

多自由度超音波モータを用いた多自由度鉗子システムの開発

Development of Multi-DOF Forceps using Multi-DOF Ultrasonic Motor

朴 伸錫 (慶大) 正 竹村 研治郎 (慶大) 正 前野 隆司 (慶大)

Shinsuk Park, Dept. of Mech. Eng., Keio University, Yokohama, sspark@mech.keio.ac.jp
 Kenjiro Takemura, Dept. of Mech. Eng., Keio University, Yokohama, kenjiro@mmm-keio.net
 Takashi Maeno, Dept. of Mech. Eng., Keio University, Yokohama, maeno@mech.keio.ac.jp

Abstract: Multi-DOF surgical tools are required in Minimally Invasive Surgery, where dexterous motion of the tool is essential. In our previous study, we have developed a compact ultrasonic motor, which is capable of generating multi-DOF motion as human wrist. In this study, we propose a novel multi-DOF surgical tool by adopting the ultrasonic actuator. First, we develop a multi-DOF forceps with the ultrasonic motor and its control unit. Then, we propose master-slave control scheme for the system. The usability of the developed system is confirmed by experiments.

Keywords: Ultrasonic motor, Multi-DOF forceps, Surgical tool

1. 緒論

近年、患者への身体的・精神的負担が軽い低侵襲手術が注目を集めている。たとえば、直径 10 mm 以下の鉗子を用いた腹腔鏡下手術では、開腹を伴わずに胆嚢摘出などが可能となっている。一方、限られた視野や作業空間を有するこのような手術には熟練が不可欠であり、術者への負担は少なくない。このため、ロボット技術を利用した新たな手術支援ツールが盛んに開発され、実用化されている[1]。特に、術者の複雑な手指動作を再現する多自由度鉗子の研究は重要な課題の一つである。しかし、これまでの多自由度鉗子は、手指動作が完全には再現されていない上、装置全体が大型であり、簡便に用いられるツールとは成り得ていない。

本研究では、筆者らがこれまでに開発した多自由度超音波モータ[2]を用いて新たな多自由度鉗子システムを開発することを目的とする。

2. 多自由度超音波モータ

筆者らが開発した多自由度超音波モータ[2]を Fig. 1 に示す。本モータは直径 10 mm の円柱状の振動子と球状回転子から構成

成されている。振動子内に配置された積層圧電素子を用いて振動方向が直交する 2 つの曲げ振動と 1 つの縦振動を励振することにより、回転子を任意の回転軸回りに駆動することが可能である。駆動原理を Fig. 2 に示す。図中の座標系において上記曲げ振動および縦振動の振動方向を x, y , および z 方向とすると、これらのうち選択的に 2 つの振動を時間的位相差 $\pi/2$ で組み合わせることにより、各軸回りの回転が実現される。また、3 つの振動を適当な振幅および位相差を持って組み合わせれば、任意の軸回りの駆動が可能である[3]。すなわち、ヒトの手首部での運動自由度を 1 つのモータで発生することができる。本モータの最大出力トルクは約 7 mNm である。

3. 多自由度鉗子

2 章で述べた多自由度超音波モータを用いて多自由度鉗子のプロトタイプを開発した。Fig. 3 に開発した多自由度鉗子を示す。本鉗子は多自由度超音波モータ、グリップ、多自由度位置検出部、入力部から構成されている。術中、患者の腹部に設置されるトラカールを想定したピボットにおいて回転 3 自由度および並進 1 自由度のグローバルモーションが可能であり、加えて、オペレータの手首動作を入力部で検出し、多自由度超音波モータによってグリップの多自由度動作として再現することができる。Fig. 4 および Fig. 5 に多自由度位置検出部および入力部の構成を示す。なお、入力部として従来の手術用鉗子を拡張した Fig. 6 のような構成も可能である。この場合、ハンドル上部に設けたジョイスティックによってグリップの多自由度運動への指令を生成する。

