

## 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の成果報告

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

### Report on the results of fundamental research on the development of a next-generation surgical system based on interaction between surgeons and surgical assistants

Hiroharu YAMASHITA<sup>1)</sup>, Masatoshi HATANO<sup>2)</sup>, Ken SAITO<sup>2)</sup>, Masahiko OSAWA<sup>3)</sup>,  
Shota KATAGIRI<sup>4)</sup>, Minami KANEKO<sup>4)</sup>, Masahiko YAMAZAKI<sup>4)</sup>, Jun TOYOTANI<sup>5)</sup>,  
Wataru IMAHAYASHI<sup>6)</sup>, Hiroyuki SAKURAI<sup>1)</sup>, Yukiyasu OKAMURA<sup>1)</sup>, Ken HAGIWARA<sup>1)</sup>,  
Shinyo MUTO<sup>6)</sup>, Fumio UCHIKOBA<sup>2)</sup>

#### 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かかわらず、外科医師数の漸減傾向は止まっていけない。外科医療の安定供給は将来的に大きな課題となると推測される。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<sup>1)</sup>。これと比例するように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<sup>2)</sup>、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1位は長らく悪性新

生物であり、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<sup>3)</sup>。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<sup>4)</sup>、急速に腹腔鏡下手術が普及し手術施行件数が増えている。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

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

責任者連絡先: 山下裕玄, yamashita.hiroharu@nihon-u.ac.jp

が中心となってきた。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。給与体系と労働時間のバランス不均衡のためであろうか、外科を志望する医師が増えないまま推移している。このままでは外科医数の絶対数減少だけでなく、外科指導医の高齢化に伴う後進育成体制にも大きな懸念を生じる。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3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3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。

### 1. 協働型鏡視下手術助手ロボットの開発:

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、高額の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。令和4年度は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したが、令和5年度で産業用モータを用いて改良型ロボットの製作を行い、AI（人工知能）による物体検出に基づいたビジュアルフィードバックによるカメラ追従制御、および執刀医の視線にあわせて対象物を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。最低限の結果として、模擬臓器に対して、執刀医の所望する部位を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. 腸管内手術助手マイクロロボットの開発:

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が可能だが、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は、漿膜側から粘膜面の情報が経口内視鏡情報なしでは全く得られないことが課題である。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実現を目的に開発する。令和4年度においては、直径2cmのマイクロロボットの筐体や脚部展開機構をコンピュータ支援設計（3D-CAD）により設計した。また、光造形の3Dプリンタでプロトタイプロボットを試作した結果、模型用の一般的な小型モータおよびギア

ボックスを用いて駆動に成功した。令和5年度においては、ステンレスを用いてプロトタイプロボットを試作する。また、腸管内を移動するための移動機構についても検討する。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。

### 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技術の開発:

腹腔鏡手術において、外科医はモニターに映し出された視覚情報から手術動作を決めている。そこで、外科医が手術中に注視している箇所を、実際の手術中にアイトラッカーを用いて視線データを収集、視線データから外科医の思考を可視化・定量化することで手術助手AIの実現に向けた知見の収集および技術開発を目指す。

定量化にあたっては、腹腔鏡手術において収集したデータのうち、視線データを用いて分析する視線ベースのアプローチと、腹腔鏡で取得した映像を用いて分析する画像ベースのアプローチの2つのアプローチを用いる。視線行動から読み取れる外科医の状態と、腹腔鏡から得られる施術状態や行動に関する情報を統合することで、外科医の思考をより正確にモデル化することができる。

また、手術助手AIの実現に向けた一歩として、手術助手の作業の1つであるカメラ操作を自動化するシステムの開発を目指す。前述の外科医の思考を可視化・定量化することによって得られた知見をシステムに流用することで、人間の助手が行っている、執刀する外科医の意図に則したカメラ操作を高い精度で自動化することが期待できる。

