剥離操作における腹腔鏡手術用鉗子先端の作用力計測

吉田 健志^{1)*}, 木下 秀文¹⁾, 黒田 嘉宏²⁾, 大城 理²⁾, 松田 公志¹⁾

¹⁾ 関西医科大学大学院医学研究科医科学専攻生体応答系泌尿器科学

²⁾ 大阪大学大学院基礎工学研究科

Force Measurement of Laparoscopic Instrument Tip during Dissection Procedure

Kenji Yoshida^{1)*}, Hidefumi Kinoshita¹⁾, Yoshihiro Kuroda²⁾
Osamu Oshiro²⁾, Tadashi Matsuda¹⁾

¹⁾ Department of Urology, Graduate School of Medicine, Kansai Medical University

²⁾ Graduate School of Engineering Science, Osaka University

Received 22 March, 2014 / Accepted 14 May, 2014

Abstract:

When comparing a single stroke dissection maneuver among surgeons with differing experience levels, there are major differences in the force applied to the instrument tip. However, it is difficult for expert surgeons to explain to novice surgeons in training the appropriate force during dissection procedure. We developed the force measurement system which can quantify the force pattern during single-stroke laparoscopic dissection maneuvers to reveal the factors related to expertise. Expert surgeons apply the most efficient vertical forces to make an initial dissection point and then change to the horizontal direction to separate surrounding tissues from the target organ. Measuring instrument tip force could help in understanding and improving the safety margin in laparoscopic surgical dissection.

Key words: laparoscopic surgery, Skill analysis, Force measurement

要旨:

手術操作のうち臓器から臓器を剥がす剥離操作を行う際、腹腔鏡手術においては鉗子先端に加わる作用力を推測することが容易でないことから、剥離技能を言葉で初心者に伝達することが困難である。今回我々は、腹腔鏡手術における剥離操作の際の作用力（垂直力、水平力）を計測することが可能なシステムを作成し、レベルの異なる術者が剥離操作を行う際、操作中に鉗子先端にどのような力を加え剥離操作を行うのかという技能分析を行った。今回の検討から、熟練者は始めに弱い水平力とともに垂直力を加えた後、垂直力を減らしながら水平力を増加させており、鉗子の先端が剥離開始点より奥に進まないように効率よく力を加えていることが推察された。一方で初心者は、剥離開始から終了までに、水平力と垂直力を同時に強めながら加えていることから、鉗子の先端が奥へ進みすぎてしまう形で力を加えていることが推察された。剥離作用力の定量化は、剥離技術の原理を理解する手段の一つとして有用であると考えられた。

キーワード: 腹腔鏡手術, 技術評価, 鉗子作用力

1. はじめに

近年、安全な手術の普及を目的とし、手術技能の分析や伝達に関心が寄せられている。しかしながら手術技能は定量化することが困難であるものが多いため、技能分析を行うことは容易ではない。手術における基本操作の技能分析に関しては、手の甲にセンサを取り付け、手の移動距離やタスク処理時間を調べる ICSAD (the Imperial College Surgical Assessment Device)^{1,2)} や、手術鉗子の先端の軌跡を明らかにする TrEndo (Training in Endoscopy)³⁾ や HUESAD (Hiroshima University Endoscopic Surgical Assessment Device)⁴⁾ と呼ばれるシステムなどが開発されている。現在までに、熟練者と初心者の技能が分析され、熟練者と初心者の技能差が明らかにされているが、報告されている技能分析は、鉗子の移動距離や両手の協調運動率、タスクの処理時間などの手術操作の中の基本的な操作⁵⁾ や、縫合操作に関するもの⁶⁾ が多い。現在までに、鉗子先端に力を加え臓器から臓器を剥がす操作である剥離操作における技術分析は行われていない。

今回我々は、操作中の鉗子先端に加わる力を計測することが可能なシステムを作成し、異なる技術レベルの医師における剥離技能の技術分析を目標とし、操作中に術者が加える力の方向について検討を行った。

