

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24246043

研究課題名(和文)多様な臓器・器官の低侵襲操作のための高集積手術機械システムの創造

研究課題名(英文)Highly integrated surgical systems for manipulating a variety of soft organs in minimally invasive way

研究代表者

小俣 透 (OMATA, Toru)

東京工業大学・総合理工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：10262312

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,100,000円

研究成果の概要(和文)：現在、腹腔鏡下手術、胸腔鏡下手術などの内視鏡手術が急速に拡大している。一方、放射線治療では医師の被曝防止が求められている。これらに伴いさまざまな柔軟な臓器や器官を低侵襲に操作するという新たな要求が生じている。本研究では、組立、展開、吸引などの方法により、多様な臓器・器官を低侵襲に操作するための高集積手術機械システムを開発することを目的とする。具体的には、(1)肺や肝臓を対象とした吸引手術機器の開発、(2)小型力センサを組み込んだ鉗子の開発、(3)医師の被ばく低減のための口腔外科小線源治療用遠隔刺入・装填システムの開発、(4)湾曲した咽頭に到達可能な咽頭がん手術マニピュレータの開発を行った。

研究成果の概要(英文)：Laparoscopic surgery and thoracoscopic surgery gain popularity these days. In radiation therapy, the prevention of doctor's exposure to radiation is highly required. These progresses and requirement in surgery and treatment demand manipulation of a variety of soft organs in minimally invasive way. The purpose of this study is to develop highly integrated mechanical devices or systems for manipulating a variety of soft organs by means of assembly and/or unfolding of parts, and/or suction. We have developed: (1) suction surgical devices for the lung and liver, (2) a forceps in which a small force sensor is integrated, (3) radiation seed remote loading and insertion systems for oral cancer brachytherapy, and (4) mechanical motion converter for arc shaped forceps used in pharyngeal cancer surgery.

研究分野：ロボット工学

キーワード：手術ロボット

1. 研究開始当初の背景

現在、腹腔鏡下手術、胸腔鏡下手術などの内視鏡手術が急速に拡大している。一方、放射線治療では医師の被曝防止が求められている。これらに伴いさまざまな柔軟な臓器や器官を低侵襲に操作するという新たな要求が生じている。これらの操作には、把持、挙上、圧排等の操作が含まれる。

2. 研究の目的

これまでに腹腔鏡下手術のための組立式ハンドという独創的な低侵襲手術機器を提案し開発してきた。本研究では、腹腔から胸腔、口腔、咽頭に範囲を広め、組立に加えて展開、吸引などの方法により、多様な臓器・器官を低侵襲に操作するための高集積手術機械システムを開発することを目的とする。対象とする臓器・器官は、肺、肝臓、舌等である。いずれの装置も小型であることが要求され、その開発のための基盤技術を確認する。

3. 研究の方法

具体的には、つぎの課題について研究を行った。

- (1) 吸引手術機器の開発
- (2) 小型力センサを組み込んだ鉗子の開発
- (3) 口腔外科小線源治療用遠隔手術システムの開発
- (4) 咽頭がん手術マニピュレータの開発

これらの課題を通じて、個々の要素から開発し、それらを集積したデバイスおよびシステムを開発した。

4. 研究成果

(1) 吸引手術機器の開発：

肺、肝臓などの大型臓器を挙上、圧排するための吸引手術機器を開発した[雑誌論文③、学会発表⑤⑧⑨]。その仕様は、(i)径 12mm のポートから挿入可能であること。(ii)人間の片肺の平均質量 445 g より重い 500 g は挙上できること。肝臓はこれより重い全体を挙上することはなく、また挙上よりも圧排することが望まれているので、この程度の吸引性能があれば十分である。(iii)吸盤で対象に吸着する際、組織や血液などが流路内へ吸引される可能性があり、その滅菌洗浄は難しい。そのため、吸着部を簡易な構造とし、ディスポーザブルにすること。

径 12mm のポートから挿入可能という条件があるため、(ii)の条件を満たすことは難しい。(iii)の条件もあるため、本研究では、吸盤やベローズ、ヒンジ、バルブなどの要素から開発することにより、これらの仕様を満たすこととした。簡易に成形可能で柔軟性を有し生体適合性が良いシリコンゴムとポリプロピレンを材料として、これらの要素を開発した。その例を図1に示す。吸着力向上については、柔軟な曲面を有する対象物に安定に吸着するため、吸盤にコンプライアンスを付与し受動的に吸着面が対象物にな

じむような機構を採用した。

開発した吸引手術機器を図2に示す。体腔内で三角形に変形し吸着面積を増加させる。臓器を模した柔軟で滑りやすい 500 g の食用豚レバーを挙上できることを確認した。



