

## 多自由度超音波モータを用いたマスタ・スレーブ型能動内視鏡の開発

Development of a Master-Slave System for an Active Endoscope  
using a Multi-DOF Ultrasonic Motor

原田 大 (慶大) 准 竹村 研治郎 (慶大) 正 前野 隆司 (慶大)

Dai HARADA, Keio University, 3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, haradai@aurora.dti.ne.jp

Kenjiro TAKEMURA, Keio University, kenjiro@bea.hi-ho.ne.jp

Takashi MAENO, Keio University, maeno@mech.keio.ac.jp

Endoscopes for industrial and medical fields are expected to have multi degree-of-freedom (DOF) motions. A multi-DOF ultrasonic motor we developed consists of a spherical rotor and a bar-shaped stator, and the rotor rotates around three perpendicular axes using three natural vibration modes of the stator. In this study, a multi-DOF unilateral master-slave system for an active endoscope using the multi-DOF ultrasonic motor is developed. The configurations of master and slave arms for the active endoscope are similar, so that an operator can easily handle the master-slave system. First, the master arm and the slave arm are designed. Next, the unilateral feedback controller for the master-slave system is developed. Finally, the motion control tests of rotor are conducted. As a result, the possibility of the endoscope is confirmed.

**Key Words:** Ultrasonic motor, Multi-DOF motion, Master-slave system, Endoscope

## 1. 緒論

現在、内視鏡は医療や工業といった様々な分野で用いられているが、これまでに開発された内視鏡は屈曲の自由な操作が先端部だけに限られており、操作可能な能動自由度が小さいという欠点を持っている。また、システム自体が大き過ぎること、エネルギー効率が悪いことなどの理由から実用化には至っていない[1][2]。そこで、本研究では、1つのアクチュエータで複数の運動自由度を持つ多自由度超音波モータ[3]を用いることによって、システム全体が小型なマスタ・スレーブ型能動内視鏡の開発を行う。この能動内視鏡は、これまでに開発された能動内視鏡よりもシステムの小型化が可能で、より能動的な運動を発生できる。また、マスタ・スレーブシステムを用いて内視鏡の形状情報をオペレータにフィードバックするため、高度な技術を持たない者でも内視鏡の操作を行えると考えられる。

## 2. 設計・製作

能動内視鏡に求められる条件から、本研究で開発する能動内視鏡の基本仕様を検討した。その結果、

能動内視鏡の駆動に多自由度超音波モータを用いる  
各関節の自由度を2自由度とする

内視鏡の制御にマスタ・スレーブシステムを用いる  
各関節部に角度測定機構を内蔵する

という5つの基本仕様を満足するシステムを設計・製作した。Fig.1 にマスタアームとスレーブアームの分解図を示す。マスタ・スレーブシステムの操作性を考慮して、マスタアームとスレーブアームを同様な概形にした。両アームの大きな相違点は、マスタ側は球状回転子を保持する磁石のみが内蔵されているのに対し、スレーブ側は球状回転子を駆動するために多自由度超音波モータを内蔵していることである。そして、球状回転子の回転角度を測定するために、Fig.2 に示すような2軸まわりの回転を検出できる機構を設けた。以上の機構を用いて製作した能動内視鏡の全体図を Fig.3 に示す。

## 3. 制御実験結果および考察

多自由度超音波モータは、振動子の縦振動1次モードと、直交する2つの曲げ振動2次モードを組み合わせることによ

り、Fig.2 に示した  $x$  および  $y$  軸まわりに回転子を回転させることができる。2つの曲げ振動2次モードの時間的位相  $\phi_{ben}^1$  および  $\phi_{ben}^2$ 、または電圧  $V_{ben}^1$  および  $V_{ben}^2$  を独立に操作することによって、球状回転子の  $x$  軸、 $y$  軸それぞれの軸まわりの回転数  $N_x, N_y$  を任意に決めることができる。そこで、位置制御の操作パラメータを入力する交流信号の時間的位相

