

令和 2 年 5 月 28 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K10656

研究課題名(和文) 体内へ挿入可能なヒューマノイドハンドを用いた次世代型腹腔鏡下手術の提案

研究課題名(英文) Proposal of next-generation laparoscopic surgery using a small humanoid robot hand that can be inserted into the body.

研究代表者

向井 正哉 (MUKAI, Masaya)

東海大学・医学部・教授

研究者番号：40229919

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：5指多関節ロボットハンドは開発・改良を重ね、現在最大直径30mmまで小型化が進んだ。追加開発した外骨格型システムにより、機能・動作精度もかなり向上し、人の手に近い関節の動きができるようになってきた。触覚の開発についてはまだ道のりの途中であるが、日々研究を重ねている。ドライボックスを使用しての仮想手術シミュレーションも回数を重ね、現在も継続中である。まもなく臓器摘出手術を目的とした再動物実験を行う予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

世界初で日本発信となるロボットハンドを用いたHALS手術が臨床応用可能か否かを検討するこの研究成果は、5指多関節ロボットハンドが応用可能となれば、HALS手術を現在の人の手技以上に向上させる。さらに操作習熟度は全く操作が異なる完全ロボットシステムの1/2から1/3のラーニングカーブに短縮可能と考えられ、種々の環境下での遠隔操作や遠隔医療にまで広く応用可能であるものと確信しており、医学界・ロボット学界への貢献に繋がると信じている。

研究成果の概要(英文)：The minimum length of the HALS incision is 50 mm. Also, the hands and fingers of the operators are at risk of burn injury and the range of hand movement is restricted. To address these shortcomings of HALS, we have studied a 5-finger robot hand with a similar size to a child's hand and the functionality of a normal hand. In collaboration with an engineering group, we have investigated whether such a hand could be developed to perform robotic HALS clinically. We have been granted several patents for a modified robot hand system that was originally developed for an electronic hand. The robot hand can perform the surgical procedures required for HALS and folds vertically at the palm to reduce its size for insertion through the incision. Furthermore, we are developing an exoskeleton signaling system with pressure sensors incorporated into the tips of the robot fingers to provide pseudo-tactile sensation for the surgeon.

研究分野：医歯薬学 外科系臨床医学 消化器外科学

キーワード：5指多関節小型ロボットハンド 折り畳み式ロボットハンド 腹腔鏡下手術 マスタースレーブシステム 触診・触覚と疑似触覚 消化器外科手術

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

(1)完全鏡視下手術(Pure-LAC)と定型的開腹術の中庸/中道的な優れたオプション手技として現在でも欧米や中東では盛んに行われている用手補助腹腔鏡下手術(HALS, 図1)が、本邦で再び注目を浴びている。HALSはPure-LACと比較して、

開腹手術の延長線上で手術時間が短い
触診/触覚が安全/確実に得られ、大きな腫瘍でも愛護的かつ円滑に手術操作が可能
熟練に時間を要さない
低コスト
開腹移行率が低く、切開創が僅かに大きい以外、在院期間や合併症等は定型開腹術と同等などの利点あげられる。

(2)外科医や麻酔科医が減少傾向にある本邦の医療環境において、是非とも再認識すべき優れた手技であると考えられているHALSだが、腹腔内に左手を挿入しながら電気焼灼機器やシーリング機器を使用し処置をするため、

術者の手指を損傷する可能性がある
術者の左手関節や左肩を痛めやすい
術者の左手の動きが見えづらい(カメラに映りにくい)
腹腔内の術野に手関節を挿入するため、切開創が35mmより小さく出来ない
といった問題点が存在し、種々の改善が期待される。そこでこれらの問題点を解決するため、腹腔内に挿入する術者の左手を、自らの手のように操作し感じることでできるヒューマノイドハンド(図2)で置き換えることができないかという着想に至った。

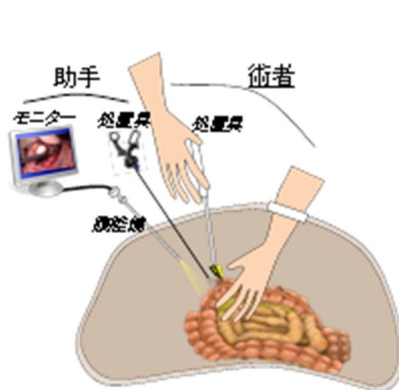


図1: 用手補助腹腔鏡下手術(HALS)