2. 作用力計測システムの作成

剥離操作を行う場合、鉗子先端における力は鉗子の

長軸方向である垂直力と鉗子長軸方向に対して垂直方向である水平力の2方向に大きく分けられ、はじめに垂直方向に力を加えた後に、水平方向に力を加え剥離を行う。熟練者と初心者の操作では、垂直力を加えた後に水平力を加えるまでの時間や、剥離操作中に加える力の垂直力と水平力の割合の推移が異なると予想されるため、今回は垂直力、水平力の2方向の力を計測することが可能なシステムを作成して作用力を計測した。

全長約300mmの先端へら型内視鏡用鉗子を先端から約6cmの部位で切断し、両断端の間に、ひずみ式3軸力覚センサを装着することで、鉗子先端に作用する力の計測が可能な鉗子を作成した。計測される力の方向は、鉗子長軸方向である垂直力、鉗子長軸に対し垂直方向である水平力の2方向とした (Fig. 1)。

3. システムを用いた作用力計測実験

本研究では、上記システムを用い作用力計測実験を行った。死体豚から摘出した腎動静脈付きの腎臓を各術者に対し一つ用意した。標本の選択条件は、腎臓、腎動脈、腹部大動脈の腎動脈起始部と同部位を含む腹部大動脈の壁が含まれることとし、剥離操作中に腎臓と腎動脈の位置が変化しないよう注射針を用いて、腎動脈起始部付近の大動脈壁および、腎周囲の脂肪をゴム板に固定した。固定した臓器は、医師が鉗子操作をトレーニングするために日常的に使用する練習用具であるボックストレーナー内に配置した (Fig. 2)。ボッ

Fig. 1. 作成鉗子

Fig. 2. システム全体像

クストレーナー内の様子は内視鏡カメラを通じてノート型パソコンのモニタに映しだされ、術者はモニタを見ながら手術鉗子を用い剥離操作を行った。

計測対象は腎動脈から周囲脂肪組織を剥離する操作であり、利き腕における鉗子先端作用力の計測を行い、力の方向の検討を行った。なお、利き腕と対側には、センサのない同型の鉗子を持ち操作を行った。臓器に触れた時点を剥離操作の開始とし、鉗子が臓器から離れた時点を剥離操作終了とした。また剥離開始から剥離終了までを1回の剥離操作とし、実験では術者に剥離操作を10回行うよう指示した。剥離操作が連続して行われていた場合や臓器から鉗子が外れ操作が途中で終了した場合は、計測対象から除外した。

被験者は腹腔鏡手術熟練者5名（腹腔鏡手術執刀数、80–750例；中央値150例）、初心者5名（2–5例；中央値3例）とした。鉗子先端が臓器に触れてから離れるまでの1回の剥離操作をワンストロークとし同操作を10回ずつ行った。評価項目は、ワンストロークに要した時間（T）、垂直力及び水平力がそれぞれピークを迎えるタイミング（ワンストロークの剥離時間を100%とし垂直力、水平力がピークとなるまでの時間を%表示）とした。また、全剥離操作における垂直力・水平力の経時的推移の評価を行った。

4. 結 果

ワンストロークの剥離時間の平均値に関しては、熟練者が 2.6 ± 0.6 秒で、初心者の 3.1 ± 0.8 秒より有意に

短い時間で剥離を行っている結果となった（Mann-Whitney U test: $p=0.0009$ ）（Fig. 3）。また、剥離作用力の垂直力の最大値の平均は、熟練者で 1.2 ± 0.9 Nで、初心者で 1.5 ± 0.5 Nであり（Mann-Whitney U test: $p=0.0026$ ）、水平力の最大値の平均は、熟練者で 2.6 ± 1.5 N、初心者で 3.0 ± 1.3 Nであった（Mann-Whitney U test: $p=0.0193$ ）。ピークのタイミングに関しては、水平力は熟練者（ $72.2 \pm 4.2\%$ ）と初心者（ $70.3 \pm 4.0\%$ ）では大きく差は認めなかったが、垂直力は、熟練者（ $36.6 \pm 5.6\%$ ）が初心者（ $65.0 \pm 10.5\%$ ）より有意に早くピークを迎える結果となった（Mann-Whitney U test: $p<0.0001$ ）（Fig. 4）。

さらに、垂直力・水平力の経時的推移として、横軸をワンストロークの剥離時間とし、縦軸を垂直力・水平力の作用力の大きさとしてグラフ表示を行ったところ（Fig. 5）、熟練者は初心者に比べ、垂直力が早いタ