図1 製作した要素



図2 製作した吸引手術機器

さらに、吸盤の付いた細長い二つの指を腹腔内で組み立てるハンド形状の吸引手術機器を開発した(図3上)[学会発表③⑫]。図2の三角形吸引手術機器よりも、さらに曲面に対応が可能である。挿入時には加圧により直線状になり容易にトロカールを通過し、吸引時には円弧形状になり曲面を持つ臓器を容易に吸着可能である(図3下)。さらに、各指の向きを並列や対向する方向に変えて、圧排動作と把持動作の両方を行うことができる。図4のように食用豚レバーを挙上可能であることを確認した。

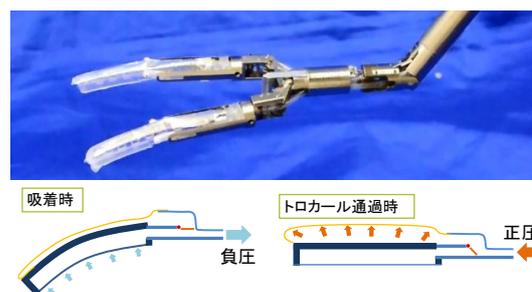


図3 組立式吸引手術ハンド



図4 食用豚レバーの挙上

(2) 小型力センサを組み込んだ鉗子の開発：

手術機器と臓器・器官との接触力の計測が

依然として問題として残されている．力が加わると管長さが変化し発音周波数が変化する笛による力センサを提案してきた．簡単な流路だけでセンサを構成できるので，電気を使わず安全であり，ディスプレイ化に適している．しかし歩留りの高い製作方法が課題であった．そこで MEMS 技術により笛素子を製作することに取り組み，安定的に発音する笛素子を大量に製作することに成功した（図 5）[雑誌論文②，学会発表⑪⑰⑱]．また温度変化の影響を低減させることも課題であったが，そのための温度補正方法を確立した．図 6 に示すように，二つの笛を並列に並べ，片方により温度変化による周波数変化を捉えて補償する．



図 5 MEMS 笛センサ

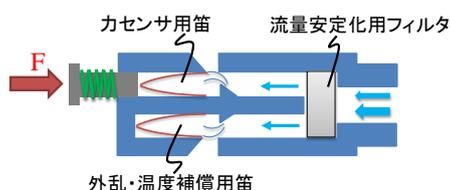


図 6 温度補償の原理

一方，力センサを鉗子先端に取り付けた場合，鉗子の軸方向の力精度が構造上他の方向に比べて著しく悪くなる問題を指摘した．そこで軸方向と円周方向との力センシングを分離することにより，軸方向の計測精度が改善できることを示した．これを実装した 3 自由度鉗子を開発した（図 7）[学会発表⑨]．



図 7 3 自由度鉗子

(3) 口腔外科小線源治療用遠隔手術システムの開発：

放射性 Au 粒子を用いた口腔がんに対する小線源治療は治療効果が認められているが，医師が被ばくするため普及していない．この小線源治療では医師が直接手で線源を一粒ずつ刺入器に装填しており，まずその際に被ばくする（図 8 (a)）．また治療中医師が刺入器を用いて線源を患部に刺入し，さらに傍らに 10 本程度の刺入器が配置され，それらに装填された多数の線源からも被ばくする（図 8 (b)）．

そこで，これらの被ばくを低減させるため

の装置を開発した．まず遠隔から線源を刺入する装置の開発を行った[学会発表⑥]．一方，より早期の実用化を目指して，被ばくを完全になくすのではなく低減することを目指し，遠隔で線源を装填する装置を開発した[学会発表④⑬⑮]．

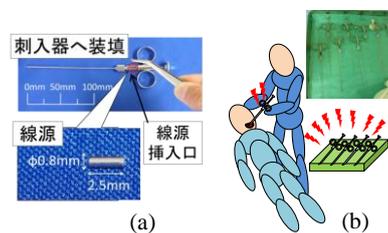


図 8 医師の被ばく

①遠隔線源刺入装置

線源より 1 m 程度離れば被ばくは大幅に低減する．また，医療機器では簡便さが好まれる．そこで 1 m 程度離れて手で操作する遠隔線源刺入装置を開発することにした．さらに，現在使用している針を利用することとした．開発した装置（図 9 上）は，(i)針刺入部，(ii)舌や頬を把持するグリッパとそれを遠隔で位置決めするための遠隔位置決め部（図 9 下）からなる．



