

パッシブポジショナと小型能動機構からなる 外科手術ロボットシステム

村井 昭彦 (東大) 岡田 昌史 (東大) 中村 仁彦 (東大)

Surgery Robot System consists of Passive Positioner and Small Active Mechanism

*Akihiko MURAI, Masafumi OKADA and Yoshihiko NAKAMURA

Abstract— During the use of Surgery Robot System, large-scale apparatuses are placed around an operating table, and their arms occupy the space around a patient. This occupation of space, however, prevents medical doctors from intervening during the use of Surgery Robots. In this paper, we propose Hanger Mechanism that hangs slave robots for Minimally Intuitive Surgery. This system is effective to unoccupy the space around a patient, and ease medical doctors to approach to a patient during a operation.

Key Words: Minimally Intuitive Surgery, Unoccupied Surgical Space, Hanger Mechanism

1. はじめに

外科手術の分野で、低侵襲手術が注目されている。低侵襲手術とは、治療を施すべき部位にメスや鉗子といった手術器具を到達させる際に、正常な生体組織の損傷を最小限にすることを旨とした手術法全般を指す。低侵襲手術の1つに内視鏡手術がある。これは腹壁に開けられた穴を通して手術器具を体内に挿入し、同様にして挿入した内視鏡から得られた画像を見て手術を行う方法である。この手術法は患者の身体的負担の軽減、入院期間の短縮、術後の日常生活への影響の縮小を図ったもので、発展、普及が期待されている。

しかし低侵襲手術ではできるだけ小さく切開し、狭い経路を通り、緻密で正確な操作を行うため、術者に高度な技術を要することとなり、手術が従来よりも難しいものになってしまう。そこで医師が術中に必要とする様々な支援、例えば手術操作機能や判断支援情報を的確に提供する危機、いわば医師の新しい目と手が必要になってくる¹⁾。

近年医師の新しい目と手として、手術ロボットシステムが開発されている。現在用いられている手術ロボットとして有名なものに、Intuitive Surgical社のda Vinci²⁾、Computer Motion社のZEUS³⁾等が挙げられる。前者はSalisburyらが開発したもので、各腕に7自由度の自由度を持ち、鉗子部が作業に応じて迅速に取り替えられるようになってきている。後者は手術台の横にAESOPと呼ばれる6自由度のマニピュレータを複数配置する形式になっている。

現在用いられている手術ロボットは、術中手術台の周辺に大がかりな装置が配置され、患者の上に覆い被さるように位置決めされている。しかし、手術ロボットを用いる状況であっても医師の介助は不可欠であり、術中に医師が患部にアプローチする際の経路である患部周辺の空間を占有するのは避けなければならない。従って本研究では患部周辺の空間を占有しない外科手術ロボットシステムの構築を目的とし、術中のスレーブロボットの配置について考える。

2. 現状とその問題点

2.1 小型能動機構を用いた外科手術ロボットシステム

現在用いているシステムの構成は以下のようになっている。Fig. 1にその概観を示す。

マスタ側

- PHANToM(SensAble Technology)
グリップを握って動かすことで、位置3自由度と姿勢3自由度の情報を取り込むことができ、加えて手元のスイッチのON/OFF状態も取り込むことができる。

スレーブ側

- PointSetter(三鷹光器)
4つの回転軸と4つの球面ジョイントを持ち、先端を手術空間内で自由に位置決めすることができる。固定時には球面ジョイントはバネの押さえつけにより機械的にロックし、動かすときには圧縮空気を用いてバネを縮めることでロックを解除できるようにになっている。
- 能動トロカール⁴⁾
2つの回転と1つの並進を持ち、それにより取り付けられた鉗子の姿勢2自由度と差し込み深さを決められる。
- 能動鉗子⁵⁾
全体の回転とジグソーライド機構による先端の姿勢2自由度に加え、把持部の姿勢1自由度を持っている。

2.2 システムの問題点

現在配置としてはFig. 1右のように台に固定されたレール上に複数のPointSetterが配置され、各先端にスレーブロボットや内視鏡が取り付けられている。この場合、手術台面から上向きにPointSetterが配置され、そこから各球面ジョイントを屈曲させることで先端を腹壁に開けられた穴付近に位置決めする。従って患部周辺の空間がPointSetterの腕や配線によって占有され