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5年度の研究成果および今後の展望を報告する。

## 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5年度の成果を以下に示す。

### 1. 協働型鏡視下手術助手ロボットの開発:

令和5年度は、まず、令和4年度に製作した2台の協働型手術ロボットに対して、機構的な問題点の

改良および産業用モータを用いて新たに改良型ロボットの製作を行った。図1に令和4年度に製作したロボット、図2に令和5年度に製作した改良型ロボットを示す。それぞれ中央部にあるのは実際の手術において使用されているオリンパス製の内視鏡カメラシステムであり、それぞれ左手にカメラ助手ロボット、右手に術野確保助手ロボットを示す。

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、また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機構と垂直リンク機構の組み合わせによる機構を発案した。令和4年度で試作したロボットの基礎動作実験においてコンセプト通りの動作結果が得られた。そのため、基



図1 令和4年度に試作したロボット

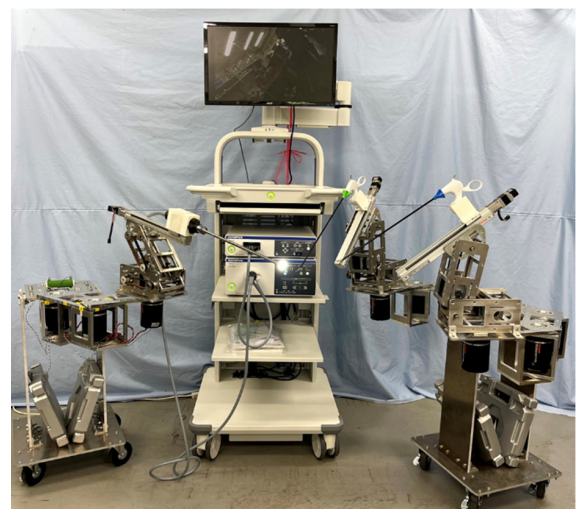


図2 令和5年度に製作した改良型ロボット



本的な構造である水平3関節・垂直3関節は変更なく、モータ等の駆動系のみ新型コロナウイルス感染症蔓延に伴う制限が解除され購入が可能となった産業用モータに変更した。このモータはモータ本体・ギア・センサー・制御回路が一体となったものであり、また本体が構造体として機能することによりシンプルかつ信頼性の高いタイプである。これにより全体として構造を簡素化できガタ・バックラッシュを減少させることができるとともに部品点数の減少や信頼性を向上させることができた。さらに部品点数を減少させることができたために軽量化につながり、令和4年度モデルで問題となっていたロボットの過重量を解決することができ、設計で期待していた通りの性能を得ることができ、スムーズな動作が可能であることを確認できた。

この新たに製作開発したロボットを用いて、動作制御系の設計・ソフトウェア作成を行った。その結果を以下に示す。本研究で目標とする半自律型の手術助手ロボットの実現のためには、ロボットの基本動作はロボット自身が判断することと、執刀医の意志をセンシングし制御動作に反映することの両方が必要である。そこで本研究では、前者のロボット自身の自律化のためには、AIを用いた対象物の識別および自然背景からの物体検出システムを構築した。

また後者の執刀医の意思のセンシングには、執刀医の視線情報を用いた。以下に詳細について述べる。AIを用いた物体検出には“インスタンスセグメンテーション”と呼ばれる手法を適用した。これは自然背景から対象物が存在するエリアを矩形で示すだけでなく、対象物の領域をドット単位で検出することができる。本研究では対象物として、現在内視鏡手術で最も件数の多い胆嚢摘出手術をターゲットとし、ロボットのリアルタイム制御系の開発のためにシリコン製の内視鏡手術練習材を用いた学習データ作成と、今後の研究用として実際の手術動画を用いた学習データ作成を行い用いた。これらの学習データを用いてAIのトレーニングを行った。その学習データを用いた物体検出結果より、カメラ映像内における対象物の位置を特定することができ、その対象物を常に映像の中心で捉え続けるためのロボット制御系（これをビジュアルサーボ系と呼ぶ）の開発を行った。図3にAIによる対象物体検出とロボット動作実験環境を示す。ロボットの先端にはカメラが設置され、被験者が持ったシリコン製のターゲットを動かし、ロボットはカメラ映像とAIによるインスタンスセグメンテーションにより検出した対象部位の位置座標情報を用いて、常に画面の中央で対象部位を捉え続けるようにロボットを動作させ

