腹腔鏡下外科手術における術具操作逆運動問題の一提案 (立ち姿勢形の中間システム)

A Proposal for the Reverse Motion Problem on Laparoscopic Surgical Operation (Middle system by standing pose)

学 藤原 正寛 (岩手大院) ○学 佐藤 光平 (岩手大院) 佐藤 貴俊 (岩手大)
正 島地 重幸 (岩手大工) 正 萩原 義裕 (岩手大工) 正 橋元 皓 (岩手大工)
正 箱崎 義英 (岩手大工)

Masahiro FUJIWARA, Kouhei SATO, TAKATOSI SATO, Graduate school of Iwate University Takatoshi SATO, Iwate University Shigeyuki SHIMACHI, Yoshihiro HAGIHARA, Akira HASHIMOTO, Yoshihide HAKOZAKI, Faculty of Engineering Iwate University

In laparoscopic surgical operation, the each ends of the forceps moves reversely to each other. The reverse motion might be a factor which makes surgeon miss-operate and causes the operation delay. This paper proposes a new device which cancels the reverse motion with pantograph mechanism on standing pose of surgeon. Authors evaluate the device by the required time for elemental surgical operations. A facility on manipulability of the instrument is searched on relation between hand motion and forceps motion in monitor. It is cleared that required time is reduced about 20% for knot working as an elemental surgical operation on the condition in which hand motion agrees with the forceps motion in monitor.

Key Words: Laparoscopic, Forceps

1. 緒言

近年、急速に普及している外科手法が腹腔鏡下外科手術である。それは小さな穴を通して術具を挿入し、腹腔内で処置を行う手法である。患者にとって身体的、経済的に負担が掛からない手法だが、術者には熟練を要する手法でもある。

熟練を要するのは腹腔鏡下外科手術の専用の術具、内視鏡での映像や術具の操作に問題が生じるためである。

本論文では腹腔鏡下外科手術の問題の一つである逆運動操作を解消するシステムを開発し、外科支援装置として基本的な手術動作を検証し、いくつかの操作条件のなかで作業時間に与える影響の実験を行い、その結果を述べていく。

2. 逆運動操作を解消するシステム

2.1 逆運動操作問題

逆運動操作問題とは患者の体内側と体外側で術具操作の運動が逆方向になる問題である。腹部の穴が点対称な点として作用するため挿入方向に対しては生じない。これは手術を困難にさせる一因と考えられる。逆運動操作問題を解消するには、腹部の穴に対して事前に点対称を起こす機構を用いて点対称な運動にする必要がある。

2.2 システム概要

本論文で開発するシステムは点対称を起こす機構部と装置そのものを移動させるリンク部、操作(マスター部)と作動(スレーブ部)の各装置によって構成した(図1参照)。点対称を起こす機構はパンタグラフを使用する。支点を境にXの動作はX'の動作へ、Yの動作はY'になる。またパンタグラフの支点を支えるリンクで挿入方向Zへ平行移動する(図2参照)。

マスター部では鉗子の自由度に応じて、把持や鉗子全体の回転、多自由度鉗子による折れ曲げ・先端部の回転といった操作を可能にした。把持はてこの原理を用いて力を伝達し、鉗子全体の回転はワイヤ駆動で回転を伝える。把持は把持リンクを回転することで、歯車1・2に力が伝わり、シャフトを押し込みてこへ伝わる(図3参照)。回転は土台を回転することでプーリーと一緒に回転しワイヤ駆動する。多自由度鉗子の折れ曲げ・先端部の回転は把持リンクの一部に固定するポテンショメータと歯車4の同軸上にポテンショメータで読み取る。先端部の回転は直接回転させ、折れ曲げは把持リンクを曲げることで、歯車3と歯車4が遊星歯車のように回転し、把持リンクが傾くことで曲げを検出する(図4参照)。