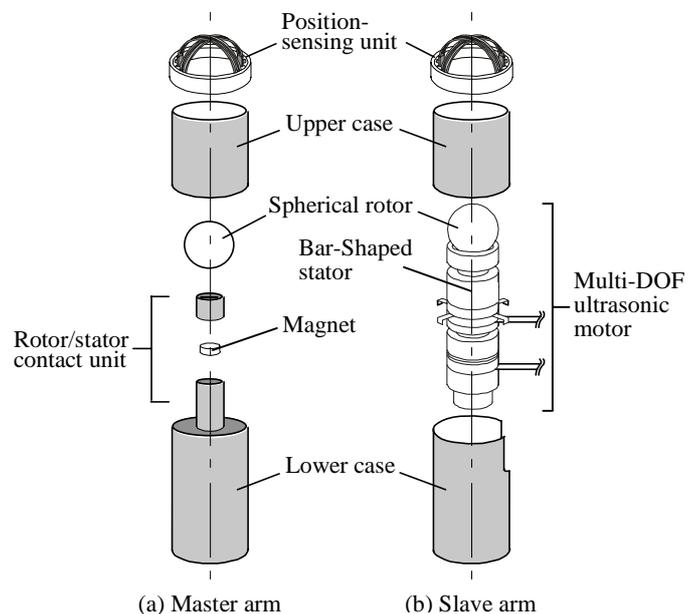


Fig.1 Configurations of arms

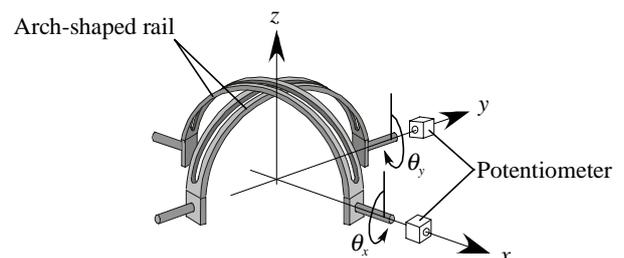


Fig.2 Position sensing unit

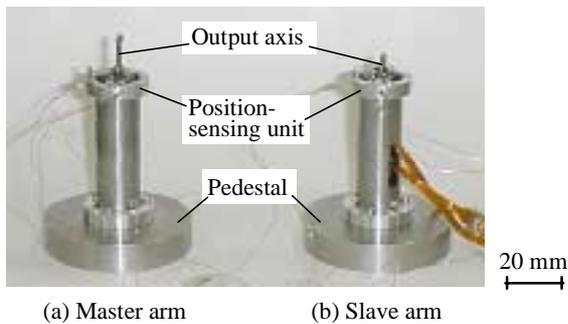


Fig.3 Master and slave arms for active endoscope

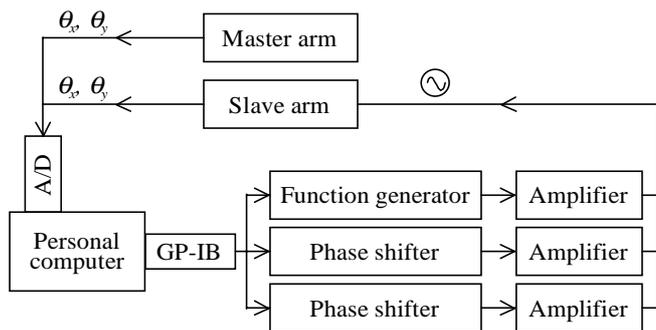


Fig.4 Master-slave system

$\phi_{ben}^1$  および  $\phi_{ben}^2$ , または電圧  $V_{ben}^1$  および  $V_{ben}^2$  として制御実験を行った。本研究で製作したマスタ・スレーブシステムの構成を Fig.4 に示す。マスタ回転子の回転角度とスレーブ回転子の回転角度をポテンショメータから取得し、回転角度差  $\Delta\theta$  から比例ゲイン  $K_p$  とバイアス  $n$  を用いて、

$$\xi = K_p \times \Delta\theta + n \quad (1)$$

なる関数を構成し、スレーブ側の多自由度超音波モータへ入力すべき  $\xi$  (位相また電圧) を定めた。そして、GPIB ボードを用いてファンクション・ジェネレータとフェイズ・シフタを操作し、スレーブ側に内蔵された多自由度超音波モータに交流信号を入力した。

以上のようなマスタ・スレーブシステムを用いて、マスタ・スレーブ追従制御実験を行った。

はじめに、位相  $\phi$  を操作パラメータとした場合の 1 関節 1 自由度、および 1 関節 2 自由度のマスタ・スレーブ追従制御の実験結果を Fig.5 に示す。操作パラメータ  $\phi$  以外の実験条件は、Table 1 のように設定し、比例ゲイン  $K_p$  とバイアス  $n$  は図中に示したとおりである。Fig.5(a)および(b)で実験に用いた比例ゲインおよびバイアスが異なるのは、1 自由度の場合と 2 自由度の場合で球状回転子への負荷トルクが異なるためである。また、Fig.5(b)の 2 自由度の制御において、追従誤差が残ったのは、振動子上の回転子との接触部に生じた複数の楕円運動が合成されることにより  $z$  軸まわりの回転力が発生したためであると考えられる。