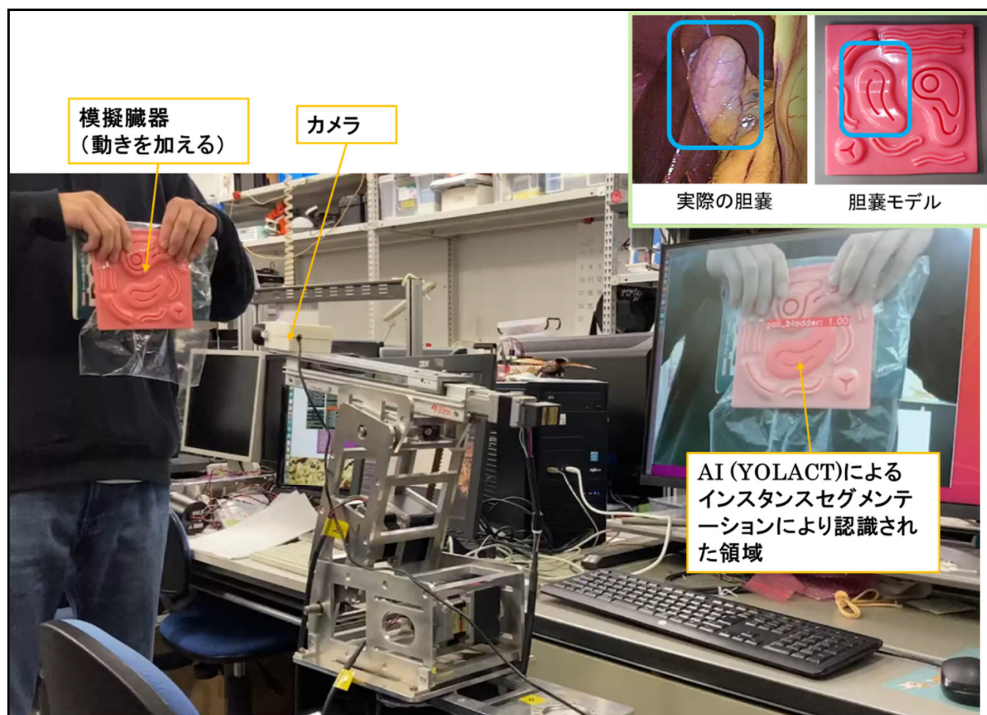


図3 AIによる対象物体検出とロボット動作実験環境

た。ここで、本来の内視鏡手術を模擬するためにはテーブル上に水平に置かれた模擬体内にターゲットを設置した状況で実験を行うべきであるが、カメラを挿入する体表に設置したトロッカー周りの回転運動等に変換するための座標変換計算等を実装する必要があり、今後の課題とする。

図3のモニター上には得られたターゲットの映像とともに、インスタンスセグメンテーションで検出された対象部位が100%の確率（毎サンプリングタイムにおける認識率は95%以上）として濃いピンク色で得られている。また被験者がターゲットを動かす、それをビジュアルサーボにより常に画面中央でとらえ続けることが確認できた。この研究成果について国際会議AROB2024にて発表を行った<sup>6)</sup>。

次に執刀医の視線入力によるロボット動作のリアルタイムオーバーライドを行うためのシステムについて構築を行った。図4に構築したシステムの有効性を確認するためのロボット動作実験環境を示す。視線入力にはtobii社製のアイトラッカーを用いた。アイトラッカーにはメガネタイプの装着型もあるが、本研究ではモニター下部にセンサーを設置する非接触型を採用した。これは実際の手術環境においても視線データ解析用に使用されているものと同型