図 9 遠隔線源刺入装置（上）とグリッパの遠隔位置決め部（下）

(i) 針刺入部

刺入時の力の感覚を伝達でき，できる限り小型に収まるようにするため，動力伝達には自転車のコントロールケーブルを用い，このケーブルの押し引きにより刺入針の抜き差しを行うこととした．

(ii) グリッパとその遠隔操作部

舌，頬などの口腔内器官は柔軟で固定されていないため，針を刺入するためには，それらを確実に把持し牽引しないと刺入できない．そこでそのためのグリッパとそれを遠隔で操作するための装置を開発した．舌，頬などにダメージを与えないために，シリコン

ゴムによるバルーンを空気で膨張させることにより、それらを把持することにした。

遠隔操作部にはパラレルメカニズムを用いることにより、手元マスターと患部スレーブ間の低摩擦動力伝達を実現した。これにより患部スレーブ側に加わる力が手元マスター側に伝わるため、無理な力を患部に与えないようにすることができる。舌を模擬した表皮をグリップで把持し牽引することにより、針の刺入が可能になることを実験により確認した。

②遠隔線源装填装置

図10に示すように、治療中刺入の度に線源を遠方より刺入器に装填すれば、被ばくは低減できる。

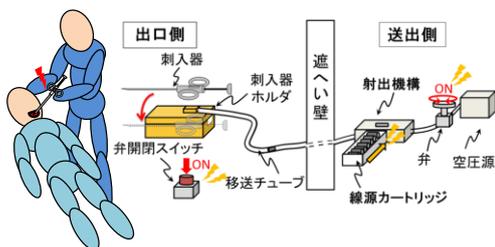


図10 遠隔線源装填の概念図

開発した遠隔線源装填装置を図11に示す。この装置はつぎのように使用する、(i)振動機を用いて線源をカートリッジ内に整列する。(ii)カートリッジを射出機構に装着する。(iii)刺入時に医師はホルダに空の刺入器をセットし、弁開閉スイッチを押す。これにより、線源は射出機構により一粒ずつ送出され、低摩擦チューブを通りホルダ内の刺入器の挿入口へと落下し装填が完了する。(iv)医師はホルダから刺入器を取り出し、患者に線源を刺入し刺入器を再びホルダに戻す。(iii)と(iv)の動作を刺入する線源数だけ繰り返す。

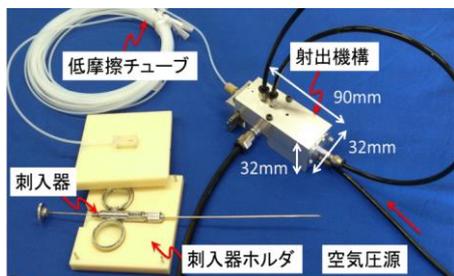


図11 遠隔線源装填装置

動作検証により10m遠方より約1.5秒程度で装填が可能であることが確認した。この試作機を用いて被ばく低減効果を定量的に評価した。評価方法は次の通りである。被験者により動作を再現し、疑似線源からの距離 D [m] をカメラを用いて測定する。被ばく線量 E [μSv] は次式より計算される。ただし実際には、1秒ごとにサンプリングして、被ばく線量 E を計算する。

$$E = f \int \frac{1}{D^2} dt$$

ここで f は線源1個あたりから1mの距離において1秒間浴びた時の定数として $f = 2.69 \times 10^{-3}$ [$\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^3/\text{s}$] である。被験者5人による模擬実験により約6割の被ばく低減効果を確認した。

(4) 咽頭がん手術マニピュレータの開発：

咽頭がんの切除手術のために、図12のように口から喉へかけての曲がった空間を通過して、それにアプローチする必要がある。曲がった経路に合わせた湾曲鉗子を用いて手術を行う方法が開発されている。直線状の鉗子を用いる場合と比較して、無理に挿入することがないため患者の負担は低減する。しかし、内視鏡の映像に映された鉗子先端と実際の持手の方向が異なり、例えば鉗子先端を前に進めるために図のように真直ぐに押し込むと喉に突き当たる。この場合、鉗子を回転させる必要があるが、操作が直観的ではなく術者の負担となる。

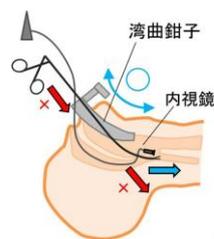


図12 咽頭がん用湾曲鉗子

これを解消するため、図13に示す動作変換機構を提案し試作機を製作した[雑誌論文①, 学会発表⑦]。この装置により、手元部を上下、前後、左右に動かせば、湾曲した鉗子先端も上下、前後、左右に動かすことができる。医療機器の審査レベルを低くしコストを抑えることを目指すために、モータ等のアクチュエータを使用しないことにした。



