前立腺肥大症手術用マスタスレーブシステムの開発

—マスタアームの開発—

Development of Master Slave System for TUR-P

-Development of Master Arm-

○学 市村亮 正 米田隆志 正 小山浩幸 正 山本紳一郎(芝浦工大)
長谷川洋機 (JA 下都賀総合病院)

Ryo ICHIMURA, Takashi KOMEDA, Hiroyuki KOYAMA,
Shinichiro YAMAMOTO, Shibaura Institute of Tech,
Youki HASEGAWA, JA Shimotsuga Polyclinic Hospital

Master-Slave for TUR-P (MSST) for minimally invasive surgery has been developed in order to relieve the burden of surgery for the surgeon and prevent the infection. In this system with five degrees of freedoms (DOFs), a user operates a master interface and receives feedback of slave via the interface while a slave robot mimics the master's maneuvers on the remote environment. Both of them are divided into two parts, arm and tool. The former has 3 DOFs to describe the motion of user's arm during the operation the latter has 2DOFs to describe the motion of endoscope. This system employs a bilateral control system by using some encoders and 2 force sensors. Therefore, this system can control position and force. In this paper, we proposed the new master arm and describe safe positional control in the arm systems.

Key Words master slave system, TUR-P, master arm, position control

1. はじめに

前立腺肥大症は、前立腺が肥大することで尿道が圧迫され、排尿障害を引き起こす疾患である。その治療法は、障害の程度により薬物療法と手術療法に大別される。手術療法の中で、患者にとって最も確実な術式として、切除鏡を尿道から挿入し、腺腫を切除する経尿道的な前立腺切除術(TUR-P:Transurethral Resection of the Prostate)が一般的に行われている。この術式は低侵襲であり、患者にとってはメリットが多いが、術者である医師にとっては、切除による患者の出血による感染症の危険や、長時間切除鏡を覗き込む無理な体勢による、肉体的な医師の負担が大きい。TUR-Pの概観を図1に示す。

本研究では術者の感染症防止、負担軽減のため、遠隔操作の一手法であるマスタスレーブシステムをTUR-Pに適用した前立腺肥大症手術用マスタスレーブシステム(MSST:Master Slave System for TUR-P)の開発を目的としており、本稿では術者の腕の動きを再現するマスタアームの開発及びアームシステムの位置制御について報告する。

Fig.1 TUR-P (Left: Overview, Right: Macrograph) [1][2]

Fig.2 Construction of MSST

2. システム構成

MSSTを図2に示す。MSSTは医師の腕の動作を再現するアームシステムと切除鏡の動作を再現するツールシステムの2つのマスタスレーブから構成され。前者は、上下・旋回・直動機構の3自由度を有し、後者は、直動機構、切除ループの回転の2自由度を有する。

制御方法は、力帰還型バイラテラル制御方式を用い、位置制御ではマスタアームの操作量をエンコーダで取得しスレーブアームを動作させ、力制御ではマスタ、スレーブに伝わる力を6軸力トルクセンサ、ロードセルで取得し、モータで力を再現する。

3. マスタアームの設計

図1で示したTUR-Pにおいて必要とされる術者の腕の動作を再現するために直動運動、上下、左右の旋回運動の3つの動作を行えるマスタアームを開発した。必要動作範囲は、前立腺腫の個人差を考慮して、直動運動範囲を60[mm]、左右方向、上下方向の旋回運動範囲をそれぞれ45[deg]、120[deg]とした。また、位置決め精度は1[mm]、1[deg]以下を目標とした。

以上の要求条件から製作したマスタアームの外観を図3に、特徴を以下に示す。

- ・サイズが小さく(163×186×330[mm])、操作性が高い
- ・直動部の機構に摩擦の少ないボールねじを使用
- ・エンコーダにより各動作の位置情報を取得
- ・術者による操作力を6軸力トルクセンサ(IFS-67M25A50-J40, ユニタ社)により計測し、モータによりマスタ側に呈示する