機種である。図4において、実験者が図3と同じターゲットを手を持って動かし、それをロボットカメラで撮像することによりモニターに表示されたターゲットを被験者が目視し、その視線をセンサーで捉えてロボットにフィードバックし、ビジュアルサーボを行う。この視線情報を用いて執刀医が注視している点を常に映像の中心で捉え続けるためのビジュアルサーボ系の開発を行い、基礎実験の結果、被験者の視線の通りにロボットが動作することが確認できた。しかし、被験者の視線の動きとロボットの動作が共振し、被験者の酔いが発生することなどが新たな問題点として明らかになった。この点については今後の研究課題である。

以上、改良型ロボットの製作と、それをターゲットとしたAIと視線情報をハイブリッドで用いるビジュアルサーボシステムの研究開発を行い、本研究期間中における目標をほぼ達成することができた。また新たな問題点等も明らかとなったため、今後も研究開発を進める予定である。

## 2. 腸管内マイクロロボットの開発:

令和4年度に、3D-CADを用いて腸管内マイクロロボットの筐体および脚部機構の設計を実施した

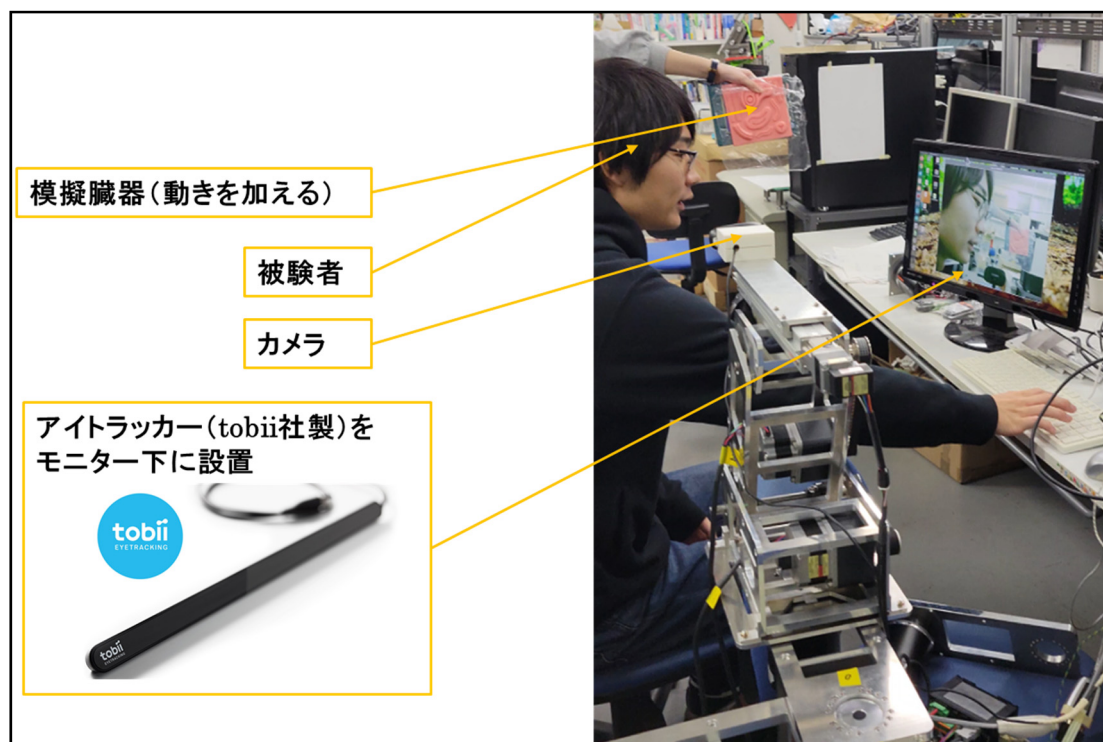


図4 視線入力システムによるロボット動作実験環境

(図5)。ロボットの筐体は直径20mm、全長50mmで設計し、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。脚部機構の駆動には図5 (a) に示した送りネジ方式<sup>7)</sup>および図5 (b) に示したウォームギヤ方式<sup>8)</sup>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が開閉する。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が開閉する。