図13 咽頭がんマニピュレータ

6人の被験者により、試作機の操作性を評価した。湾曲鉗子を直接手で持って操作する場合と試作機に取り付けて操作する場合それぞれについて、四つの目標点に先端を位置決めする動作に行い動作時間を比較した。その結果、前者では平均30.6秒、標準偏差9.0秒、後者では平均18.2秒、標準偏差3.4秒であり、t検定により有意水準1%で差が認められる結果を得た。

しかし一次試作機は大きいため、コンパクトにした二次試作機を開発した(図14)。特に幅は146mmから40mmに大幅に薄くなり、手術現場に導入できる大きさにすることができた。



図14 咽頭がんマニピュレータ(2次試作機)

さらに複数台を並列に並べて使用できるように、さらにコンパクトにした三次試作機を開発した(図15)。幅を15mmまで薄くすることができた[学会発表①]。また、鉗子先端に回転2自由度を持たせた直径3mmの湾曲鉗子を開発した(図16)。さまざまな向きの咽頭がん鉗子先端を向けることができる。



図15 咽頭がんマニピュレータ(3次試作機)

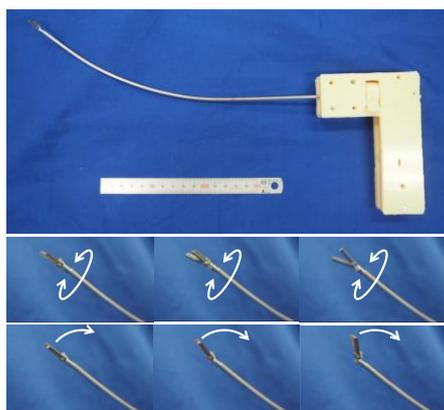


図16 径3mm湾曲鉗子

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

①高山 俊男, 牧野 雄太, 小俣 透, 杉本太郎, 咽頭がん手術で用いる湾曲鉗子进行操作するための機械式3自由度動作変換装置, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 821, 2015

DOI:10.1299/transjsme.14-00096

②Tadashi Ishida, Van Ngyuen Quet, Shota Mochizuki, Yusuke Kagawa, Toshio Takayama, and Toru Omata, Mems whistle-type temperature-compensated displacement sensor using resonant frequency shift, Sensors and Actuators A: Physical, 222, pp. 24-30, 2015,

DOI:10.1016/j.sna.2014.11.0007

③宮本 寛之, 高山 俊男, 小俣 透, 大泉 弘幸, 胸腔鏡下手術のための変形式肺ポジションの開発 -吸着力向上とディスプレイ化のための設計製作, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 45巻, 4号, pp. 51-57, 2014

DOI:なし

[学会発表](計18件)

①高山 俊男, 牧野 雄太, 小俣 透, 杉本太郎, 咽頭がん手術用機械式動作変換マニピュレータの小型軽量化, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P1-E08, 2015/5/18-19, みやこめっせ(京都府京都市)

②Toru Omata, Robot hand design for grasping and manipulation of a variety of objects, IEEE conference on Robotics and Automation international workshop on autonomous grasping and manipulation, 2014, May 31, Hong Kong(China) (invited)

③高山 俊男, 黒田一樹, 小俣 透, 大型臓器把持のための体腔内吸着バンド, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 3P1-C02, 2014/5/26-28, 富山市総合体育館(富山県富山市)

④齋藤 由佳理, 小俣 透, 高山 俊男, 三浦 雅彦, 渡邊 裕, 口腔がん小線源治療の被ばく低減のための遠隔線源装填装置-被ばく低減量の評価実験-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 3P1-E02, 2014/5/26-28, 富山市総合体育館(富山県富山市)

⑤Hiroyuki Miyamoto, Toshio Takayama, Omata Toru, Development of hydraulic driven silicone rubber bellows for laparoscopic retractors, Proc. of The 12th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, Nara, Japan, November 18-23, 2013, OS4-02-5

⑥Saito Yukari, Takayama Toshio, Omata Toru, Shibuya Hitoshi, Miura Masahiko, Watanabe Hiroshi, Remotely Operated Brachytherapy System for Oral Cancer, Proc. of The 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe, Germany, May 6-10, 2013, pp. 4848-4853

⑦高山 俊男, 牧野 雄太, 小俣 透, 杉本太郎, 咽頭がん手術用機械式3自由度動作変換マニピュレータ, 第22回日本コンピュータ外科学会大会, 13(VI)-26, 2013/9/14-16, 東京大学工学部2号館(東京都文京区)

