmと小さく作られており、アンテナで受信されないマイクロ波が、配管のすきまを通過して後方に漏れていることが原因である。また、アンテナの設計は14GHz～14.5GHzで効率が最大になるように設計したが、製作の誤差によりピークが14.5GHzにずれた。

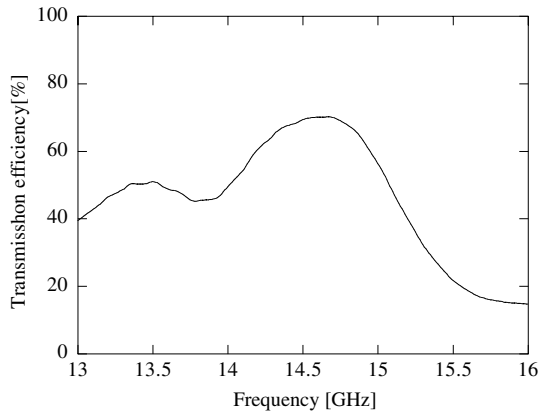


Fig. 4 Transmission efficiency of antenna.

3.2 整流回路

4 回路の整流回路を高密度に実装するために、従来配管軸方向に配置していた整流回路をアンテナ基板と平行に配置し、Fig.5に示すように1枚の基板に2回路の整流回路を実装した。回路はマイクロストリップ線路を用いた分布定数回路を用いている。RF入力より入ったマイクロ波はダイオードで整流され、低域フィルタを通過してDC出力端子では直流となる。ダイオードの前後には整合をとるためのオープンスタブが付いている。基板材料には損失の少ない高純度のアルミナ基板を用い、ラジアルスタブなどの採用により回路の小型化と高効率化を図った。整流素子はショットキー電極の径を最適化し低抵抗化した。整流回路は14～14.5GHzで整流効率が最大になるように設計した。

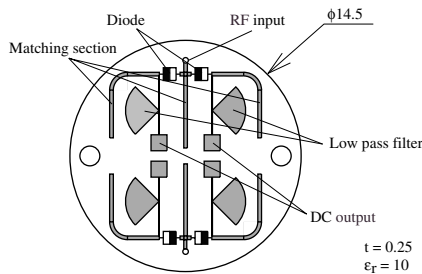


Fig. 5 Structure of rectifier.

しかしながら、整流素子は周波数が高くなるにつれて効率が低下するため、14GHzで整流効率がいちばん良くなる。

基板は隙間を開けて2枚重ねてアンテナとセミリジッドケーブルで接続している。Fig.6に整流回路1回路当りの周波数特性、Fig.7に負荷特性を示す。RF-DC変換効率は周波数14GHzで負荷が680Ωのときに効率が最大となり52%を示した。この回路は最大100mWの整流出力をもつので、理想的に4個の整流回路に電力が分配されれば400mWの出力がある。

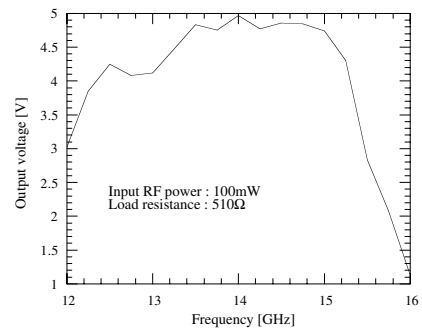


Fig. 6 Frequency dependence of output voltage of rectifier.

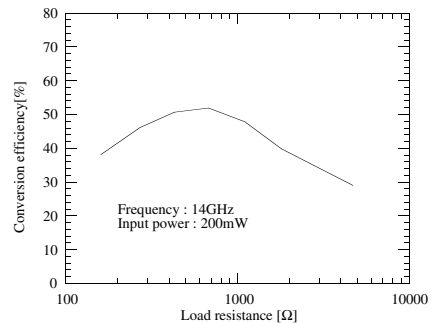


Fig. 7 Load characteristics of conversion efficiency of rectifier

しかし2章で説いたように、整流回路をアンテナと接続し、レクテナとして配管中においた場合、出力は定在波の影響で常時50～100mWの間で変動するため4素子の合計は300mW程度になる。また、ロボットの移動中は直径14.5mmのアンテナが常に直径15mmの配管の中心に位置しているわけではなく、移動につれて周方向にずれるためレクテナの出力も変動する。したがって、安定した電力供給が行える範囲は200mWまでとなった。

3.3 移動機構と駆動回路

移動機構にはPZTを用いたバイモルフのアクチュエータを用いた慣性駆動方式を使用している。Fig.2のように、移動機構の中心軸に慣性体を取り付ける構

造になっており、アンテナ、整流回路、駆動回路を慣性体として利用している。ゆっくり電圧が変化するときには慣性体が動き、急激に変化するときにはクランプが管壁とスリップすることにより移動する。またノコギリ波形を反転することにより移動方向を変えることができる。