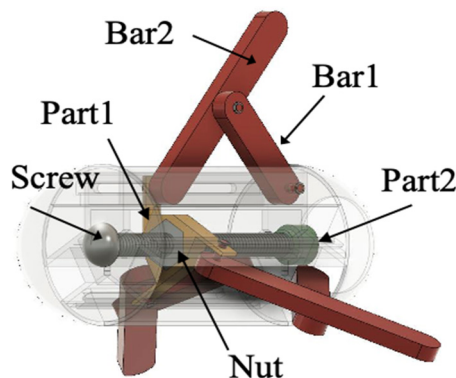
送りネジ方式およびウォームギヤ方式それぞれに長所と短所が存在するため、実際に試作して脚の展

開実験が必要である。

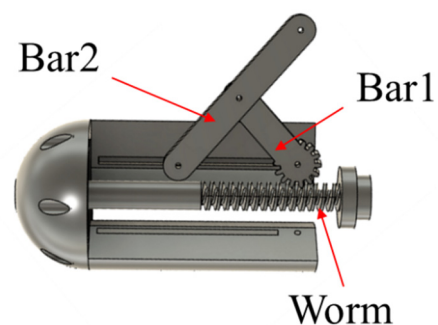
令和5年度には新たにウォームギヤによる脚部展開機構および送りネジによるロボットの移動機構を持つ腸管内マイクロロボットを設計した(図6)。脚部展開機構は送りネジと比較してより小型化が可能であるウォームギヤを採用した。移動メカニズムは図6 (b) に示した通り、ロボットの伸び縮みには送りネジを採用し、前部と後部に設けた脚部を交互に展開してミミズのように移動する機構とした。

図7にステンレスを放電加工して試作した、腸管内マイクロロボットを示す。図中左から順番に、脚部機構に送りネジ方式を採用したロボット、ウォームギヤ方式を採用したロボット、脚部展開機構および移動機構を持つロボットを示している。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8にウォームギヤ方式による脚部機構のモータ

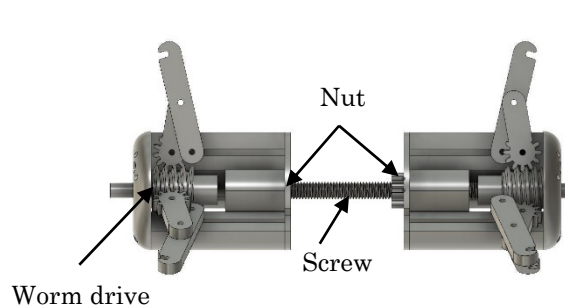


(a) 送りネジ方式による脚部機構

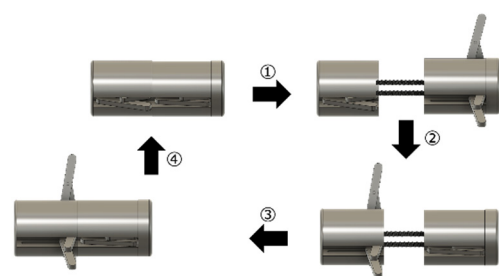


(b) ウォームギヤ方式による脚部機構

図5 設計した腸管内マイクロロボットの脚部機構



(a) 移動機構を持つ腸管内マイクロロボット



(b) 移動メカニズム

図6 設計した脚部展開機構および移動機構を持つ腸管内マイクロロボット



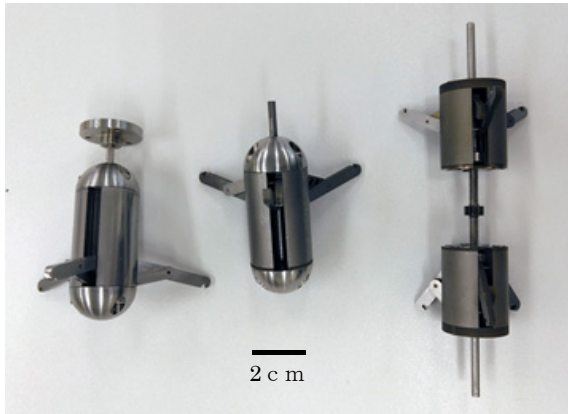


図7 試作した腸管内マイクロロボット

による駆動実験の一例を示す。試作した腸管内マイクロロボットは、直径3.2mm、長さ12mm、発生トルク  $1.2 \times 10^{-2} \text{mN} \cdot \text{m}$  の超小型電磁モータでの駆動に成功した。現在、医療機器製造業の許可を取得している企業と小型電磁モータの供給について相談している状況である。