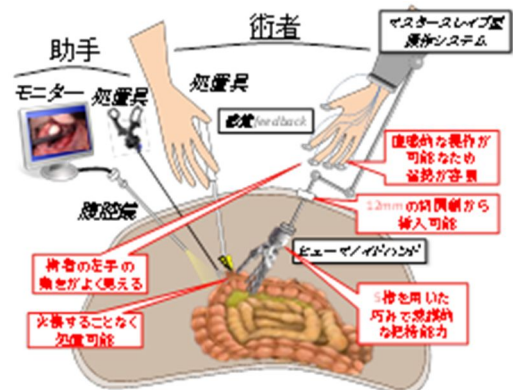


図2: ヒューマノイドハンドによる次世代型腹腔鏡下手術

2. 研究の目的

現在、ロボット技術の目覚ましい進歩により外科手術においてもロボットハンドを用いた報告は多数散見される。しかし、その殆どが人の手とかけ離れた3フィンガータイプや鉗子型であり、外科手術において重要な人体の組織や臓器を愛護的に掴む、摘む、握る、牽引するといった多様な操作を同じハンドで実現しようと思うと困難で、かつ人の手の構造と異なるためその操作習熟に非常に時間がかかるという大きな問題がある。すなわち今後腹腔鏡下手術を進歩させるためには、人の手に近い多くの運動自由度を持ったエンドエフェクタとそれらを容易に操作可能なインターフェースが必要となる。そこで、本研究グループでは、手指を失った人の手指を代替するロボット義手を開発し、世界をリードしてきた電通大横井研究室、横国大加藤研究室と協力し、これら5指多関節型ロボットハンドを、12mm臍部用ポートからも挿入できることを目標とし、かつ触覚を提示するシステムを開発し、それらを用いたHALSの長所を最大限活かした次世代型の完全腹腔鏡下手術を提案する。

3. 研究の方法

(1)小径ポートからの挿入可能な5指型マスタースレーブ型のロボットハンドシステムの実現

筋電義手の技術を応用し、HALS 手技に必要な臓器・組織の把持（掴む・つまむ）と圧排、および示指・中指での押し広げ動作が可能となるような駆動関節をもつ 5 指型ロボットハンドを設計する。このハンドは、人の筋腱構造を模したワイヤ駆動される。また、小径ポートを通過させるため、掌部を含めたハンドの折り畳み機構を採用する。

ロボットハンドの制御には、術者の手に手指角度が計測可能なデータグローブおよび外骨格型のグローブを装着し、それとハンドを同期させるマスタースレーブ方式を採用する。マスタースレーブの利点は、術者の操作量とロボットの運動量を任意に対応づける事が可能であるため操作量のスケール変換が可能になる。これにより微小の操作量でロボット運動量を大きくし、その逆も可能となる。本研究ではこの倍率を術者が任意に変更できるシステムを開発する。

筋電義手での触覚フィードバック技術を応用し、ロボット指腹部及び手掌部に柔軟な感圧センサを搭載し、その触圧に応じて操作手の指先に振動、圧覚によってその感覚を提示するシステムの開発を行う。

(2)ロボットによる HALS 手技の実現可能性の検討

腹腔鏡下手術の擬似環境として、縫合結紮訓練用ドライボックス内に食用鶏肉を用意し、これに対して実際の腹腔鏡、電気デバイス及びロボットハンドを用いて鶏皮（膜状組織を想定）・赤身（実質臓器を想定）の剥離・切開を行う実験的 HALS を実施する。また、HALS 手技に必要なロボットハンド仕様や制御手法などを明らかにする。さらに豚（Large animal）を用いた動物実験の試行（学内動物実験倫理委員会承認）。臓器摘出試験（脾臓/直腸等）を通じて、従来臨床に行ってきた HALS をベースに、次世代型腹腔鏡下手術に適した術式を明らかにしていく。

