

カセンシング機能を有する形成外科用微細手術支援ロボットの開発

Development of Micro-Surgery Assist Robot for Plastic Surgery
with Force Sensing Function

○ 小野光洋（東工大） 只野耕太郎（東工大）

Mitsuhiro ONO, Tokyo Institute of Technology
Kotaro TADANO, Tokyo Institute of Technology

Abstract: Recently, micro-surgery has been widely performed in plastic surgery. In order to assist surgeon's procedure and maneuverability in micro-surgery, we have developed a master-slave robotic system which has the high accuracy of positioning. However, it was unable to measure external forces. In this research, we develop a slave manipulator which is able to measure external forces. Here we present the design of a slave manipulator. In addition, an experiment has been carried out to test our developed manipulator and evaluated the result.

Key Words: Micro-Surgery, Force Sensing, Surgical Robot

1. 緒言

近年，形成外科分野においてマイクロサージャリが多く行われている。マイクロサージャリは術者が顕微鏡をのぞきながら，針が付いた糸を使用して血管や神経を吻合する手術である⁽¹⁾。微細血管や神経の吻合は，一般外科手術よりもさらに高度な技術力が必要とされ，マイクロサージャリでは 50 μm より小さい位置決め精度が必要とされている⁽²⁾。しかしながら，人間の生理的な震えは振幅が 50 μm 以上であり，精度が確保できないことや，手術部位によっては術者が手術を行うのに困難な体勢を強いられる，といった問題がある⁽³⁾。

そこで，著者らは身体全体を治療対象とした形成外科手術に適用できるように，身体と機構が干渉することなく，さらに 10 μm の位置決め精度を有するマスタスレーブ方式の手術支援ロボットを開発した⁽⁴⁾。マスタスレーブ方式を採用することで，手振れのフィルタリングや位置のスケールリングが可能のため，精密な動きを実現することができる。

しかし，先行研究にて開発したロボットは力覚提示機能を有していなかった。そこで本研究では，機構自体の重量や摩擦の影響を可能な限り小さくするため，ロボット手先に近い位置に 2 つの力覚センサを配置し，並進力とモーメント，把持力を計測することができるスレーブマニピュレータの把持部を開発した。また，実際にマニピュレータに加わる並進力を計測し，その評価を行った。

2. 開発したスレーブマニピュレータの把持部

スレーブマニピュレータ本体の概観と本研究で開発した把持部を Fig. 1 に示す。スレーブは並進部，姿勢部，把持部から構成され，並進 3 自由度，回転 3 自由度，把持部の開閉 1 自由度の計 7 自由度を有する。並進部は 3 つのモータによって駆動されるデルタ機構，姿勢部はジンバル機構で構成されている。また，ジンバル機構に平行リンク機構を組み合わせることで 3 方向の回転軸が 1 点で交わり，この点が姿勢部の回転における中心点（遠隔運動中心）となる。ロボットの手先が遠隔運動中心と一致するように設置することで手先の変位が並進部のみに依存するので，並進運動，回転運動，把持運動を独立して制御する機構となっている。

把持部はモータを駆動力としてウォームとホイールによって回転方向を変換し，手先を開閉させることができる構造

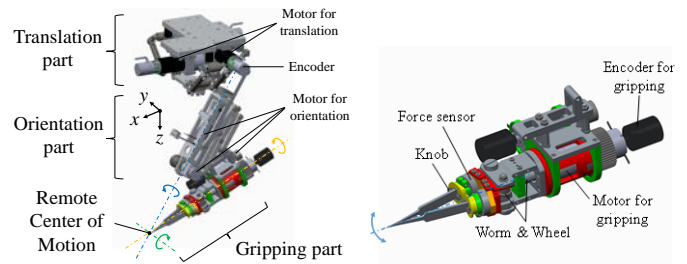
となっている。把持部には 3 軸力覚センサ（MX020-10N，ミネベア社）が 2 つ取り付けられており，先端に加わる力を計測することが可能である。Fig. 2 は把持部における座標系設定を示す。Fig. 2 において x_n, y_n, z_n ($n = 1, 2$) は図中で Tweezer1, 2 にあたる部分の先端の座標系， x_{sn}, y_{sn}, z_{sn} ($n = 1, 2$) は力覚センサの座標系と設定した。Tweezer1, 2 先端にかかる力 F_{tipn} ($n = 1, 2$) と力覚センサで計測する力 F_{sn} ($n = 1, 2$) の関係式は，

$$F_{tipn} = R_y(\theta) \cdot F_{sn} \quad [1]$$

と示せる。式[1]において $R_y(\theta)$ は y 軸周りに θ だけ回転する回転行列を示す。よって，並進力 F は，

$$F = R_z(-\pi/2) \cdot R_y(-\pi/2) \cdot F_{tip1} + R_z(\pi/2) \cdot R_y(-\pi/2) \cdot F_{tip2} \quad [2]$$