### 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 ラボ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。

令和5年度は、昨年度より引き続き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行い、執刀医と助手の視線データおよび腹腔鏡から得られる画像データを収集した。加えて、一部の手術においてはマイクを設置して術中の指示等のコミュニケーションの様子も収集した。

収集したデータに対して、視線データに対するアプローチではまずアイトラッカーから得られる注視箇所の遷移と視線状態について分析を行った。分析の結果、手術助手の方が術野全体を見ようとする視線移動が多いのに対して、執刀医は切除や剥離と

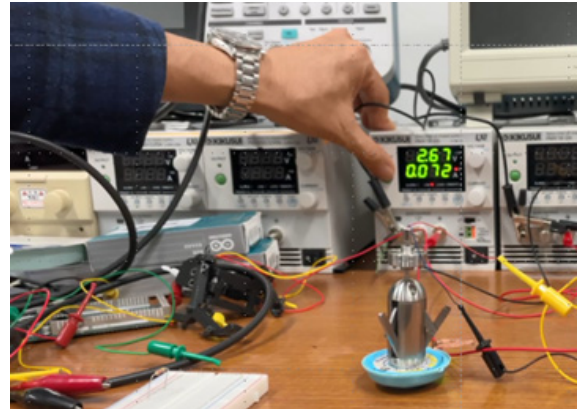


図8 ウォームギヤ方式による脚部機構のモータによる駆動実験

いった操作の際に患部に注目するため、特定箇所を注視する行動が多い傾向がみられた。また、瞳孔径について比較したところ、助手の方が平均的に大きく分散も大きい傾向がみられた（図9）。

交感神経が優位になると瞳孔径が大きくなることから、手術助手の方が手術中に緊張状態にある可能性が示された。また、外科医の執刀経験数の違いにより、担当手術助手が異なると図9に示す全体的な傾向とは逆に、執刀医よりも瞳孔径が小さく分布も同程度の場合もあった。一般的に、腹腔鏡下胆嚢摘出術は外科専修医が執刀する機会が多く、その指導的助手の精神的負荷が大きい。一方で、執刀医が既に多くの手術経験を有している場合には、手術助手の精神的負荷は軽度であるのが通常である。全体での解析結果は図9の通りであるが、瞳孔データから、精神状態に加えて外科医の経験量が読み取れる可能

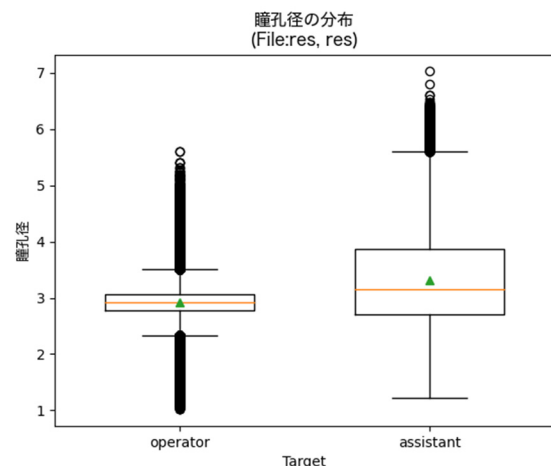


図9 執刀医と助手の瞳孔径の分布

性はあると推測する。

また、特定の箇所を注視しようとする際の視線行動である特定の探索と、視界全体を大まかに把握する際の視線行動である拡散的探索と呼ばれる2つの特徴的な視線行動パターン<sup>5)</sup>に着目して分析を行った(図10)。分析の結果、手術中に拡散的探索から特定の探索へと切り替わっている箇所がカメラ操作や鉗子の入れ替えといった動作と関連していることを明らかにした。また、特定の探索を行っている際に剥離や切除といった大きな変化を及ぼす動作を行っている傾向にあることが分かり、これらの視線行動から外科医の思考の一部を可視化できる可能性を明らかにした。