Fig. 3. 剥離時間

Fig. 4. 作用力のピークのタイミング

イメージでピークとなるよう作用力を加える傾向があると考えられた。

5. まとめと今後の課題

一般的に剥離を行う際、他の臓器や血管が剥離部位より奥に隠れて存在する可能性がある。そのため術者は、鉗子先端を直視で確認できない部位へ進め過ぎないように注意を払う必要がある。今回の結果では熟練者は、剥離開始後に垂直力を加えた後に、緩める時間を比較的短くしながら、水平力を加えていた。このことから、鉗子先端が剥離を行っている部位より奥へと進み過ぎないように動かし、臓器損傷を避けるための安全な操作を行っていると考えられた。一方で初心者は、剥離開始から終了までに、垂直力と水平力を剥離

後半にピークを迎えるように加えているという結果となった。このことから、鉗子が剥離部位より奥へと進み、先端が確認できなくなるよう操作を行い、隠れた臓器や血管を損傷する可能性があると考えられた。以上の作用力測定結果から、初心者の剥離技術を熟練者の剥離技術に近づけるには、垂直力と水平力のピークの間隔をあけ、垂直力を加え緩める時間をできる限り短時間とし、垂直力が緩み始めたところに、水平力を加え始めその後にピークとするように指導する必要があると考えられる。鉗子の動きとしては、垂直方向の力を加えた後、水平方向に力を推移させる際に、剥離を行っている部位より鉗子が奥へ進みすぎないように指導することが必要であると考えられた。

本システムの利用により、異なる技術レベルの術者が加えている作用力を理解することが可能であったが、本稿のデータは被験者数が少なく preliminary なものであるため、我々は熟練者、習熟者、初心者、各10名の作用力の違いに関して比較検討を行い、技術レベルの向上とともに垂直力がピークを迎えるタイミングが、より速くなる傾向にあることを報告している⁷⁾。

将来的には、本システムをトレーニングシステムや指導ツールとして使用すれば、力の方向という情報をもとに助言を行う新しい指導方法が可能となり、手術技術の習得の補助を行うことが期待できると考えられる。また現在普及が進んでいる robotic surgery においても作用力計測アームの開発が進めば、本研究で用いた作用力のパラメータをもとに安全な作用力の検討が行われると考えられる。

Fig. 5. 垂直力・水平力の推移

本文は、学位論文を基に、第13回関西医科大学医学学会賞に応募講演（2014年2月14日）し、優秀賞を受賞した際の発表要旨でもある。

文 献

1. Moorthy K, Munz Y, Sarker SK and Darzi A. Objective assessment of technical skills in surgery. *Brit Med J* 327: 1032–1037, 2003.
2. Datta V, Mackay S, Mandalia M and Darzi A. The use of electromagnetic motion tracking analysis to objectively measure open surgical skill in the laboratory-based model. *J Am Coll Surg* 193: 479–485, 2001.
3. Chmarra M, Jansen F, Grimbergen C and Dankelman J. Retracting and seeking Movements during laparoscopic goal-oriented movements. Is the shortest path length optimal? *Surg Endosc* 22: 943–949, 2008.
4. Egi H, Okajima M, Yoshimitsu M, Ikeda S, Miyata Y, Masugami H, Kawahara T, Kurita Y, Kaneko M and Asahara T. Objective assessment of endoscopic surgical skills by analyzing direction-dependent dexterity using the Hiroshima university endoscopic surgical assessment device (HUESAD). *Surg Today* 38: 705–710, 2008.
5. Moorthy K, Munz Y, Dosis A, Bello F, Chang A and Darzi A. Bimodal assessment of laparoscopic suturing skills. Construct and concurrent validity. *Surg Endosc* 18: 1608–1612, 2004.
6. Nageotte F, Zanne P, Mathelin M and Doignon C. A circular needle path planning method for suturing in laparoscopic surgery. <<http://eavr.u-strasbg.fr/~christophe/publications/icraNZMD.pdf#search='A circular needle path planning method for'>> [accessed July 17, 2009].
7. Yoshida K, Kinoshita H, Kuroda Y, Oshiro O and Matsuda T. Analysis of laparoscopic dissection skill by instrument tip force measurement. *Surg Endosc* 27: 2193–200, 2013.