

執刀医と手術助手のインターアクションに基づいた 次世代型手術システムの開発基盤研究

山下裕玄¹⁾, 羽多野正俊²⁾, 齊藤健²⁾, 大澤正彦³⁾, 片桐祥太⁴⁾,
金子美泉²⁾, 山崎政彦²⁾, 豊谷純⁵⁾, 今林亘⁶⁾, 櫻井裕幸¹⁾,
岡村行泰¹⁾, 萩原謙¹⁾, 岩男彩¹⁾, 武藤伸洋⁶⁾, 内木場文男²⁾, 後藤田卓志¹⁾

Development of human machine interface offering minimally invasive surgery based on current interaction system between surgeons

Hiroharu YAMASHITA¹⁾, Masatoshi HATANO²⁾, Ken SAITO²⁾, Masahiko OSAWA³⁾,
Shota KATAGIRI⁴⁾, Minami KANEKO²⁾, Masahiko YAMAZAKI²⁾, Jun TOYOTANI⁵⁾,
Wataru IMAHAYASHI⁶⁾, Hiroyuki SAKURAI¹⁾, Yukiyasu OKAMURA¹⁾, Ken HAGIWARA¹⁾,
Aya IWAO¹⁾, Shinyo MUTO⁶⁾, Fumio UCHIKOBA²⁾, Takuji GOTODA¹⁾

要旨

わが国においては、医師全体の人数が漸増しているにも関わらず、外科医師数は漸減傾向が止まらず、外科医療の安定した供給は大きな課題である。手術支援ロボットに見られるように、ロボット分野は高度化および多機能化が進み医療分野への躍進がめざましい。また、AIの医療への活用も広く検討されているところである。外科手術は、より侵襲性の低い鏡視下手術が普及しており、年々鏡視下手術件数が増加している。これらを鑑み、外科医の不足に関わらず精度の高い低侵襲外科治療を国民へ継続提供できる、次世代型手術システムの基盤開発を目的とした研究を行っている。「協働型鏡視下手術助手ロボット開発」、「腸管内手術助手マイクロロボット開発」、「外科医の思考を可視化・定量化しロボットで再現するためのデータ解析・AI技術開発」の三つで構成される。

1. はじめに

わが国において国民の高齢化率は増加の一途であり、急速に高齢化社会から超高齢社会へと進んでいる¹⁾。国内の医療費は年々確実に膨れ上がっており、医療費削減は喫緊の課題である。また、わが国の医療機器貿易は2019年、2020年と連続で1兆円を大きく超える輸入超過で²⁾、現状のまま医療費の国外流出が続くと国内経済の逼迫、現状の医療制度へ影響、結果として国民が適切な医療を受けられなくなるリスクが潜在すると言える。医療は国民の安定した生活を下支えするサービスで、その安定した供給体制の構築は間違いなく必要不可欠と言える。

わが国における死亡原因の第一位は悪性新生物で、全死亡数に占める割合は令和2年人口動態統計を参照すると27.6%である³⁾。特に胃癌、大腸癌といった消化管癌患者は罹患数が多く、癌死亡の2位、3位と上位を占める。治療法の中心にあるのは外科医による外科的切除である。消化器外科領域は従来開腹での手術が中心であったが、わが国ではじめて腹腔鏡下胆嚢摘出術が行われた1990年以降⁴⁾、急速に腹腔鏡下手術件数が増えている。創が小さく従来の開腹手術と比較し創痛は軽減、患者の早期回復も得られている。特に労働世代においては、経済的な面でも早期社会復帰はメリットが大きい。低侵襲手

1) 日本大学医学部

2) 日本大学理工学部

3) 日本大学文理学部

4) 日本大学芸術学部

5) 日本大学生産工学部

6) 日本大学工学部

山下裕玄 : yamashita.hiroharu@nihon-u.ac.jp

術のニーズは年々高まっており、癌死亡の1位である肺癌や、食道癌といった胸腔操作が必要な手術においても鏡視下手術が中心となってきている。しかしながら、鏡視下手術の担い手である「外科医」は、医師全体の人数が漸増しているのにも関わらず年々漸減傾向にある。外科専攻医の募集定員は4割弱しか充足されていない現状で、このまま推移していくと外科指導医の高齢化が進み、外科医数の絶対数減少だけでなく後進育成にも大きな影響を与える。また、医師の地域格差に付随した問題も久しく未解決な課題として存在しており、居住地域によっては国民が外科治療を安定的に享受できなくなるリスクがあると言える。