画像データを用いるアプローチでは、映像における前後の画像フレームの差分から腹腔鏡カメラの移動方向や移動量といったカメラ操作を推定するシステムの開発を行った。カメラ操作を推定する手法として、画像から特徴点を検出してフレーム前後の差分から推定する方法(図11)と前後の画像全体の幾何学的変換行列から推定する方法を比較し、幾何学的変換を利用することで安定した移動量を推定することが可能であることを示した(図12)。

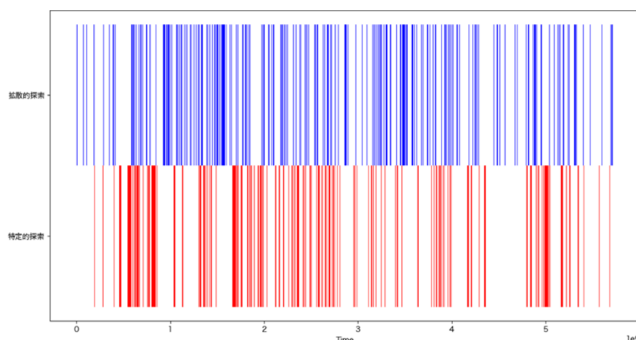


図10 手術中の特定の探索(赤線部)と拡散的探索(青線部)の可視化

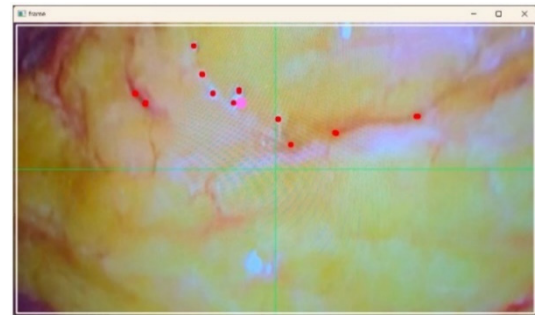


図11 画像から特徴点を検出した画像(赤い点が特徴点)

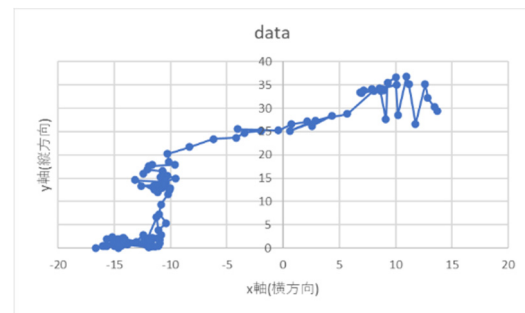


図12 動画から検出したカメラ動作

加えて手術助手AIの開発に向けた一歩として、手術助手の行動の中でも腹腔鏡カメラの操作に着目し、カメラ操作中のズーム操作を自動化することを目的としたプロトタイプシステムを開発した(図13)。

プロトタイプシステムでは、視線ベースのアプローチで扱った特定の探索や注視点のバラつきといった視線パターンに応じてズームイン・ズームアウトを決定することで、術者が注目したい箇所へズームし、注目が終わるとズームアウトする。実際の腹腔鏡手術の映像を用いて簡易なケーススタディを行い、バラつきを用いた判定では急激なズーム変化が起こることによる不快感を与える課題がある一方で、特定の探索に基づく判定ではユーザのズーム意