4. 研究成果

(1)手掌部の折畳機構を有するロボットハンドの開発

製作したハンドを（図 3）に示す。本ハンドは、母指の対立/並立、母指の屈伸、示指・中指の屈伸、薬指・小指の屈伸（精密把握、握力把握）、示指・中指 IP 関節の回転（押し広げ）、および手首の回転と屈伸（押し広げ）が可能関節をモータ直動およびワイヤ駆動で実現している。また、構造は 3D プリンター（ABS）で設計され、精密把握時の指先動作の精度向上のため、精密把握の姿勢終端で指先が合致するように指姿勢を設計した。また掌の中指と薬指の間から縦方向に 2 つ折りとなるヒンジ機構を導入し、ワイヤ駆動により折り畳みを実現し直径 30mm までの細径化が可能となった。目標となる 12mm ポートには至らなかったが、Pure-Laparo 時の腹腔外への臓器摘出に必要なポート（30mm）から挿入可能であるため十分有用である。また、これにより、ピンチ力 2N、握力 10N 程度で HALS で必要な精密把握、握力把握、押し広げ、圧排などの手術補助動作が可能となり、今後の適用が期待できる。

(2)外骨格機構によるデータグローブの開発とマスタースレーブ制御手法の確立

上記ハンドを直感的に操作するために、外骨格機構を有する制御精度の高いデータグローブ及び制御手法を構築した（図 4）。特に難しいデータグローブでの母指 CM 関節角度（母指対立運動）の計測については、3 リンク 3 関節、ボールジョイントを用いた機構を開発した。その他関節は、1 節 2 リンク機構で計測する。その結果位置決め精度 2deg 程度で操作することが可能となった。また、マスタースレーブ制御においては、グローブで計測された指角度とハンドの指角度を線形に対応させる線形制御であり、力覚を付与するため、グローブおよびハンドの母指屈曲関節をワイヤ牽引による関節駆動を行い、角度情報に基づく Bilateral 制御により力覚の伝達を行う。これにより、把持臓器の厚さや柔らかさの伝達が可能になった。

(3)HALS 手術を効率化する触覚フィードバック手法の検討

本ロボットハンド手術支援システムの手術性能を向上するため、指腹と掌への感覚提示がシステムの手術性能をどの程度向上させるかを、把持の安定性の認識と把持物体の形状認識の 2 つの検証により調査した。ロボットハンドの各指先と掌部に圧力センサを配置し、検知した圧力に応じて操作者に皮膚感覚として提示する。皮膚感覚としては、圧覚と振動覚を検討し圧覚については指腹部をステージで挟み込むワイヤ駆動型の圧覚提示装置を、振動覚については円盤型の振動モータを指先にバンドで配置した。フィードバック手法としては、検知される圧力センサ値に対して圧覚および振動覚の強度が比例する線形変換と、センサ値に閾値を設けて ON/OFF で刺激する 2 値変換を検討した。その結果、把持安定性については、ロボットハンドの接触の有無を振動覚で提示したほうが把持の安定性の判断が他条件よりしやすくなる。また、把持物体の形状認識については、どちらの方法でも認識可能であることが示された（図 5）。

従来からの手術同様に愛護的に臓器を圧排、把持拳上および牽引操作、5 本指による鈍的剥離機能（finger dissection）等の動作精度を上げるために、第 4 指・5 指の第 1 関節の動きを省略することで、HALS 動作に最低限必要不可欠な指関節の機能を有することも判明した。