外科治療は手術支援ロボットに見られるように高度化および多機能化が進み、ロボット分野の医療分野への躍進がめざましい昨今である。また、AIに見られるようにビッグデータの医療への活用が爆発的に広がっている。これらの背景を鑑み、外科医の不足に関わらず精度の高い低侵襲外科治療を国民へ継続提供できるシステム基盤開発を、下記の三つの方向性から推進することを検討した。

2. 対象及び方法

本研究は「協働型鏡視下手術助手ロボット開発」、
「腸管内手術助手マイクロロボット開発」、
「外科医の思考を可視化・定量化しロボットで再現するためのデータ解析・AI技術開発」の三つにより成り立っている。以下に各開発テーマの詳細について述べる。

2-1. 協働型鏡視下手術助手ロボット開発

低侵襲外科手術は、一般的には執刀医1名に加えて助手として少なくとも2名の外科医が加わる。そこで、現状より少ない人数で同じ精度の手術を施行できる条件を考えると、高精度のロボットに置換することが選択肢として挙がる。実際に、現在実臨床に導入されている手術支援ロボットは、執刀医自身が執刀医・助手の全ての作業を、ロボットを介して行う人間拡張テクノロジーで、手術助手として1名の削減に成功している。しかしながら、高額な初期投資とランニングコストのために病院経営の視点から導入困難な施設が多く、その普及には限界がある。多くの施設への導入の可能性を考えると低コスト化が必須である。手術助手は術野を展開し安定さ

せる作業が中心であることから、執刀医のコントロール下に助手作業のみをロボットに置換するコンセプトを考えた。この方策によりロボット担当の作業が少なくなり、その分ロボットの小型化・低コスト化も期待できる

外科医が手術中に行っている作業を分解すると、
1. 見る 2. 把持 3. 術野の展開 4. 判断 5. 切離（剥離）・縫合で基本的に構成される。この基本動作の中で、判断、切離（剥離）・縫合は執刀医自身が行うが、手術助手は把持、術野の展開が中心である。また、鏡視下手術の画像を術者・助手に提示するカメラ助手は、手術の進行にあわせてカメラ画像の中心位置を調節する。これらの手術助手が行う作業を具現化する協働型手術ロボットを設計する。研究当初はfull manual型、同時に研究予定の人工知能データを元にして将来的に半自律型、さらに自律型に発展させることを目指す。入手しやすい部品を用いた2台のプロトタイプロボットを製作、その後改良型ロボット、ビジュアルフィードバックによる鉗子追従制御機構、執刀医の操作にあわせてトラッキングし続けて映像を提供する「カメラ助手ロボット」の実現を目指す。

2-2. 腸管内手術助手マイクロロボット開発

現在人体内で医療補助を実現したロボットはカプセル内視鏡のみである。腸管蠕動に従って排出されるまでカメラで撮影記録するのみで、外部からの操作が全く出来ず、治療介入操作は不可能である。消化管外科手術において、特に微小病変の切除において漿膜側から粘膜面の情報が全く得られないことが障壁となっている。そこで、消化管内に入ることが出来るカプセル内視鏡以下のサイズで、かつ病変の位置認識と治療操作を同時に実現できる腸管内マイクロロボットの開発を行う。直径2cm程度の脚部や医療器具が折りたたまれたマイクロロボットの試作・制御システムの開発を行う。筐体や脚部の折りたたみ機構、鉗子の収納機構をコンピュータ支援設計(3D-CAD)により設計する。光造形の3Dプリンタでプロトタイプを作製し、各機構の動作の確認を実施する。カメラを内蔵させ、収納した脚部を展開し、消化管内腔からの情報の送受信を目指す。実現可能性を鑑みながら、ロボットに実装するデバイスを取捨選択する。将来的にはカメラを内蔵させ消化