Fig.3 Overview of Master Arm

Fig.4 AWU Block Diagram

Fig.5 Input Voltage

Fig.6 The Difference between With and Without Anti-Windup

4. 位置制御手法の開発

4.1 目的

位置制御は、マスタとスレーブの位置情報の差分に対し PID 制御を行うことでスレーブを追従させる。スレーブをマスタの動きに高速に位置追従するためには、モータの最大許容電流を用いて最大トルクで加減速を行う必要がある。しかし、本システムは、モータの過電流による故障を防ぐためにモータの供給電圧を制限しているため、マスタの動作によっては、供給電圧が飽和し、ワインドアップ現象を引き起こす可能性がある。^[3]

そのため、操作量が飽和した時点でそれを超える方向の積分機能を停止する方法を用いたアンチワインドアップ制御(以下 AWU)を行い、シミュレーションを用いて有効性を確認した。AWU のブロック線図を図 4 に示す。

4.2 シミュレーション

モデルとして、他の動作と比べて負荷が大きく、高ゲインを必要とするスレーブ上下旋回部とし、数値計算ソフトである MATLAB を使用して、シミュレーションを行った。

入力電圧、AWU の有無による違いを図 5、図 6 に示す。図 5 のように故意に飽和電圧 10[V] を超えた入力電圧(15[V]) をスレーブに与えた。図 6 より、電圧を加えている際は、AWU の有無に関わらず変位量は等しい。しかし、入力電圧を 0[V] にした時、対策なしでは、過大な積分値が蓄積され、積分値が 0 になっていないため、出力が増え、大幅な遅れが生じ、制御不能となっていることがわかる。

一方対策後は、入力電圧が飽和しない時、正常に PID 制御が行われるが、入力電圧が飽和している場合には、積分動作を切られ、スレーブの暴走を防ぐことができ、入力に対して遅れはなく、指令通りに動作している。

(a) Translatory Motion

(b) Right-left Motion

(c) Up-down Motion

Fig.7 Results of Position Tracking Control

5. マスタスレーブアーム間の位置追従実験

5.1 実験目的及び方法

AWU を用いた制御の有効性を実機で確認するため、マスタスレーブ間の位置追従における誤差が、TUR-P の最大許容誤差 1[mm], 1[deg] 以内に収まるか実験を行った。

方法として、PID 制御によりマスタアームを任意に動かした際のスレーブの追従性を評価した。

5.2 実験結果及び考察

位置追従実験の結果を図 7 に示す。全ての自由度において、平均 50[msec] の遅れで、スレーブが追従することが可能であった。また、TUR-P 中の切除鏡操作の平均速度が 10[mm/sec]^[2] に対して、平均速度が 53.2[mm/sec] で行った直動動作におけるマスタスレーブ間の最大誤差が 0.90[mm] であり目標精度の 1[mm] 以内に収まった。左右旋回動作も最大誤差が 0.64[deg] であり、1[deg] を以下となった。

同様に上下回転動作においても最大誤差が 0.88[deg] で目標精度を満たした。

以上より、構築したアームシステムにおける制御方法の有効性が確認された。

6. まとめ

本研究では、マスタアームの設計、位置制御システムの構築を行い、スレーブと統合することでマスタスレーブシステムを完成させた。そして、安全面を考慮した位置制御により、実際の手術に要求されている条件を満たしたことでマスタアームの有効性を確認した。

今後は、力帰還バイラテラル制御方法を確立する。

文 献

- [1]Kostas, "Design and Implementation of a Haptic Device for Training in Urological Operations" IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION, VOL.19, OCTOBER 2003
- [2]藤田, TUR-P の手技, 中外医学社, 1986
- [3]Hwi-Beom Shin, "New Antiwindup PI Controller for Variable-Speed Motor Drives", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL.45, NO.3, JUNE 1998