図3：手掌部の折畳機構を有する5指ロボットハンド

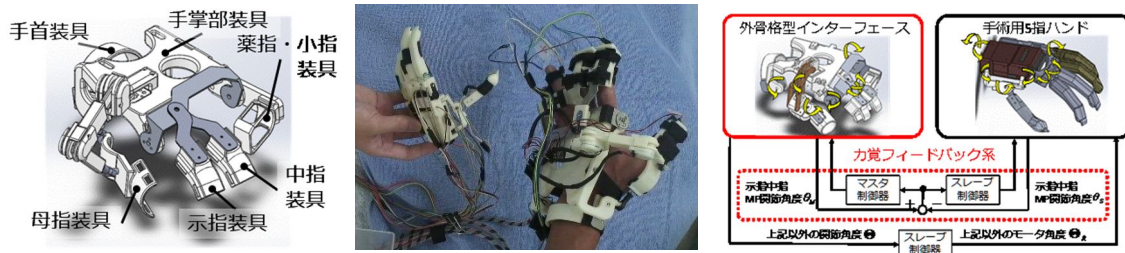


図4：外骨格機構によるデータグローブの開発とマスタースレイブ制御手法

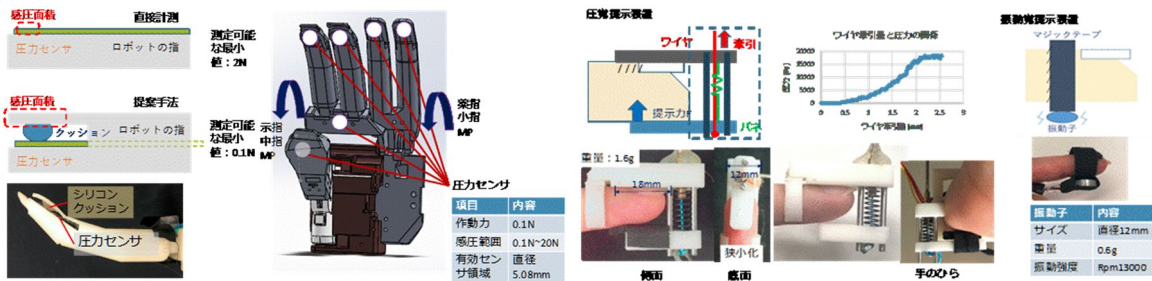


図5：HALS手術を効率化する触覚フィードバック手法

(4)臨床応用に向けて

鶏肉を擬似臓器と見立て、HALS手技に必要なロボットハンド仕様(運動自由度・力・量など)や制御手法(必要可動域・倍力制御)等を調査。

ドライボックスを使用して、鶏皮(膜状組織を想定)を第1指・2指で摘まむ(pinch)、肉を全5指で掴んで(grasp)、5cm以上持ち上げ90度以上回転運動を加える、さらにより繊細な動作、特に組織の愛護的な把持拳上および牽引操作、2本指・3本指から4本指・5本指による手指による鈍的剥離機能(finger dissection)等の動作確認と仮想手術トレーニングを数十回行った(図6)。2019年度からは大腸モデルを使用してのシミュレーションも開始し(図7)、現在も継続中である。