これまで、文献10)では整流回路の出力をPZTに直接接続し、送信するマイクロ波をのこぎり波でAM変調することでPZTにのこぎり歯波形を印加していた。この方式はマイクロロボットに回路が不要で構造が簡単であったが、PZTにたまった電荷を抜くためのダミー抵抗を並列に接続する必要があったため非常に効率が悪かった。

そこで今回、マイクロ波をAM変調せずに送り、整流回路とPZTの間に発振器内蔵の駆動回路を搭載する方式を検討した。Fig.8に駆動回路の原理を示す。PZTは一種のコンデンサとみなせるので4系統のスイッチと抵抗の組合せにより、のこぎり波を印加することができる。

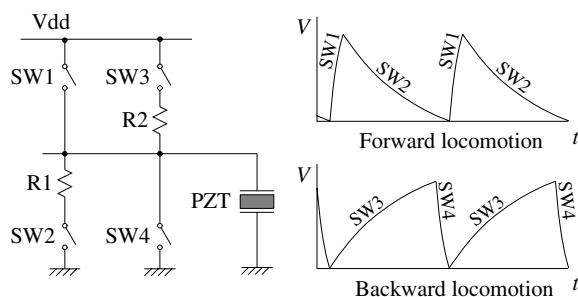


Fig. 8 Principle of driving circuit.

マイクロロボットの回路構成をFig.9に示す。整流回路の出力は4系統あるが、そのうちの3系統を並列接続して駆動制御回路のための電源とし、残り1系統をPZT駆動用の電源とした。駆動回路はFig.8に示した回路を電子的に行うためにPLD(Programmable Logic Device)とアナログスイッチを用い、供給される電圧の倍の電圧で駆動できるようにPZTの両極に

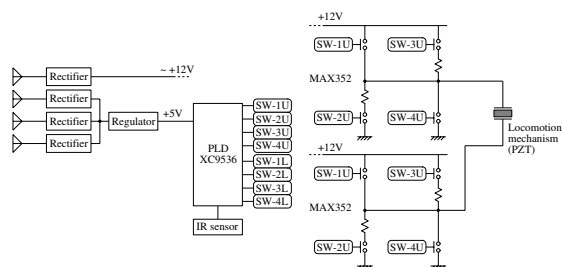


Fig. 9 Schematic layout of circuit.

スイッチが入るような構成にした。整流回路の出力電圧は負荷によって変動するが、この構成で駆動制御回路に5V以上、PZTに12V程度の電圧を供給する必要がある。各々の設計電圧である5Vと12Vを印加したときの消費電力は駆動制御回路が103mW、PZTが56mWである。

文献10)では50mWの電力で水平移動速度1mm/sであったが、今回の回路を使用することにより、159mWの消費電力で10mm/sの移動速度となり、3.18倍の電力で10倍の移動速度が得られた。今回の回路で移動速度が大きく上がった第1の理由は、PZTの両極を駆動する回路により24Vの高電圧で駆動できたことである。

第2の理由は、PZTと並列にダミー抵抗を付加する文献10)の方式では、慣性駆動に最も必要なのこぎり波の立上り時の電流が十分にとれなかったのに比べ、今回はコンデンサを積み込むことができたため、PZTを駆動するのに十分な瞬時電流を確保できたことである。

本システムの場合制御回路を構成するPLDへの電力供給が低下すると回路がリセットされてしまうので、5V電源の安定供給を考慮して3個並列の接続を選択し、残りの1個を12V用に用いた。整流回路1個当りの負荷抵抗を計算すると、駆動制御回路については3個並列に接続し、5Vを供給しているため、負荷抵抗は728となり、PZTへは整流回路が1個で供給電圧が12Vなので負荷抵抗は2570となる。したがって、PZTへ電力を供給する整流回路は最適負荷条件から外れている。

PZTの駆動周波数は、消費電力低減のために水晶発振回路を省略しPLD自身から動作に必要なクロックを供給する構成にしたため、電圧によって若干の変動があり、約1kHzである。前進、後退の駆動波形の切換えは赤外線センサが赤外線を受光すると、PLDが反転の制御を行うようになっている。

4. マイクロ波エネルギー供給システムの評価

以上のような検討をもとに、自律移動ロボットを含むマイクロ波の送受信系について評価を行った。測定系はFig.10のとおりである。マイクロ波の送信周波数は、2.で述べた理由により14~14.5GHzをファンクションジェネレータで生成した1kHzの三角波でスイープした。自律移動ロボットの動作状態確認のため、金属メッシュを用いた半透明の導波管を製作し、その