管内腔からの情報の送受信を同時に行えるロボット開発を目指す。将来的にはマクロの消化管腔から、よりミクロの血管内での処置にも繋がる学術的独自性と創造性を兼ね備える研究と考えている。

2-3. 外科医の思考を可視化・定量化しロボットで再現するためのデータ解析・AI技術開発

同じ手術であっても経験値によって執刀医、助手のそれぞれの視点・動作が異なる。外科医はモニターに描出された術野からの視覚情報から全ての行動を決めている。外科医が手術中に行っている作業の中で、経験によって決定的に差が出る領域は「見る」、「術野の展開」、「判断」である。優れた外科医が手術中にどこを注視しているのか？を実際の鏡視下外科手術においてアイトラッキングデータを収集し、外科医の思考を可視化・定量化しモデル化を目指す。協働的に手術を進める「手術助手」のアイトラッキングデータを同時に収集し、協働型ロボットの動作に反映させるAI化の基礎データを構築する。アイトラッカーを用いた執刀医と助手の注視点、腹腔鏡画像、胸腔鏡画像、医師同士の会話をマルチモーダルなビッグデータとして収集する。次に、データから「若手医師と指導医の注目点の違い」「共同注視したタイミング」といった分析や、「ベテラン医師が注目する点」「把持される点」「切除される点」を予測するAIの開発を行う。

このようなコンセプトの研究として日本大学特別研究(期間:令和4年度~令和5年度)に採択された。本稿では、本研究について述べると共に、令和4年度の研究成果および令和5年度にむけての展望を報告する。

3. 結果

前章で述べた三つの開発研究を行った結果について、令和4年度の成果を以下に示す。

3-1. 協働型鏡視下手術助手ロボット開発

令和4年度は、主に2台の協働型手術ロボットのプロトタイプを製作し、機械的構造の問題抽出することを目標に研究開発を行った。図1に申請時の3D-CADによる基礎設計図(ver.0)を示す。図1に示したロボットは、上腕部の機構をできるだけ少なくすることにより重心を下げ、その代わりに車輪によって床を移動することにより、アーム先端の位置姿勢の自由度を確保するコンセプトであった。研究開始後、この点について研究組織メンバーで実際の内視鏡手術時の執刀医や助手医師の動き等について検証・検討した結果、手術中は、特に助手医師2名はほとんど下半身を動かさず、上半身の動きだけで作業を行っていることが分かった。本ロボットシステムの主要コンセプトは、既存の手術チームや手術室にできる限り変更を与えず、2名の助手作業のロボットによる代替であるため、現在の助手作業と同様に主に上半身を用いて作業を行うために、多関節の水平リンクと垂直リンク機構の組み合わせによる機構を提案し、図2に示すような改良版ロボットについて再設計を行った(ver.1)。それぞれ向かって左側がカメラ助手ロボット、右側が術野確保助手ロボットである。図2の改良版ロボットに見える車輪は運搬用であり使用時は固定され、上半身のアーム部のみ動作する。また図1に対し図2のロボットは特にアーム先端部の垂直リンク部分が大型化されている。これは世界情勢の問題により当初予定していた回転モータの入手が困難になり、直動シリンダー方式に変更しているためである。

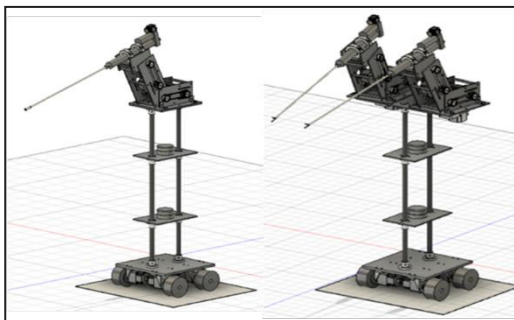


図1 3D-CADによる設計図(ver.0)

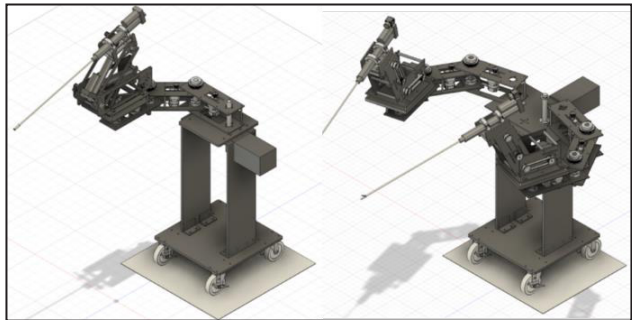


図2 3D-CADによる設計図(ver.1)