次に、電圧  $V$  を操作パラメータとした場合の 1 関節 1 自由度、および 1 関節 2 自由度のマスタ・スレーブ追従制御の実験結果を Fig.6 に示す。操作パラメータ  $V$  以外の実験条件は、Table 2 のように設定し、比例ゲイン  $K_p$  とバイアス  $n$  は図中に示したとおりである。ただし、回転子は曲げ振動 2 次モードの時間的位相を 90 deg としたとき正転、-90 deg としたとき逆転する。Fig.6(b)のように、2 自由度の追従制御の場合でも、適切な比例ゲイン  $K_p$  とバイアス  $n$  を設定することによ

り、スレーブ側をマスタ側に追従させることができています。

Table 1 Experimental conditions (Operating parameter:  $\phi$ )

Freq [kHz]	$V_{lon}$ [V <sub>P-P</sub> ]	$V_{ben}^1$	$V_{ben}^2$ [V <sub>P-P</sub> ]	$\phi_{ben}^1$	$\phi_{ben}^2$ [deg]
39.11	25		50		$-90 \leq \phi \leq 90$

Table 2 Experimental conditions (Operating parameter:  $V$ )

Freq [kHz]	$V_{lon}$ [V <sub>P-P</sub> ]	$V_{ben}^1$	$V_{ben}^2$ [V <sub>P-P</sub> ]	$\phi_{ben}^1$	$\phi_{ben}^2$ [deg]
39.11	25		$0 \leq V \leq 60$		-90 or 90

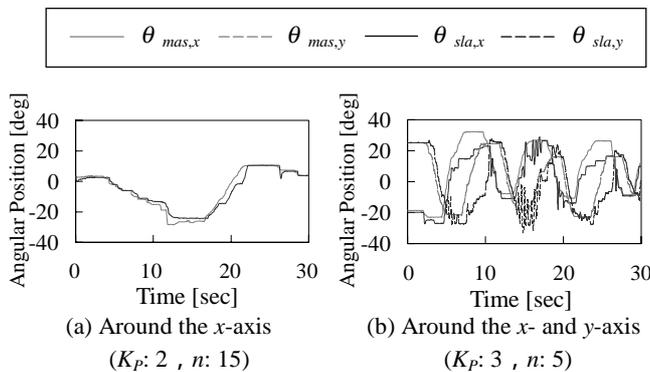


Fig.5 Results for master-slave control when the operating parameter is  $\phi$

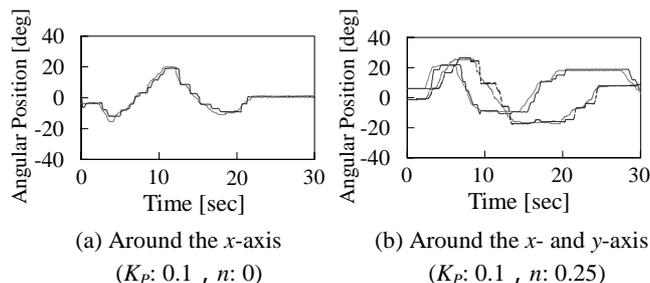


Fig.6 Results for master-slave control when the operating parameter is  $V$

これは、操作パラメータを位相とした場合と異なり、 $z$  軸まわりの回転力が発生しないためである。

#### 4. 結論

多自由度超音波モータを用いたマスタ・スレーブ型能動内視鏡の試作およびその制御実験を行った。マスタ・スレーブシステムを構築し、操作パラメータとして電圧  $V$  を用いることにより 2 自由度の追従制御を実現することができた。連結するアームを増やすことによって、より多自由度な運動が可能な能動内視鏡を開発できると考えられる。

#### 参考文献

- 生田幸士, 東川文博, 下谷和義: 多機能ハイパーエンドスコープの研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文集, 1A 2-5(1) 1A 2-5(5), (1998)
- 中村仁彦, 清水和利: 低侵襲外科手術用光駆動 SMA 能動鉗子, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.3, pp.439-448, (1999)
- 前野隆司, 竹村研治郎, 小島信行: 縦振動と横振動の縮退に基づく多自由度超音波モータの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.8, pp.1115-1122, (1998)