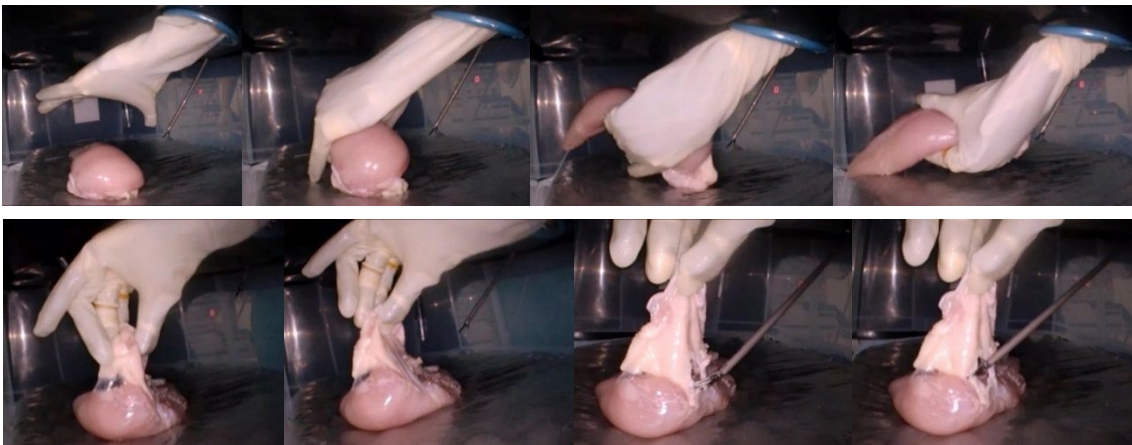


図6：疑似臓器(鶏肉)を使用した動作トレーニング

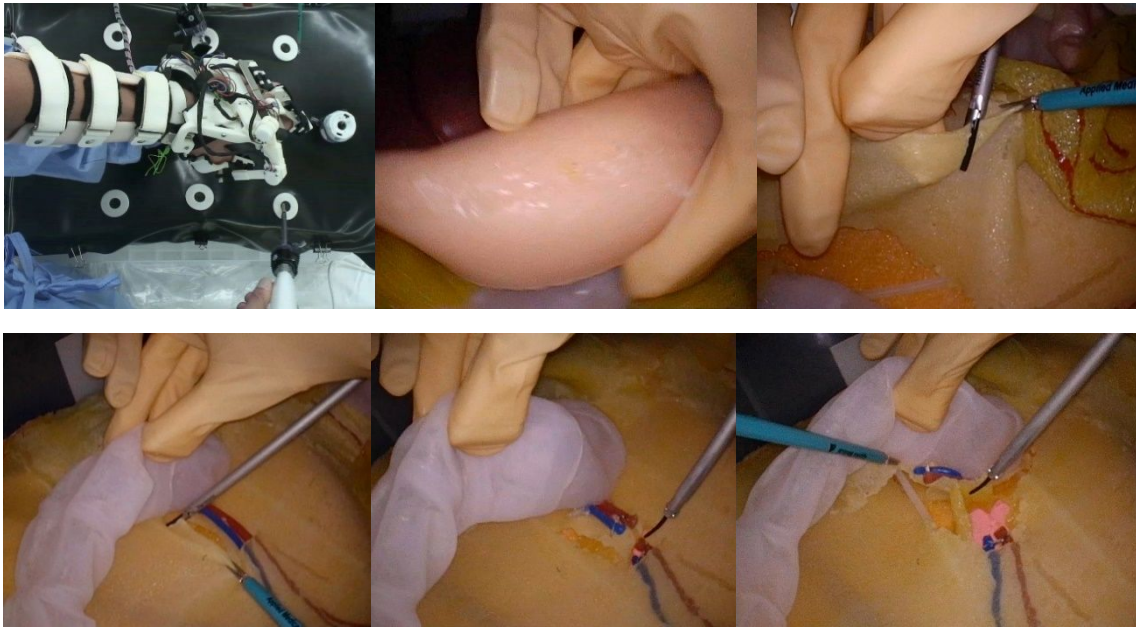


図7: 大腸モデルを使用した仮想手術シミュレーション

学内動物実験倫理委員会の承認を得た後、臓器摘出手術を目的とした動物実験(豚)を行った。実験では、日頃使用していたウンドリトラクターS(長径50mm)からXS(30mmアップ用)に急遽変更し施行したが、この判断が誤りで、ロボットハンド挿入時に第1指が脱臼骨折したため即終了し、ハンズオンセミナーとした。現在は手関節の形状を変更しXSの装着が容易となり、再動物実験に向けロボットハンドの改良・開発と仮想手術トレーニングを繰り返し行っている。

今後も引き続き、ロボットハンドを最小化するため改良を重ねていく。また臓器を愛護的に把持、圧排、押し広げを行う手指運動が可能な運動自由度をもつことも同時に開発していく。これら一連のHALS操作に加えて本来手関節には無いパワーアシスト機能付加にも発展させたい。さらに筋電義手での触覚フィードバック技術を応用し、ロボット指腹部及び手掌部に、ゴムまたはスポンジの様な柔軟な感圧センサを搭載し、その触圧に応じて操作手の指先に振動、圧覚、または電気刺激によってその感覚を提示するシステムの開発も発展させる。そして手指に電気デバイスや送水・吸引機能の付加なども考えている。