図3 試作したカメラ助手ロボット (ver.1)



図4 試作した改良版カメラ助手・術野確保ロボット (ver.2)

この改良したロボットを具現化し、有効性・問題点を明らかにするために、実際にロボットの製作を行った。図3に実際に製作したカメラ助手ロボットを示す。機構的な問題点などの確認を行った。図3を見ると図2で設計した通りのロボットが具現化されていることが分かる。このロボットを用いて各リンク機構の動作について、動作のスムーズさや部品同士の干渉などの機構的構造の問題抽出について検討を行った。その結果、先に述べたアーム先端部の垂直リンク部分の大型化に伴い水平リンクの各軸に過大な負荷がかかり、アーム先端部分が設計通りの姿勢を保てないことが明らかとなった。そのため、各金属部材寸法や回転軸の支持方法などの再検討・再設計を行い、さらなる改良版ロボットの試作を行った。試作した改良版助手ロボット (ver.2) を図4に示す。図4では、実際に研究代表者が手術にて使用している物と同型番の内視鏡カメラを本研究費で購入し、それをカメラ助手ロボットと組み合わせ、カメラ助手ロボットシステムとして用いる状態を示している。

以上、複数回の再設計・検討・試作を繰り返し、令和4年度の目標通りの協働型手術ロボットのプロトタイプ製作を達成することが出来た。なお、助手作業を行うための動作制御系の設計・作成は令和5年度で研究開発予定である。そのためのビジュアルフィードバック制御系の基礎研究開発も行った結果も示す。

前述の手術助手ロボット2台を半自律的に動作させるためには、体内環境や対象部位（臓器や血管など）を自動で認識し、その結果を用いてロボットの動作指示を算出する必要がある。ここで、実際の手術動画を用いて研究開発を行うためには倫理委員会等の承認が必要であるが、これは今後の研究目標である。また、その委員会承認のためには、どのような現状システムがあり、どのような手術動画情報が必要かを、審議資料として示す必要がある。よってまず、基礎研究として、研究分担者の理工学部研究室にある対象物を用いて基礎研究を行った。患者の体内環境は千差万別であり、手術中の対象部位・位置姿勢特定にはAI（人工知能）を用いた方法が適していると考え研究を行った。ここで、対象物の画像的な認識と、実際の大きさや位置・姿勢の幾何学的な認識は、別々の手法が必要となり、前者はカメラ、後者はレーザーセンサを用いることが工業的利用には一般的であるが、これを手術に応用する場合、現在入手できるレーザーセンサで体内に入れられるサイズの物は無い。よって、内視鏡カメラ映像を利用して、物体検出のみならず、その位置姿勢を認識する手法について研究を行った。その際、先に述べたように、手術映像の入手は困難であったため、工作物である木片および自然物である農作物を対象に基礎AIシステムの研究開発を行った。その結果の一例を図5～7に示す。図5は直方体の木片の位置姿勢をAIを用いて認識した結果の一例であ