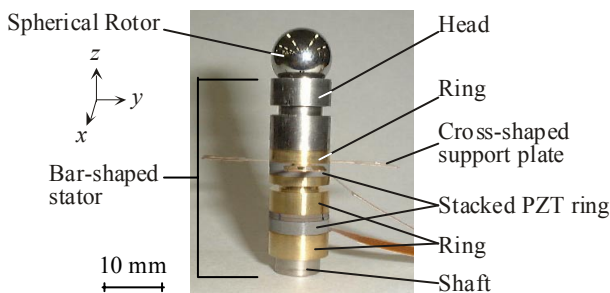


Fig.1 Multi-DOF ultrasonic motor

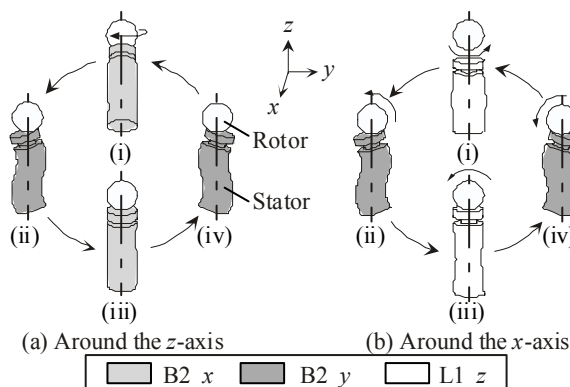


Fig.2 Driving principle

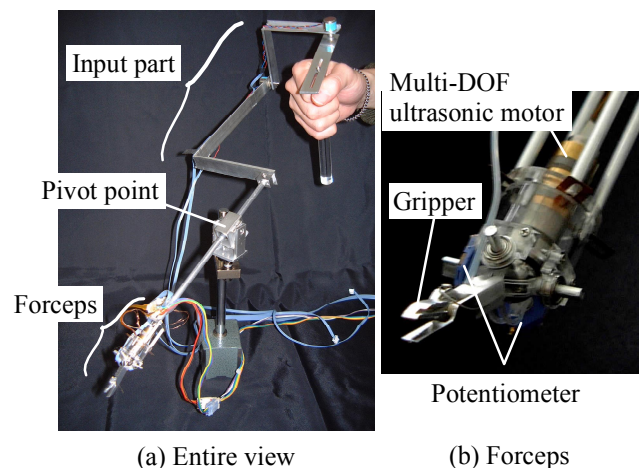


Fig.3 Multi-DOF forceps

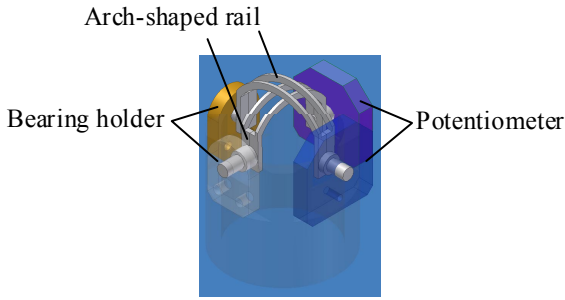


Fig.4 Multi-DOF position sensing part

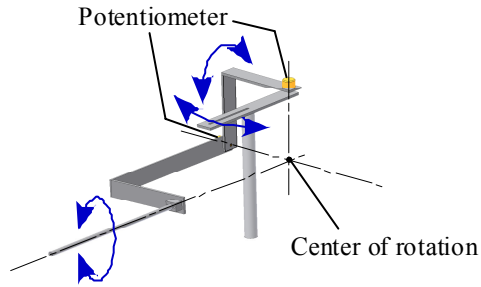


Fig.5 Construction of input part

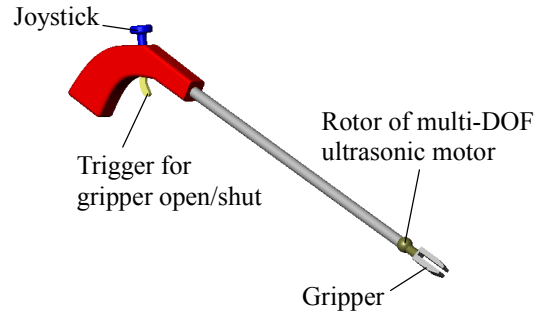


Fig.6 Multi-DOF forceps with joystick contro

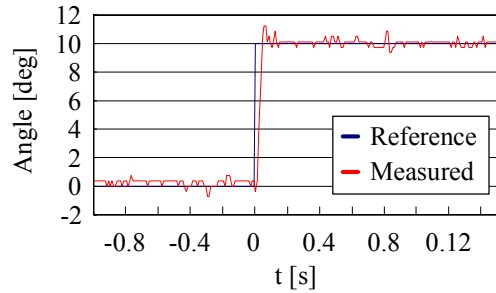


Fig.7 Step response

4. 制御法

Fig. 4 および Fig. 5 に示したように、本鉗子では3次元空間内のグリッパ先端位置およびオペレータ手首動作を検出できる。すなわち、図中 θ_x, θ_y およびその目標値 θ_x^d, θ_y^d を検出できる。多自由度超音波モータの駆動原理 (Fig. 2) を考慮すれば、これらのパラメータを用いて多自由度超音波モータの曲げ振動および縦振動を励振する交流信号の電圧振幅および位相を以下のように操作すれば、マスタ・スレーブシステムとしてグリッパ位置を制御することができる。ただし、各振動の振動数は約 40 kHz で共通である。

縦振動 (z 方向) のパラメータ

$$\text{電圧: } V_z = 20[\text{V}] = \text{const.} \quad (1)$$

$$\text{位相: } \phi_z = \pi/2 = \text{const.} \quad (2)$$

曲げ振動 (x 方向) のパラメータ

$$\text{電圧: } V_x = K_p \cdot |\theta_y - \theta_y^d| + \varepsilon \quad (3)$$

$$\text{位相: } \phi_x = \begin{cases} 0 & (\theta_y - \theta_y^d \geq 0) \\ \pi & (\theta_y - \theta_y^d \leq 0) \end{cases} \quad (4)$$

曲げ振動 (y 方向) のパラメータ

$$\text{電圧: } V_y = K_p \cdot |\theta_x - \theta_x^d| + \varepsilon \quad (5)$$