スレーブ部は鉗子をはめ込み、マスター部からの操作を鉗子に伝える。把持力はこによって伝達され、把持部を上方へ引くことで把持する(図5参照)。またワイヤ駆動で伝わる力はスレーブ部全体を回転することで鉗子も回転させる。多自由度鉗子の場合は、先端部回転と折れ曲げのモータとポテンショメータでマスター部のポテンショメータの電圧値を読み、電圧値を一致させるフィードバックを行う。

把持力を伝えるのにてこを用いるが、図6のように配置する。パンタグラフの関節部分にてこの作用点と力点を重なるように配置し、円弧運動に対しては十分な長さにすることで直線に近似した動きとした。また関節部分に球状のスペーサーを挟むことで運動の妨げにならないようにした。

ワイヤ駆動するためにプーリーをパンタグラフの回転軸上に配置した(図7参照)。また、マスター部の回転軸のプーリーの直径とスレーブ部の回転軸のプーリーの直径を2:1とした。

Fig. 1 Machine device with pantograph mechanism

Fig. 2 pantograph mechanism and parallel linkage

3. システムの仕様

システムの可動域はパンタグラフの開閉と回転、術具方向への移動で定まる。パンタグラフの開閉は支点の角度が $12.5 \sim 165$ 度変化することで、約 280 mm 可動可能である。さらに支点を中心に回転が可能。パンタグラフの可動と鉗子の可動は鉗子が腹部に挿入した長さに関係し、鉗子が 150 mm 腹腔内挿入した場合、鉗子の可動域は腹部の穴に対し、頂角 50 度の円錐上を可動可能である。またベッド取り付け部はカメラの固定で使用する球面ジョイントで、向きを可変できる(図 8 参照)。腹腔鏡下外科手術では 95 パーセントが頂角 60 度の円錐上[1]で手術を行っているので、十分とはいえないが、このシステムは術具方向を任意に変更可能なので可動範囲の不足分は補える。

鉗子は引っ張り力で引くことで先端が開閉し把持する仕組みになっている。システムの把持力ははこの長さをパンタグラフの支点から対称にし、マスター部の剪む力と把持に必要な張力を 1:1 にしてある。システムの把持力は最大 12.2 N である。また多自由度鉗子の制御は PIC16F877 を使用し、ポテンシオメータとモータでフィードバック制御を行う。

Fig. 3 Master part right side view

Fig. 4 Master part left side view

Fig. 5 Slave structure

Fig. 6 Arrangement of lever

鉗子先端の回転は通信遅れ 0.01 秒で 45 度までは 0.15 秒で回転する。一方、折れ曲げは 0.1 秒の通信遅れが生じ、4.3 秒で 70 度まで曲げることが可能である。

4. 予備実験

4.1 座標系の定義

腹腔鏡下外科手術の場合、術者はテレビモニタ内の映像を見ながら、鉗子を操作して手術する。ここで術者の操作座標系を操作座標 (X_0, Y_0, Z_0)、鉗子で作業する座標系を作業座標 (X_1, Y_1, Z_1)、内視鏡によって映し出されるテレビモニタ内の座標系を視座標 (X_2, Y_2, Z_2) と定義する (図 9 参照)。術者はそれぞれ異なる座標系において、通常の開腹手術以上に高度な技術や熟練を要すると考えられる。

4.2 システム環境の定義

システムを使用しやすい環境を実際に操作して検証した。予備実験の結果、ベッドに対してシステムを取り付けると十分な作業空間が得られた。操作性を考慮して、胸よりやや下の高さにシステムのマスター部がくるようにした。実験で使用する鉗子の挿入角度は作業平面に対し 60 度前後、ベッドに平行な面に対し 45 度とする。

5. 実験

5.1 実験器具

実験を始めるにあたって、実験で使用する装置や道具を述べる。まず開発したシステム、システムに使用する鉗子 (市販鉗子にアタッチメントを取り付けたもの) (図 10 参照)、市販鉗子 (先端部変更)、トロカールモデル、カメラ、テレビモニタ、医療用針 (図 11 参照)、医療用糸、ベッドモデルを使用する。今回、多自由度鉗子は使用しない。