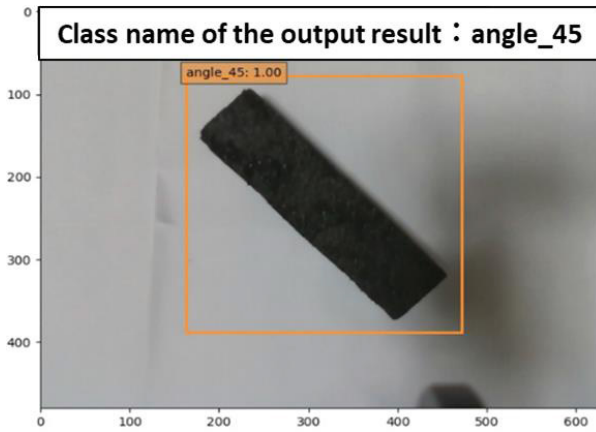


図5 対象物の位置姿勢認識結果の一例

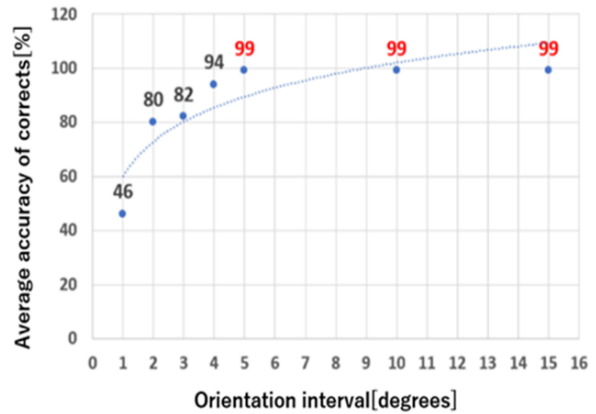


図6 姿勢の認識精度の一例

り、この場合は45°の姿勢の木片であることが正しく認識出来ていることを示している。またAIにより画像情報のみで、どの程度の姿勢差まで認識出来るかについて研究を行った結果の一例を図6に示す。図6より、5°以上の姿勢差は99%の精度、2~4°の姿勢差は80%、1°の姿勢差は46%の精度で認識出来ていることが分かる。これにより、術野確保助手ロボットの鉗子先端で対象部位を把持したい場合、画像情報とAIを用いてほぼ人間と同程度の精度で認識出来る可能性があることが明らかとなった。なお、この結果については、国際会議AROB 28th 2023にて「Recognition for Orientation of Target Objects Using Object Detection Algorithm」という題目で研究発表を行った⁵⁾。

また図5では、対象物の位置を矩形領域内として認識しているが、手術に用いる場合には、更に正確な対象物の形状や位置姿勢を認識する必要がある。そこで、インスタンスセグメンテーションと呼ばれる更に高度なAI物体検出システムについて研究開発を行った。その認識結果の一例を図7に示す。これは木片よりもさらに自然物に近い農作物を対象物とした結果であり、図より対象物の領域を正確に塗りつぶしており認識出来ていることが分かる。以上により、ビジュアルフィードバック制御系のための認識システムについて、AIを用いた認識システムの構築が可能と評価した。なお、AIによる認識精度は学習画像枚数に依存し、数万枚の画像が必要となる。そのため手術動画の使用と教師画像の作成は今後開発予定である。



図7 AIを用いた領域抽出の一例

3-2. 腸管内マイクロロボット開発

令和4年度は、3D-CADを用いて腸管内マイクロロボットの筐体デザインおよび機構設計を実施した。図8に設計した腸管内マイクロロボットを示す。ロボットは図8aに示すように、直径20mm、全長50mmで設計した。図8bに示す通り3本の脚部を120°毎に配置し、成人の大腸の直径である6cm程度まで展開する設計とした。脚部の展開機構にはスコットラッセルの厳正直線運動機構を採用し、直線運動を示す機構のなかで最も単純な機構によって、

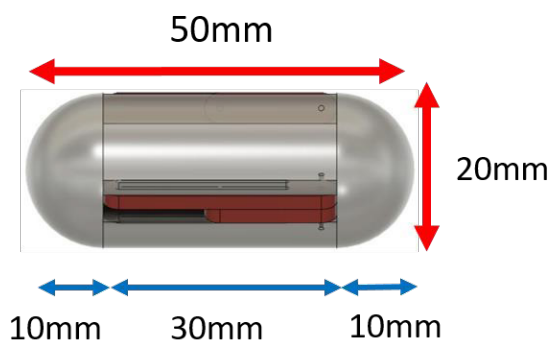
省スペース化を実現した。

図9に設計した腸管内マイクロロボットの脚部機構を示す。脚部機構の駆動には送りネジ方式(図9a)およびウォームギヤ方式(図9b)を別々に設計した。送りネジ方式による脚部機構において、中心にM3の3角ネジを送りネジとして用い、送りネジを回転することでM3のナットが移動する。ナットの移動に伴い、脚を固定したパーツが展開することで脚部の開閉を行う(図9a)。ウォームギヤ方式による脚部機構は、中心にウォームギヤを配置し、ウォームギヤが回転することでBar1に施したネジが移動する事で脚部の開閉を行う(図9b)。