$$\text{位相: } \phi_y = \begin{cases} 0 & (\theta_x - \theta_x^d \geq 0) \\ \pi & (\theta_x - \theta_x^d \leq 0) \end{cases} \quad (6)$$

ただし、 K_p は比例ゲイン、 ε は超音波モータの不感帯を補正するためのバイアス電圧である。

5. 実験

3章で開発した多自由度鉗子に4章の制御法を適用し、駆動実験を行った。ただし、式(3)(4)における K_p および ε は1.0および0.1、制御周期は5msとした。

Fig. 7にy軸回り駆動に関するステップ応答の測定結果を示

す。初期角度および目標角度は0 deg および 10 deg である。測定結果より立ち上がり時間は約 30 ms であった。実験中、鉗子先端部の運動に高周波成分は確認されなかったことから Fig. 7 に見られる振動はポテンシオメータにおけるノイズであると考えられる。また、入力部および鉗子部をマスタ・スレーブシステムとしてオペレータがインパルス様の入力を入力部に加えた場合の角度履歴を計測した。角度の入出力波形に関する相互相関を解析したところ、両者に明確な差異は認められなかった。すなわち、オペレータによる操作程度の周波数であれば、本システム構成でも十分な応答性が得られていることが示された。

6. 結論

本研究では、多自由度超音波モータを用いた多自由度鉗子システムを開発した。また、制御系を構築し駆動実験によって、本システムの性能を明らかにした。今後は、具体的な作業の遂行を通じて本システムの有効性を明らかにすると共に、入力部構成の最適化が必要である。また、本鉗子ではグリッパの運動は2自由度のみ検出している。すなわち、グリッパの姿勢は考慮していない。しかし、新たなセンサの追加、あるいは3軸ジャイロスコープを利用し、筆者らが提案した多自由度超音波モータの制御法[3]を用いれば姿勢の制御も可能である。

参考文献

- [1] たとえば <http://www.intuitivesurgical.com/index.html>
- [2] K. Takemura and T. Maeno : Design and Control of an Ultrasonic Motor Capable of Generating Multi-DOF Motion, IEEE/ASME Trans. Mechatronics, Vol. 6, No. 4, pp. 499-506, 2001.
- [3] K. Takemura and T. Maeno : Method for Controlling Multi-DOF Ultrasonic Motor using Neural Network, J. Robotics and Mechatronics, Vol. 14, No. 2, 2003 [in preparation for publication].