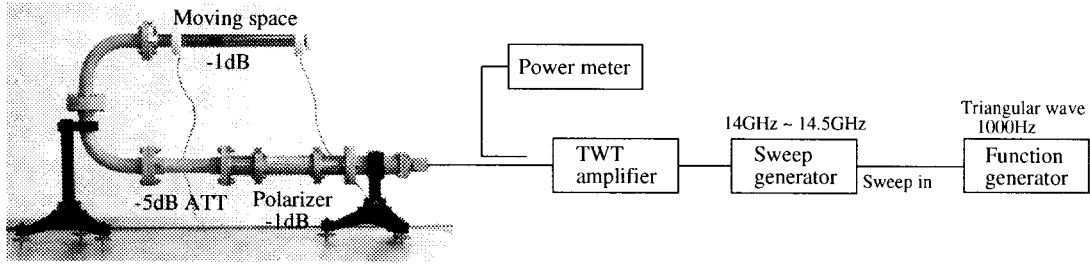


Fig.10 Configuration of experimental system.

両端に赤外線発光ダイオードを取り付け、反転ポイントとした。

配管への投入電力は、同軸導波管変換器の直前に方向性結合器を取り付け、パワーメータで測定した。配管への投入電力が34dBm程度になると自律移動ロボットは動作し始め、36dBmまでの入力に対して良好に動作した。送信側の偏波は円偏波で、受信側は直交波が受信可能になっているので、ロボットが回転しても移動特性に変化はなかった。

投入電力が34dBmのとき、水平方向への移動速度は約10mm/sであったが、配管系をまるごと90度回転して測定した垂直上方への移動速度は、自重を持ち上げる力が必要なため9mm/sに落ちた。配管の損失は同軸入力から円形導波管の円偏波の出力までが約1.5dB、定在波を抑制するための円形導波管減衰器で約5dBであるが、伝送系の損失を正確に出すためにFig.11に示す測定を行った。

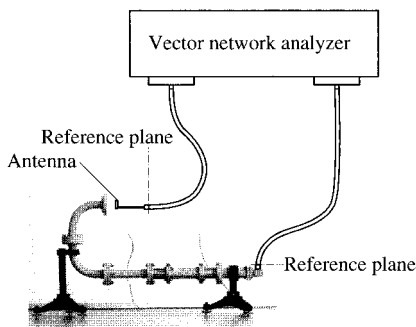


Fig.11 Test set for microwave energy transmission.

ベクトルネットワークアナライザを用い、同軸導波管変換器とFig.3に示したパッチアンテナの1素子に同軸コネクタを取り付けた経路間の損失を測定した。パッチアンテナの他の3箇所の給電点は50Ωのチップ抵抗で終端した。透明配管の部分は取り除き、角度や位置を変えてアンテナを配管に入れ、8回の測定を行い平均をとった。13~16GHzの周波数特性をFig.12に示す。14.5GHzから15GHzが最も良くなったが、これはアンテナの特性と一致している。使用帯域

内の14.5GHzでは損失は約14dBである。

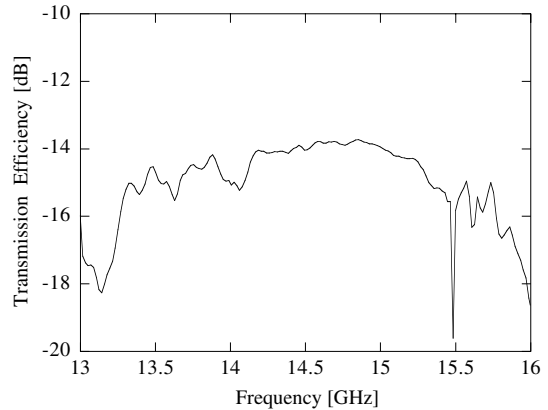


Fig.12 Frequency dependence of transmission efficiency.

すなわち、送信電力が34dBmだとすると、整流回路には20dBmの電力が投入されていることになり、整流効率を考えると1個の整流回路当たり50mWの電力を供給していることになる。本アンテナは4素子なので合計では200mWの供給電力となり、この電力で無索移動マシンが動作していることになる。直流電源装置で測定した場合よりこちらのほうがわずかに大きい見積もりとなったが、これはレギュレータに消費される電力があるので妥当な数値だと考えられる。

最後に、試作した自律移動マイクロロボットをFig.13に、主要な諸元をTable 1に示す。全長は38mmであり、制御回路を搭載して長くなった分は、アンテナの短縮によって文献10)の全長37mmと同等の長さに抑えることができた。

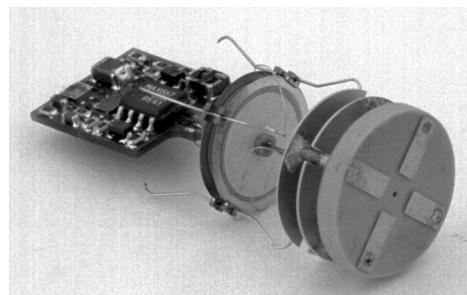


Fig.13 Autonomous locomotive robot.