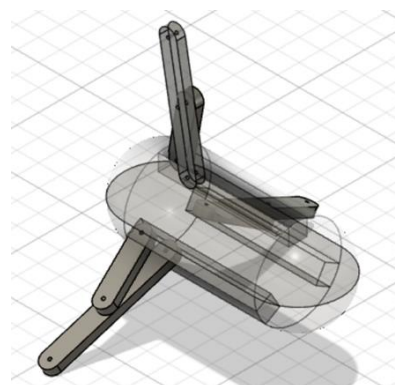
送りネジ方式およびウォームギヤ方式それぞれに長所と短所が存在するため、実際に試作して脚の展開実験を行った。

図10に試作した腸管内マイクロロボットを示す。図10aは脚部機構に送りネジ方式を採用し、図10bはウォームギヤ方式を採用した。筐体や部品はそれぞれの要求精度に基づいて熱溶解積層型3Dプリンタや光造形3Dプリンタで試作した。試作した腸管内マイクロロボットはモックアップではなく、実際に可動部を備えているため、モータを接続することで脚部が展開可能である。

図11にウォームギヤ方式による脚部機構のモータによる駆動実験の一例を示す。図11aは脚部展開前を示し、図11bは展開後を示している。図中左側はDCモータであり、DCモータの回転動作を脚部機構が脚部の展開動作に変換していることを示している。現在ロボット内に搭載可能なDCモータによる駆動を目指している状況である。