動物実験では従来、臨床的に行ってきたHALS手術とほぼ同様の配置とポート位置で、改良型ロボットハンドを用いて、胆嚢摘出術、脾臓摘出術および大腸切除・吻合術を行い、手術時間と出血量および手術完遂率を算出し、どの術式が最もロボットHALSに適合するのかを十分に検討していく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 向井正哉、横山大樹、田島隆行、小池卓也、長谷川小百合、吉井久倫、宇田周司、和泉秀樹、山本壮一郎、野村栄治、幕内博康.	4. 巻 73巻1号
2. 論文標題 閉塞性大腸癌に対する手術；一期的手術 versus 二期的手術	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 医学書院「臨床外科」	6. 最初と最後の頁 32-38
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 向井正哉、横山大樹、長谷川小百合、宇田周司、田島隆行、野村栄治.	4. 巻 第72巻第8号
2. 論文標題 大腸癌に対する2領域切除以上の3ポートHALS法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 金原出版「手術2018年7月号」	6. 最初と最後の頁 1293-1298
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 吉田 宏輝	4. 巻 -
2. 論文標題 大型臓器の把持・圧排が可能な5指ハンドを用いた腹腔鏡下手術支援システムの開発	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 横浜国立大学大学院工学府 修士論文	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yuki Anzai, Yuto Sagara, Ryu Kato, Masaya Mukai.
2. 発表標題 Development of foldable five-finger robotic hand for assisting in laparoscopic surgery.
3. 学会等名 IEEE RO-MAN 2019, 123. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 相良雄斗, 安齋祐貴, 加藤龍, 向井正哉.
2. 発表標題 大型臓器への手術操作を支援する5指ハンドのための外骨格型入力インターフェースの開発.
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安齋祐貴, 相良雄斗, 加藤龍, 向井正哉.
2. 発表標題 腹腔内に挿入し手術支援を行う折り畳み式5指ロボットハンドの開発.
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 向井正哉
2. 発表標題 大腸癌に対する低侵襲手術 ; 3-port HALS法
3. 学会等名 第31回日本小切開・鏡視外科学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 向井正哉
2. 発表標題 触覚を伴う折り畳み式小型人型ロボットハンドによる腹腔鏡下手術の開発
3. 学会等名 第73回日本消化器外科学会総会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 向井正哉
2. 発表標題 大腸癌に対する低侵襲手術；3-port HALS法
3. 学会等名 第73回日本大腸肛門病学会学術集会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 向井正哉
2. 発表標題 折り畳み式小型人型ロボットハンドによる腹腔鏡下直腸手術の開発
3. 学会等名 第117回日本外科学会学術集会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 向井正哉
2. 発表標題 小型人型ロボットハンドを用いた次世代型腹腔鏡下手術の開発
3. 学会等名 第72回日本消化器外科学会総会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 向井正哉
2. 発表標題 折り畳み式小型人型ロボットハンドによる腹腔鏡下大腸手術の開発
3. 学会等名 第72回日本大腸肛門病学会学術集会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Masaya Mukai, Ryu Kato, Hiroshi Yokoi.	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Springer Co. Ltd	5. 総ページ数 in press
3. 書名 Development of laparoscopic surgery by means of foldable small humanoid robot hands with tactile sensation for laparoscopic surgery. Surgery and Operating Room Innovation, Chapter 14	

1. 著者名 和泉秀樹、向井正哉、吉井久倫、横山大樹、宇田周司、長谷川小百合、幕内博康.	4. 発行年 2020年
2. 出版社 へるす出版	5. 総ページ数 P249-257
3. 書名 大腸癌の微小肝転移巣に対する用手補助腹腔鏡下 (HALS) -肝部分切除. 雑誌「消化器外科」2020年3月号 Vol.43 No.3	

〔産業財産権〕

〔その他〕

ROBO-HALS Project http://tes.tokai.ac.jp/oncs-hp/ROBO-HALS/Robo-HALS.htm Cyber-Robotics Laboratory http://katolab.ynu.ac.jp/
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	加藤 龍 (KATO Ryu) (70516905)	横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授 (12701)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	田島 隆行 (TAJIMA Takayuki) (80317750)	東海大学・医学部・准教授 (32644)	
研究分担者	横井 浩史 (YOKOI Hiroshi) (90271634)	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授 (12612)	
研究協力者	吉田 宏輝 (YOSHIDA Kouki)		
研究協力者	相良 雄斗 (SAGARA Yuto)		
研究協力者	安齋 祐貴 (ANZAI Yuki)		