Fig. 7 Arrangement of pulley

Fig. 8 Bed installation part

Fig. 9 Coordinate system on Laparoscopic Surgery

5.2 実験方法

手術の基本動作である縫う・結ぶという動作を手術条件でどのような変化を生じるか実験を行う。被験者は5または6人の初心者とする。使用針はKEISEIのDS402ナミでシステムと普通鉗子の使用での比較を行う。手術条件は通常条件、作業軸条件、立体視条件の3つで行う。

通常条件は実際に使用されている形式で、術者に対してテレビモニタが正面に配置した条件となる(図12, 13参照)。正面にあるため操作座標と視座標が一致していない。

作業軸条件は逆運動操作の操作性が向上した操作座標と視座標を一致した座標系を持つ(図14, 15参照)[2]。これにはテレビモニタを足元に配置することで成立する。

立体視条件は物体を立体的に捉える条件である。これは2つのカメラで物体を撮ることで、それぞれの映像を得ることができる。さらにその映像を片目ずつ見ることによって立体視ができるのである(図16参照)。

(縫う作業)

対称物(スポンジ)は幅6mmと2mmのマーキングをつける(図17参照)。マーキングされた対象物を縦・横・斜めに順に固定し、あらかじめ針を持ってもらい一方ごとに対象物に針を刺し、抜き取るまでの時間を計測する(図18参照)。針を落とすまたは針の持ち方に問題が生じた場合、計測をリセットして再度行う。逆運動操作の実験なので、操作開始地点はテレビモニタ左上地点からしてもらう。またピンセットで対象物を押さえて縫う補助を行う。

(結紮作業)

結ぶという動作が逆運動操作に最も影響を受ける作業と考え、縫合における結びに要する時間を計測する。結び方は図19の縫合手順の2の状態から始める。対象物はマーキングのないスポンジとする。これも針を落とすまたは針の持ち方に問題が生じた場合、計測をリセットして再度行う。ピンセットでの補助動作は対象物を押さえるまたは糸を引くだけとする。実験回数は一人三回ずつ行う。

Fig.10 Forceps

Fig.11 acus and string

Fig.12 General coordinates and Machine device

(縫合作業)

針を右から左に刺し、結ぶ動作を図19の手順に従い、要した時間を計測する。結び作業同様一人三回ずつ行う。

通常条件と作業軸条件では縫う作業、結紮作業、縫合作業を行い、立体視条件では結紮作業、縫合作業のみの実験とする。

Fig.13 General coordinates and forceps

Fig.14 Coincidence coordinates and Machine device

Fig.15 Coincidence coordinates and forceps

Fig.16 Binocular vision

5.3 実験結果・考察

実験結果は表1, 2に示す。結果は被験者の平均作業時間である。縫う作業を条件別で比較すると、6mm幅平均作業時間と2mm幅平均作業時間では両方ともシステムの使用する場合の通常条件が最も作業時間が早い結果となった。しかし6mm幅と2mm幅での標準偏差を比較するとシステムの使用する場合の作業軸条件が最も小さい結果となった。標準偏差が小さいので被験者の作業時間のばらつきが小さく、システムの使用に適した条件であったと考えられる。また平均作業時間が結果に結びつかなかった原因は、操作座標と視座標を一致させるため、テレビモニタを足元に置いたことで、マスター部とテレビモニタが重なってしまい見えにくい状況が生じ、結果に影響したと考えられる。結紮作業は条件別で比較すると同じ条件であればシステムを使用した場合の方が平均作業時間を短縮させた。これは糸を巻きつける動作が逆運動操作で難しいために、システムの使用することで容易にできたといえる。システムを使用した場合では、立体視条件、作業軸条件、通常条件の順に早い結果となった。標準偏差を見ると、結紮作業は立体視条件が適した条件と思われる。これは針と糸、そしてピンセットの位置関係を確認ができるため、迷わずに作業ができたためと考える。