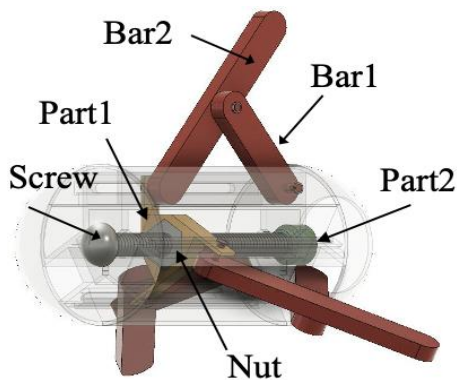


(a) 腸管内マイクロロボットの外径およびその寸法

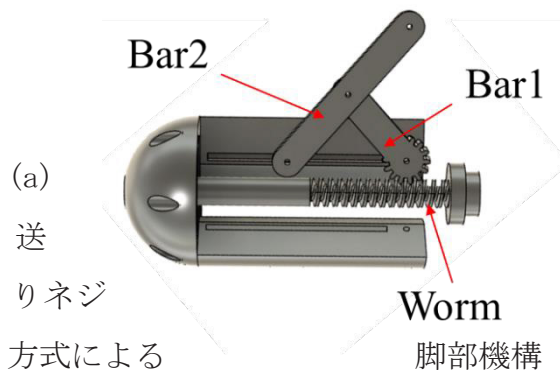


(b) 脚部を展開したイメージ図

図8 設計した腸管内マイクロロボット



(a) 送りネジ方式による脚部機構

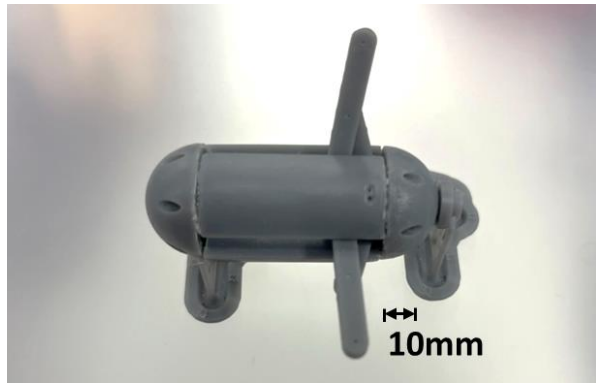


(b) ウォームギヤ方式による脚部機構

図9 設計した腸管内マイクロロボットの脚部機構



(a) 送りネジ方式による脚部機構の試作



(b) ウォームギヤ方式による脚部機構の試作

図10 試作した腸管内マイクロロボット



(a) 脚部展開前



(b) 脚部展開後

図11 ウォームギヤ方式による脚部機構のモータによる駆動実験

また、医療応用に向けたマイクロロボットの開発と題して、生物試料分析学会が発行する論文誌（生物試料分析）の特集に本研究の計画を紹介した⁶⁾。

3-3. 外科医の思考を可視化・定量化しロボットで再現するためのデータ解析・AI技術開発：

外科手術での医師のアイトラッキングデータを用いた観察研究（日本大学医学部研究倫理審査承認番号20221202）の承認を令和4年12月12日に受け、日本大学病院消化器外科での鏡視下手術を対象にアイトラッキングデータの収集を開始した。鏡視下手術モニターにTobii ProアイトラッカーおよびTobii Proラバスクリーンエディションを搭載したコンピュータと接続し、執刀医と助手の注視点、腹腔鏡画像を収集した。まず記録の妥当性・正確性を

検証する目的に、3例の低難度手術を選択し、執刀医のアイトラッキングデータのみを収集した。

図12,13に具体例を提示する。執刀医の注視点の軌跡が赤丸で表示されているが、注視が停留した場所は濃い赤で描出されている。図12では腹腔鏡下鼠径ヘルニア手術中の縫合閉鎖手技中の視線データであるが、画面上方から針の刺入点に向かって注視点が移動し、刺入点に的確に一定時間注視し続けていることが分かる。図13では切離する予定の胆嚢管に剥離鉗子が挿入されているが、鉗子挿入位置に一致して注視していることが分かる。執刀医の視線履歴の記録は問題なく行えることが確認された。

これを踏まえ、手術の助手作業に特化したロボット実現にむけたAI開発の第一歩としても、執刀医・手術助手の視線情報から「外科医の判断・行動パ

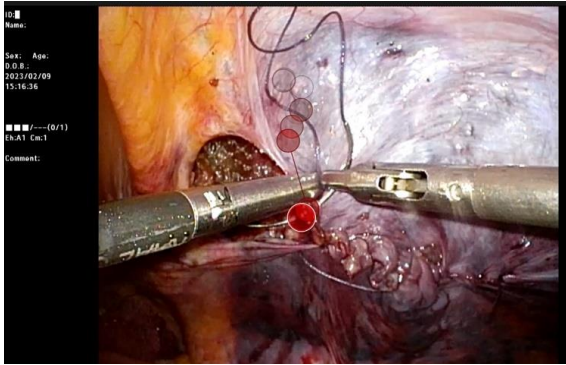


図12 腹腔鏡下鼠径ヘルニア修復術の執刀医のアイトラッキングデータイメージ

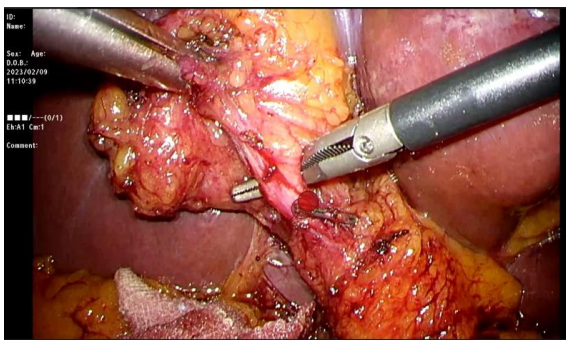


図13 腹腔鏡下胆嚢摘出術の執刀医のアイトラッキングデータイメージ

ターン」に関する知見の発見を目指している。初期検討として、執刀医と助手の視線データの特徴について比較を行い、執刀医と助手でどのように視線情報に差が見られるかの検討を考えている。手技が比較的シンプルな低難度手技である鏡視下手術のデータ解析を用いて、経験手術数の違いによる視線データの違いを今後検証していく予定である。指導医の視線データも取得することで、模範手技を可視化し、教師データとしてのモデル化を行うこともあわせて検討している。執刀医と助手のアイトラッキングデータを同時に収集しており、視線履歴の差異からの検討で、2名の外科医のインタラクションの可視化が出来るかどうか検証を進めていきたい。