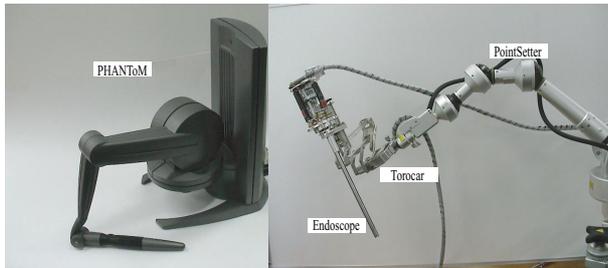


Fig.1 Appearance of System

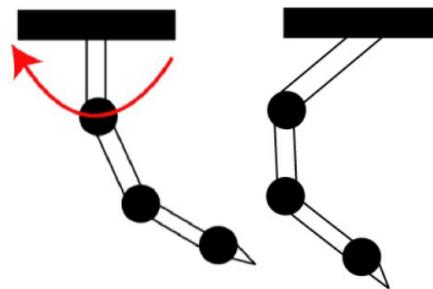


Fig.3 Attitude of PointSetter

てしまう。

3. 配置に関して必要とされる点

3.1 方針

現在 PointSetter は Fig. 2 左のように台に固定されていて、そのことにより患部周辺空間が占有されている。この解決として Fig. 2 右のように PointSetter を上から吊り下げることで患部周辺の空間の確保をする。従って、開閉式吊り下げ器の開発を行う。

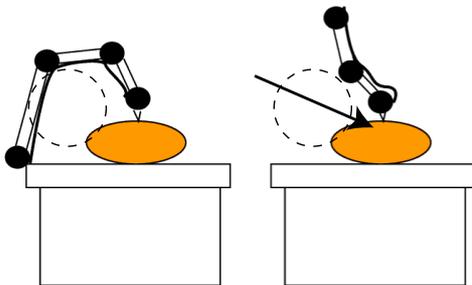


Fig.2 Disposition of PointSetter

3.2 各々の PointSetter について

スレーブロボットの位置決めを行う際、開閉式吊り下げ器及び PointSetter の取り付け部は移動させずに、PointSetter の球面ジョイントの回転のみで行うとする。その場合 Fig. 3 左のように取り付け部鉛直下方から PointSetter 先端までの変位が大きい場合、先端に取り付けられたスレーブロボットの質量により取り付け部周りに大きなモーメントがかかる。これは取り付け部にガタが出たり故障したりする原因となるので避けなければならない。PointSetter の先端は Fig. 3 右のように取り付け部鉛直下方付近の、取り付け部にモーメントが生じなくなる位置にあるのが好ましい。従って、取り付け部自体を移動させることで大まかな位置決めを行い、PointSetter は微調整にのみ用いる。

3.3 全体の位置関係について

内視鏡下手術では内視鏡及び複数のスレーブロボットを用いるので、複数の PointSetter を吊り下げるときの取り付け部について考える。

まず各取り付け部が自由度を持って動くようにした場合、利点としては様々な形状の配置ができるということが挙げられる。しかし、各移動に際して固定解除

移動 固定を行わねばならず、手順が煩雑になり、また1つでも固定し忘れると致命的な事故に繋がる。これは医療用機器には不適切である。従って、1ヶ所を動かせば複数の取り付け部が連動して動き、1ヶ所を固定すれば全体が固定されるようにする。

次に、複数の取り付け部をどのような配置で拘束するかを考える。内視鏡下手術において理想的な鉗子と内視鏡の配置は、Fig. 4 のように腹壁上に直角二等辺三角形の各頂点に開けられた穴に通されている状態である。また術中に臓器を押さえる等の役割を果たす腕が内視鏡と対角から入ってくることが考えられるので、腹壁上には正方形の各頂点の位置に穴が開けられるとして以下を考える。3.2 節より取り付け部は腹壁上の穴の鉛直情報に位置するのがよいので、従って取り付け部も正方形の各頂点を形成するようにする。また手術の種類によって開けられる穴の間隔が変わってくることを考えると、開閉式吊り下げ器上で取り付け部が常に正方形の各頂点を形成しつつ、操作によって正方形が拡大縮小されるような機構を考える。実際の内視鏡下手術の場合、鉗子と内視鏡を挿入する穴の間隔は15cm 程度であるので、±5cm をみて、10cm から 20cm の大きさに拡大縮小するものと考えている。