Fig.17 Object

Fig.18 Direction for suture

Fig.19 Legations process

そして縫合作業は結紮作業同様、同じ条件ではシステムを使用した方が平均作業時間を短縮する結果となった。これは縫う作業での時間よりも結紮作業の時間が大きく影響したためと考えられる。つまり標準偏差もその影響から立体視が小さくなったといえる。

以上のことより、システムの使用で普通鉗子よりも作業時間は短縮可能で操作の間違いが生じなくなった。さらに、縫う作業と結紮作業の最適な条件を見つけると、操作座標と視座標が一致した立体視を行えば、システムの使用で作業時間の短縮が可能である。

6. 結言

本研究では腹腔鏡下外科手術において、逆運動操作問題を解消するシステムを開発した。システムを使用することで、操作座標と作業座標が一致し、逆運動操作問題を解消できた。またシステムの使用では鉗子の十分な作業空間が確認でき、把持力も先端で最大12.2Nという結果が得られ、針や糸を把持するのに十分であった。

7. 参考文献

- [1] Mitchell J.H. Lum1, Denny Trimble2, Jacob Rosen1, Kenneth Fodero III, H. Hawkeye King1, Ganesh Sankaranarayanan1, Jesse Doshier1, Rainer Leuschkel1, Brandon Martin-Anderson1, Mika N. Sinanan3, Blake Hannaford1 Multidisciplinary Approach for Developing a New Minimally Invasive Surgical Robotic System BioRob 2006- The first IEEE / RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics Pisa, Tuscany, Italy, February 20-22, 2006
- [2] 藤原正寛 岩手大学修士論文 腹腔鏡下外科手術における術具逆運動問題の一提案 2007

Table.1 Experimental result of suture

方向性	マーキング幅	普通鉗子		システム	
		通常条件[sec]	作業軸条件[sec]	通常条件[sec]	作業軸条件[sec]
←	6mm	28.51	18.24	13.54	22.58
	2mm	19.22	16.84	11.76	24.18
→	6mm	21.28	23.66	15.73	20.69
	2mm	25.56	27.68	14.47	26.61
↑	6mm	21.08	19.47	26.09	16.45
	2mm	23.39	19.32	18.17	18.20
↓	6mm	20.05	19.92	13.63	15.48
	2mm	19.78	17.31	23.82	22.11
↗	6mm	14.50	20.52	14.17	17.20
	2mm	21.84	17.42	18.30	21.83
↖	6mm	25.93	19.15	13.55	20.45
	2mm	28.37	24.98	18.56	21.61
↘	6mm	17.67	12.79	11.06	14.41
	2mm	22.07	18.25	23.81	23.24
↙	6mm	26.07	22.20	14.31	18.51
	2mm	15.35	17.58	18.58	16.27
6mm	平均	21.89	19.49	15.26	18.22
	標準偏差	4.70	3.22	4.56	2.84
2mm	平均	21.95	19.92	18.43	21.78
	標準偏差	4.00	4.09	4.11	3.31

Table.2 Experimental result of knot working

結紮	普通鉗子			システム		
	通常条件[sec]	作業軸条件[sec]	立体視条件[sec]	通常条件[sec]	作業軸条件[sec]	立体視条件[sec]
平均	21.73	12.19	10.76	14.46	9.81	6.89
	標準偏差	4.32	3.12	5.95	3.59	1.40
	標準偏差	3.12	4.75	5.95	3.59	1.40
縫合	普通鉗子			システム		
	通常条件[sec]	作業軸条件[sec]	立体視条件[sec]	通常条件[sec]	作業軸条件[sec]	立体視条件[sec]
平均	63.80	45.05	45.18	45.83	40.78	38.98
	標準偏差	32.29	15.93	15.94	6.69	10.02
	標準偏差	32.29	15.93	15.94	6.69	10.02