4. 考察

協働型手術ロボットのプロトタイプ製作については、複数回の再設計・検討・試作を繰り返し、令和4年度の目標通りの成果を達成することが出来た。ビジュアルフィードバック制御系については、臓器画像ではないが、AIを用いた物体の位置姿勢認識を

行うことが出来た。それに加え、さらに新しいインスタンスセグメンテーションによる詳細な形状抽出を行うシステム構築を達成することができた。次年度以降に向けた基礎システム製作が実現できたと考えている。

腸管内マイクロロボットの開発では、まずは研究計画に従って、プロトタイプロボットの筐体デザインおよび特に重要である脚の展開機構設計を実施した。脚の展開機構は2種類設計し、3Dプリンタを用いて腸管内マイクロロボットのプロトタイプを試作し、モータで試作したロボットの駆動に成功した。令和5年度の計画においては腸管内マイクロロボットのプロトタイプ試作、ROS2を用いた制御システム開発を予定していた。従って腸管内マイクロロボットの開発における当初の研究目的に対する達成度は当初の計画以上に進展している。

外科医の思考を可視化・定量化しロボットで再現するためのデータ解析・AI技術開発については、アイトラッキングデータを収集するコンピュータ、デバイスの納入が遅れ2022年11月下旬となった。鏡視下手術が施行される日本大学病院手術室で、コンピュータとモニターの接続試験を翌12月に行い、データ収集に不足したコード類が判明した。2023年1月に再度接続設定を行った後、データ収集開始が2023年1月下旬まで遅れた。しかしながら、初回3例の手術において執刀医の注視点軌跡が正確にデータ収集できることの確認ができた。また、少ないデータ数だけでの検討であり検証が必要ではあるものの、確信を持って手術操作を行う際には執刀医の凝視時間が長い傾向があった。執刀医が注視する持続時間に応じたカメラ助手ロボットとの連携ができれば、カメラのフォーカス点を自動調整する機能付加により執刀医がストレスなく手術を進められる可能性があることを新規に考案した。低難度手術を中心に、徐々に中難度手術へと対象を拡大し、アイトラッキングデータの解析による視線データのモデル化を目指していきたい。執刀医と助手の視線データのヒートマップの差異、軌跡の違いを検証することで、手術中のインタラクションを明らかにしていく。

5. 結 語

外科医の不足した条件で精度の高い低侵襲外科治療を国民へ継続提供できるシステム基盤開発について、三つの方向性から研究推進した結果について、令和4年度の研究成果と令和5年度の展望について述べた。2024年に適用となる「医師の働き方改革」に表されているように、医師の長時間労働や医療機関全体としての効率化は早急な解決を求められている。協働型の手術ロボットは、遅滞ない高速通信技術下に遠隔操作可能となれば、医療崩壊地域への人的支援となるポテンシャルを有すると考えており、多くの課題を解決しうる創造性を有する。次世代型手術システム基盤開発を達成するために必要な技術研究を今後も進めて行けたらと考えている。

謝辞

本研究は令和4年度日本大学特別研究の助成を受けたものである。記して感謝する。

文 献

- 1) 総務省 統計トピックスNo.126 統計からみた我が国の高齢者-「敬老の日」にちなんで- <https://www.stat.go.jp/data/topics/pdf/topics126.pdf>
- 2) 厚生労働省 薬事工業生産動態統計年報 <https://www.mhlw.go.jp/topics/yakuji/2021/nenpo/>
- 3) 厚生労働省 令和2年(2020)人口動態統計 <https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/kakutei20/index.html>
- 4) 石川泰郎, 酒井滋, 山川達郎, 阿部宏之, 賀古真, 永井孝三: 腹腔鏡下胆嚢摘出術 - 本邦第1例を含む5例の経験. 日臨外医学会誌(1991) 52, 859-864.
- 5) Motoki Akazawa, Tomoya Tanaka, Masatoshi Hatano, Recognition for Orientation of Target Objects Using Object Detection Algorithm, Proceedings of 28th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB2023), 2023, pp.1183-1186
- 6) 齊藤健, 金子美泉, 内木場文男, 佐伯勝敏, 武藤伸洋, 見坐地一人, 山下裕玄, 後藤田卓志. 医療応用に向けたマイクロロボットの開発. 生物試料分析. 2022; 45(4):169-173.