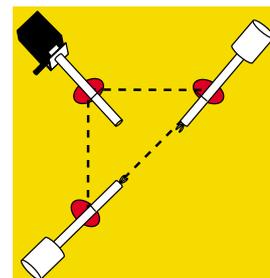


Fig.4 Deposition of Endoscope and Forceps

4. 開閉式吊り下げ器のコンセプト及び機構

4.1 コンセプト

Fig. 5 に全体のコンセプト図を示す。

まず動かし方について、モータ等のアクチュエータを用いると手術中に何らかの理由でアクチュエータが誤作動を起こした場合に致命的な事故に繋がる。従ってアクチュエータは用いずに、手で軽く動かせるようにする。また何らかの理由で固定がはずれたりした場

合でもその状態で静止していなければならない．よって、力が加わっていない状態では全体が動かないような機構を考える．

次に用いる機構について、ベルトや歯車などはいないことにする．これはバックラッシュにより精度が低くなるからである．またベルトの場合は伸びが考えられ、歯車を用いると重くなってしまう．従って主に1自由度の回転を用い、場所によっては1自由度の滑りを用いた．

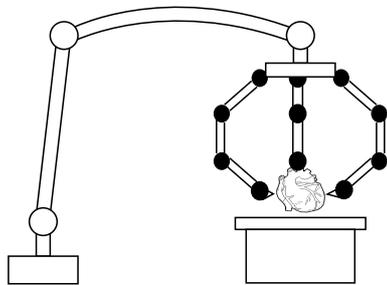


Fig.5 Model of Concept

4.2 開閉式吊り下げ器機構 (1)

Fig. 6 に開閉式吊り下げ器機構 (1) を示す．これは平面内における回転と滑りで実現したものである．この機構を Fig. 7 を用いて説明する．Fig. 6 と Fig. 7 の対応は、赤い部品が線分 $a_1c_1-a_4c_4$ 、黄色い部品が正方形 $a_1a_2a_3a_4$ 、青い部品が正方形 $c_1c_2c_3c_4$ である． c_1-c_4 は取り付け部で、これらの点は各々 a_1-a_4 を中心に回転する．また $a_1a_2a_3a_4$ と $c_1c_2c_3c_4$ は o を中心に回転運動をする． b_1-b_4 は線分 $a_1c_1-a_4c_4$ 上に固定された点で、各々 a_1-a_4 から等距離の位置にある． b_1-b_4 は各々 $c_1c_2c_3c_4$ の対角線上に対角線方向の1自由度を持って固定されている．そうすると、 $c_1c_2c_3c_4$ を回転運動させた場合、 $\angle a_1Ob_1-\angle a_4Ob_4$ は等しい．また Oa_1-Oa_4 も等しく、 $a_1b_1-a_4b_4$ も等しい．従って、 $\triangle a_1Ob_1-\triangle a_4Ob_4$ の取り得る三角形は2種類に限られるが、 b_1-b_4 の移動範囲を決めると $\triangle a_1Ob_1-\triangle a_4Ob_4$ は合同であると言える．従って Ob_1-Ob_4 は等しくなり、 $b_1b_2b_3b_4$ は正方形となる．そのことから $c_1c_2c_3c_4$ は正方形となることが言える．よって Fig. 6 の黄色い部分を青い部分に対して回転しても、取り付け部は常に正方形の各頂点を形成する．その動く様子を Fig. 8 に示す．