となる。Fig. 2 においてロボット手先周りのモーメントを M ， M の x, z 成分を M_x, M_z とすると，



(a) Overview (b) Gripping part
Fig. 1 Developed slave manipulator

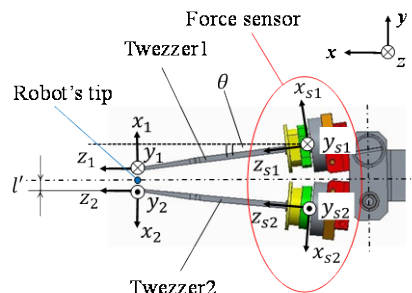


Fig. 2 Setting coordinate system

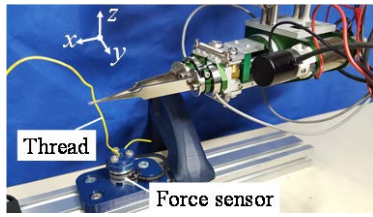


Fig. 3 Experiment image

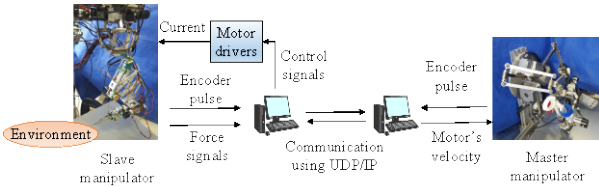


Fig. 4 Master-slave system

$$M_x = (F_{tip1y} + F_{tip2y}) \cdot l \quad [3]$$

$$M_z = (-F_{tip1z} + F_{tip2z}) \cdot l \quad [4]$$

となる。ただし、 y 成分は計測できないため、モーメントは x, z の 2 軸のみ計測が可能である。 $F_{tipn, x}, F_{tipn, y}, F_{tipn, z}$ はそれぞれ F_{tipn} の x, y, z 成分を表す。また、把持力を式 [4] に示す。

$$F_g = \frac{F_{tip1x} + F_{tip2x}}{2} \quad [5]$$

以上に示した式 [2]～[5] より、手先にかかる力は 2 つの 3 軸力覚センサによって並進力 3 軸、モーメント 2 軸、把持力を計測することが可能となっている。 Fig. 1 中に示す絶対座標において各軸周りの回転角度が 0 のときを基準姿勢とし、スレーブマニピュレータの姿勢が基準姿勢から変化した場合には、並進力およびモーメントは x, y, z 軸回りの回転行列によって絶対座標に即した方向の力に変換できる。

3. 実験

前章で示した力の計測法を実装し、並進力を測定できているか検証実験を行った。実験は Fig. 3 に示すような力覚センサ (ThinNANO1.2/1-A, ビー・エル・オートテック社) の上部に糸を取り付け、マスタスレーブシステムにて糸を把持、引張ることで前章の計測法によって計測した値と比較した。 Fig. 4 にマスタスレーブシステムの構成を示す。本システムは UDP/IP 通信によりマスタからスレーブへ信号を送信している。実験には本研究室で開発した 7 自由度マスタマニピュレータを使用した。マスタでは速度制御型のアドミタンス制御を行っている⁽⁴⁾。

Fig. 5 に実験結果を示す。 Fig. 5 は糸を引張る際に生じた x, y, z 軸方向の力を計測したものである。いずれの方向も、把持部および力覚センサで計測した値は似た波形を示しており、開発した把持部に外力が加わった際に計測できていることが確認できた。しかし、2 つの計測値に差があることも確認できる。この原因は、糸を取り付けたセンサと把持部に用いたセンサの感度に差があるためであると考えられる。また、スレーブマニピュレータと糸を取り付けたセンサの配置のずれも原因と考える。

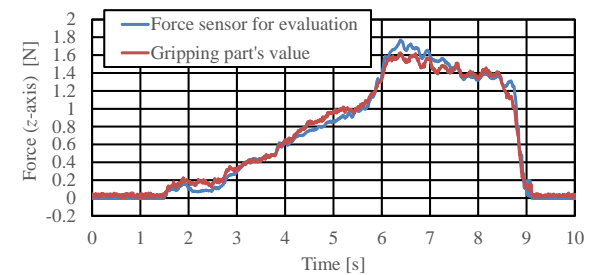
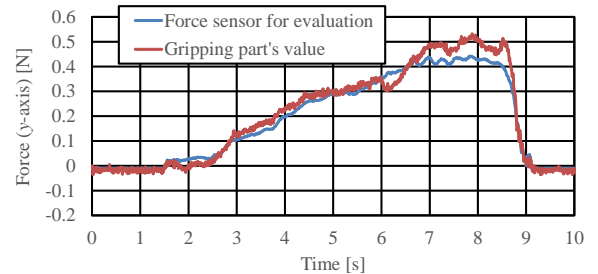
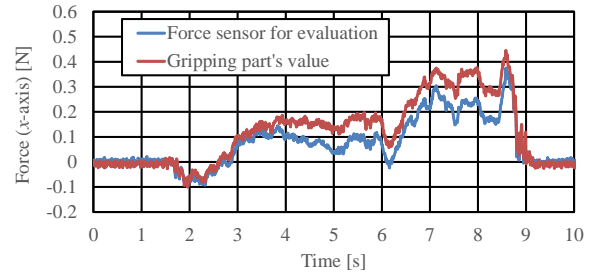


Fig. 5 Experimental results of measuring force

4. 結言

本論文では、本研究では力を計測できるスレーブマニピュレータを製作し、その機構を紹介した。また、マスタスレーブシステムにて検証実験を行い、結果、スレーブマニピュレータに外力を加えた際に、その力を計測できていることが確認できた。

今後は、力覚の有無による直感性の変化を定量的に評価していきたい。

参考文献

- (1) 波利井清紀(2013)「日本マイクロサージャリー学会40年の軌跡」(日本マイクロサージャリー学会40周年記念式典資料), http://jsrm.umin.jp/pdf/jsrm40_6.pdf.
- (2) Young Min Baek, Mamoru Mitsuishi, et al. Highly Precise Master-Slave Robot System for Super Micro Surgery. *Proceedings of the 2010 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, pp.740-745, 2010.
- (3) Cameron N. Riviere, Pradeep K. Khosla. Characteristics of Hand Motion of Eye Surgeons. *Proceedings - 19th International Conference - IEEE/EMBS*, pp. 1690-1693, 1997.
- (4) Kotaro Tadano, Kosuke Okubo, Koki Kudo. Development of Master-Slave Manipulator for Reconstructive Surgery. *Proceedings of the 2015 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, pp.1A1-C08(1)-(3), 2015.