⑧宮本 寛之, 高山 俊男, 小俣 透, 大泉 弘幸, 胸腔鏡下手術に用いる吸盤を有する変形式肺ポジションの開発～構造の簡素化と吸着力の向上～, 22 回日本コンピュータ外科学会大会, 13 (X) -43, 2013/9/14-16, 東京大学工学部 2 号館 (東京都文京区)

⑨NGUYEN VAN QUYET, 小俣 透, 高山 俊男, 多自由度鉗子の力センシングに適した構造, 日本ロボット学会第 3 1 回学術講演会, 2013/9/4-6, 首都大学東京 (東京都南大沢キャンパス八王子市)

⑩宮本 寛之, 高山 俊男, 小俣 透, 大泉 弘幸, 腹腔鏡下手術に用いる吸引式肺ポジションの柔軟シリコンゴムを用いた開発, 平成 25 年春季フルードパワーシステム講演会, pp. 4-6, 2013/5/30-31, 機械振興会館 (東京都港区)

⑪石田 忠, 望月 翔太, 小俣 透, 高山 俊男, マイクロ笛を用いた腹腔鏡下手術用 MEMS 力センサの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1A1-C04, 2013/5/23-24, つくば国際会議場 (茨城県つくば市)

⑫黒田 一樹, 高山 俊男, 小俣 透, 真空硬化性を有する腹腔内膨脹型リトラクタ, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1A2-B13, 2013/5/23-24, つくば国際会議場 (茨城県つくば市)

⑬齋藤 由佳理, 高山 俊男, 小俣 透, 渋谷 均, 三浦 雅彦, 渡邊 裕, 口腔がん小線源治療の被ばく低減のための遠隔線源装填装置, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2A2-L01, 2013/5/23-24, つくば国際会議場 (茨城県つくば市)

⑭高山 俊男, 小俣 透, 大泉 弘幸, 貞弘 光章: オフポンプ冠動脈バイパス手術用組立式スタビライザー, 第 21 回日本コンピュータ外科学会, 12(VI)-32, 2012/11/2-4, あわぎんホール (徳島県徳島市)

⑮齋藤 由佳理, 高山 俊男, 小俣 透, 渋谷 均, 三浦 雅彦, 渡邊 裕, 口腔がん小線源治療の被爆低減のための遠隔線源装填装置, 第 21 回日本コンピュータ外科学会, 12(XI) -54, 2012/11/2-4, あわぎんホール (徳島県徳島市)

⑯小俣 透, 流体を用いた手術機器, 日本機械学会 2012 年度年次大会, F112004, 2012/9/10-12, 金沢大学 (石川県金沢市) (招待講演)

⑰高山 俊男, 香川 裕介, 小俣 透, 音を用いた 3 軸力センサ搭載把持鉗子の機構設計, 日本ロボット学会第 30 回学術講演会, RSJ2012, 2L2-3, 2012/9/18-20, 札幌コンベンションセンター (北海道札幌市)

⑱望月 翔太, 小俣 透, 高山 俊男, 石田 忠, 腹腔鏡下手術用鉗子のための音を用いた力センサの温度補償, 日本ロボット学会第 30 回学術講演会, RSJ2012, 2L2-4, 2012/9/18-20, 札幌コンベンションセンター (北海道札幌市)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 口腔がん小線源刺入のための小線源装填装置

発明者: 三浦 雅彦, 渋谷 均, 渡邊 裕, 小俣 透, 高山 俊男, 齋藤 由佳理

権利者: 東京医科歯科大学, 東京工業大学

種類: 特許

番号: 特願 2012-208816

出願年月日: 2012. 9. 21

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ

<http://www.olab.pms.titech.ac.jp>

受賞

・雑誌論文③ 日本フルードパワーシステム学会平成 26 年学術論文賞

・学会発表③ 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門 Robomech 表彰

・学会発表⑨ 日本フルードパワーシステム学会平成 25 年春季講演会最優秀講演賞

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小俣 透 (OMATA, Toru)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・教授

研究者番号: 10262312

(2) 研究分担者

高山 俊男 (TAKAYAMA, Toshio)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・准教授

研究者番号: 80376954

(3) 連携研究者

小嶋 一幸 (KOJIMA, Kazuyuki)

東京医科歯科大学・医学部付属病院・教授
研究者番号: 60133243

田中 直文 (TANAKA, Naofumi)

東京医科歯科大学・医学部付属病院・講師
研究者番号: 90280982

三浦 雅彦 (MIURA, Masahiko)

東京医科歯科大学・大学院医歯学総合研究科・教授

研究者番号: 10272600

大泉 弘幸 (OIZUMI, Hiroyuki)

山形大学・医学部・准教授

研究者番号: 40250930