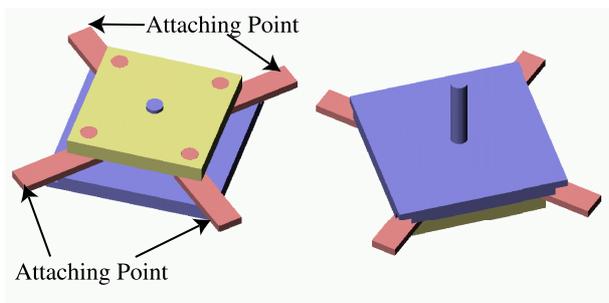


Fig.6 Model of Hanger Mechanism(1)

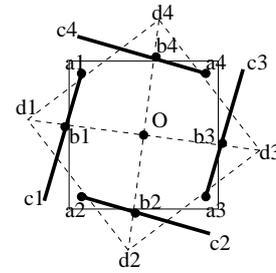


Fig.7 System of Hanger Mechanism(1)

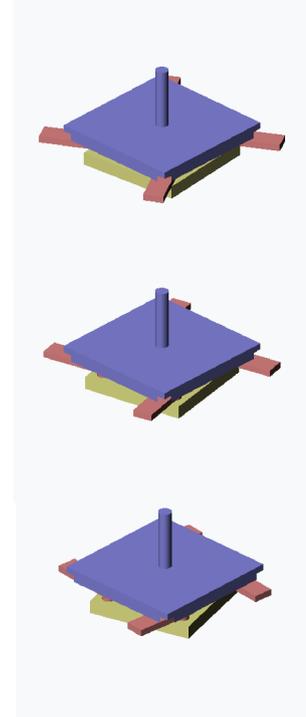


Fig.8 Motion of Hanger Mechanism(1)

4.3 開閉式吊り下げ器機構 (2)

Fig. 9 に開閉式吊り下げ器機構 (2) を示す．これは鉛直面と水平面内における回転で実現したものである．この機構を Fig. 10 を用いて説明する．これは c_1-c_4 を同一平面上にくるようにすることで $c_1c_2c_3c_4$ が正方形の各頂点を形成するようにする．そして $c_1a_1-c_4a_4$ が鉛直になるように拘束することで、取り付け部 a_1-a_4 が常に正方形の各頂点を形成するようにしたものである．Fig. 10 中の黒丸は平面に鉛直な回転軸を持つ1自由度の回転である．またこの機構の場合、上下の変位があるので、固定が外れた際に取り付け部が下へ移動してしまう．この解決策として架空での取り付け部と逆の位置にカウンターウェイトを取り付け、それと Pointsetter 及びスレーブロボットが釣り合い、固定が外れた際でも外力がない限りその位置で静止しているようにした．その動く様子を Fig. 11 に示す．

4.4 各機構の長所及び短所

まず開閉式吊り下げ器機構 (1) について、長所としては高さ方向に小さくできること、短所としては滑りの機構部分にそれを剥がす方向に力がかかること、取り付け部から中心への向き、つまり $\angle acO$ が回転した際

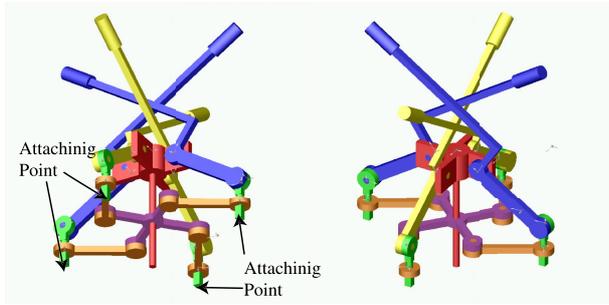


Fig.9 Model of Hanger Mechanism(2)

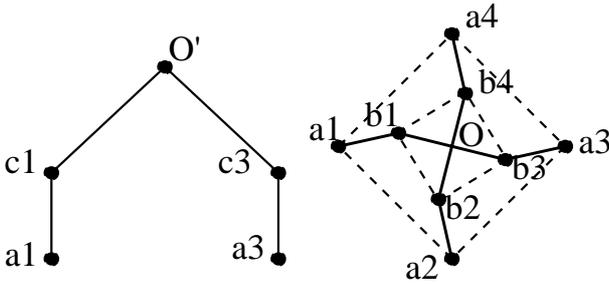


Fig.10 System of Hanger Mechanism(2)