Table 1 Major specification.

配管径	15mm
送信周波数	14GHz ~ 14.5GHz
配管の伝送損失	< 1dB/m
自律移動マシン長さ	38mm
自律移動マシン質量	2.25g
受信アンテナ形式	4素子矩形パッチアンテナ
整流素子	試作品 × 8 (耐圧: 27V)
送信電力 (RF)	4W
受信電力 (DC)	200mW
水平移動速度	10mm/s

<参考文献>

- 1) W. C. Brown, " The history of power transmission by radio waves, " IEEE Trans.Microwave Theory and Techniques,vol.MTT-32, No.9 pp.1230-1242, 1984.
- 2) Satellite power system concept development and evaluation program plan, DOE/NASA Report, DOE/ET-0034, 1978.
- 3) F. A. Koomanoff, " Satellite power system concept development and evaluation program, " The assessment process, Proc.DOE/NASA SPS Program Review, DOE Report CONF-800491, pp.15-20, 1984.
- 4) 篠原真毅, 松本 紘, 賀谷伸幸, " マイクロ波受電用軽量小型受電素子「レクテナ」の開発, " 信学 93春大, B-36, 1993 .
- 5) 賀谷伸幸, 藤野義之, 藤田正晴, 沢田 寿, 小野寺利浩, 川端一彰, " マイクロ波受電用レクテナの高効率化, " 信学 93春大, B-35, 1993 .
- 6) 藤野義之, 藤田正晴, 賀谷伸幸, 日下規男, " 2重偏波レクテナの偏波角特性に関する実験, " 信学論(B-II), vol.J80-B-II, no.11, pp.963-975, Nov 1997 .
- 7) 藤田 卓, 遠藤晴良, 佐川守一, 平林宏英, " 準マイクロ波帯レクテナの実験的検討, " 信学 94春大, B141, 1994 .
- 8) K. Sasaki, T. Shibata, S. Akita, and T. Hattori, " Technique of Wireless Energy Service for Microrobots Using Microwave, " Proc. of 4th Intern. Sympo. Micromachine & Human Science, pp.113-117, 1993.
- 9) 柴田貴行, 青木 豊, 井戸垣孝治, 服部 正, " マイクロ波による配管内エネルギー伝送システムの開発, " 信学技報, MW94-86, 1994 .
- 10) T. Shibata, Y. Aoki, M. Otsuka, T. Idogaki, and T. Hattori, " Microwave Energy Transmission System for Microrobot, " IEIEC Trans. Electron., vol.E80-C, no.2 p.303, Feb.1997.
- 11) 川北晋一郎, 大矢信之, 金山 斎, 井戸垣孝治, 服部正, " 配管内マイクロ移動機構の省電力化, " 平8電学全大, vol.3, pp.146, 1996 .

5. むすび

プラント等の配管内部を検査するために用いることが計画されている検査ロボットに対して、マイクロ波でエネルギー供給をする検討をし、直径15mmの配管内を10mm/sで移動し、赤外線の情報により自律的に反転動作を行うロボットを開発した。

今後は最終ターゲットである直径10mm配管中のマイクロロボットに対してマイクロ波でエネルギーを供給するために、20GHz帯のアンテナ、整流回路の検討を行うとともに、通信もマイクロ波で行う予定である。通信によりロボットの移動に伴うマイクロ波エネルギー供給の増減を補うような送信電力制御や、配管内の画像等の情報を配管外に送信することが可能になり、配管検査が実現できると考えている。

謝辞

本研究開発は、通産省工業技術院の産業科学技術研究開発制度に基づく「マイクロマシン技術の研究開発」の一環として、NEDOから委託を受けた(財)マイクロマシンセンターの再委託業務として実施したものである。



< 著 者 >



柴田 貴行
(しばた たかゆき)

基礎研究所
マイクロマシンに対するマイクロ波
エネルギー供給と通信の研究に従事。



川原 伸章
(かわはら のぶあき)

基礎研究所
マイクロデバイス、マイクロマシ
ン研究に従事。
工学博士



笹谷 卓也
(ささや たかなり)

基礎研究所
マイクロマシンに関する研究に従事。