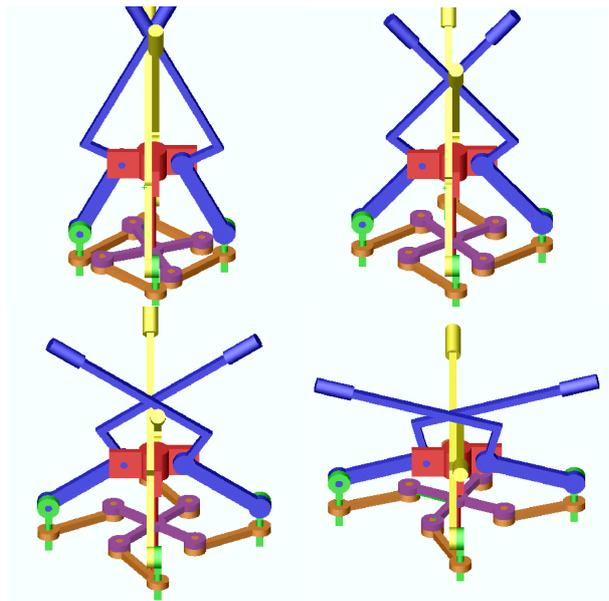


Fig.11 Motion of Hanger Mechanism(2)

に変わってしまうことが挙げられる。滑りの部分があることで質量の大きい機械要素を用いることになり全体の重量が大きくなってしまいが、高さ方向に変位しないという点は大きい。次に開閉式吊り下げ器機構(2)について、長所としては回転しか用いていないこと、取り付け部から中心への向きが常に同じであること、短所としては高さ方向に大きくなること、高さ方向に変位することが挙げられる。回転しか用いていないことで軽い機械要素しか用いず全体の質量を小さくでき、また動作時の精度も高められる。従って開閉式吊り下げ器

機構(1)の上下に変位しない点と開閉式吊り下げ器機構(2)の回転しか用いていない点を用いたいと考える。

5. おわりに

本報告では、手術ロボットシステムを使用する際の、術中のスレーブロボットの配置に関する考察及び、その配置に必要なスレーブロボットの開閉式吊り下げ器の開発を行った。今回の研究から以下のことが分かる。

- 平面内の回転のみで拡大縮小の機構を作り出すのは困難であるが、鉛直面と水平面内の回転を用いると実現できる。
- スレーブロボットを患者上方より吊り下げることによって、術中に必要な空間が確保される。

このことにより、内視鏡手術を支援するための手術ロボットを用いる際に患部周辺の空間がシステムにより占有されるということがなくなり、その結果術中の医師による介助が容易になると考えられる。

なおこの研究は、NEDO 医学・工学連携研究事業「循環器系疾患に対する予後診断を含む低侵襲診断治療システムに関する基盤研究」(代表：高本眞一)、未来開拓推進事業「外科領域を中心とするロボティクスシステムの開発」(代表：佐久間一郎)

参考文献

- 1) 伊関, 南部, 橋本, 土肥, "バイオエンジニアリングの歴史 手術支援ロボットの開発の現状と今後の展望", BIOENGINEERING NEWS No.23
- 2) Gutjart G.S., and J.K.Salisbury, "The Intuitive Telesurgery System", Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2000), San Francisco CA, April 2000.
- 3) Reichenspurner H, Daniano RJ, Mack M, Boehm DH, Gulbins H, Dettler C, et al. "Use of the voice-controlled and computer assisted surgical system ZEUS for endoscopic coronary artery bypass grafting". J Thorac Cardiovasc Surg 118:11-6, 1999
- 4) 小林祐樹, 岡田昌史, 中村仁彦, "手術室環境を占有しない小型スレーブロボット", 第 19 回日本ロボット学会学術講演会, pp.757-758, 2001
- 5) 千代田真吾, 岡田昌史, 中村仁彦, "ジグソーブロックスライドを用いた能動鉗子の開発", ロボティクス-メカトロニクス講演会'02, 2A1-B06, 2002.