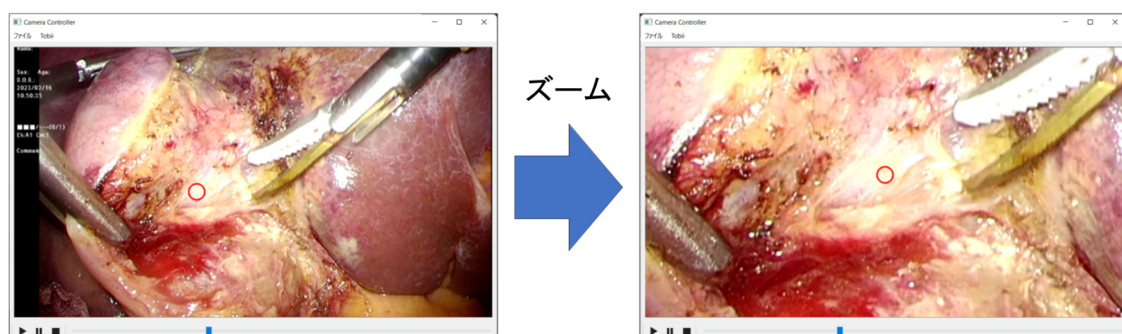


図13 視線行動に応じた自動ズームシステム



図が反映されにくいという課題が明らかになった。今後は画像ベースのアプローチによる施術状態の認識を統合した判定方法の開発に加えて、ズームの閾値や速度といったパラメータの決定方法の開発が求められる。

#### 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、令和4年度で明らかになった問題点の解決と新型モータを用いた新しいロボットの製作をおこなった。また動作制御系の構築については、模擬臓器に対してAIのインスタンスセグメンテーションを用いた物体の領域検出を行い、ビジュアルサーボを実現することができた<sup>6)</sup>。さらに視線を捉えて注視点に対してもビジュアルサーボを実現することができた。これにより令和4年度および令和5年度の2年間で、協働型手術ロボットの基礎研究開発結果を達成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、令和4年度の研究で実施した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に基づき、プロトタイプロボットを作製した<sup>7), 8)</sup>。ステンレスを放電加工して作製した、腸管内マイクロロボットのプロトタイプロボットは、超小型電磁モータでの駆動に成功した。現在、プロトタイプロボット内に実装可能な小型電磁モータの選定や、内視鏡メーカとの共同研究を模索している状況である。将来的にはロボットにカメラシステムを実装し、従来の内視鏡システムに代わる次世代型の内視鏡システムを確立する研究を実施する予定である。

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、視線ベースのアプローチについては特定の探索が特定の手術動作の開始時に現れること、切除や剥離といった操作に際して頻繁に現れることが明らかになり、線運動から外科医の思考の一部を可視化することが可能であることを明らかにした。加えて、外科医の経験によって視線状態に違いがあり経験の違いについても可視化できる可能性を明らかにし、今後の研究の発展の方向性を広げることができた。また、画像ベースのアプローチでは腹腔鏡の映像からカメラの移動方向および移動量を推定するシステムを開発することができた。加えて、手術助手のカメラ操

作、特にズーム操作を自動化するプロトタイプシステムを開発し、視線行動に基づくズーム判定方法やズーム速度に関して課題点を明らかにした。当初の計画通り、手術助手AIの開発に向けてシステム開発の一步を踏み出せたことに加え、より外科医の思考を正確に可視化・定量化するために2つのアプローチを考案することできたことから、当初の計画目標を概ね達成できたと考えている。

#### 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、3つの方向性から研究推進した結果について、令和5年度の研究成果と今後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) 淳夫吉高, 謙太郎西田, 宗平嶋: 絵画鑑賞時の眼球停留の時間的な発生頻度に着目した注目状態の検出, 情報処理学会論文誌, 50, 5, pp. 1467-1476 (2009).
- 6) Motoki Akazawa, Kosuke Arai, Rina Karasawa, Yusuke Kobayashi and Masatoshi Hatano, Visual Feedback Systems for Camera Assistant Robots with AI, Proceedings of 29th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB2024), 2024, pp.1197-1200

- 7) 高橋 知宏, 大工原 裕希, 熊倉 佑樹, LYU SHUXIN, 森下 克幸, 齊藤 健 (2023): “小型医療ロボット用の送りネジ機構で展開する脚部の開発”, 日本機械学会第14回マイクロ・ナノ工学シンポジウム予稿集
- 8) 陳恩, 高橋知宏, 大工原裕希, 熊倉佑樹, LYU SHUXIN, 森下克幸, 齊藤健 (2023): “ウォームギヤを用いて脚部機構を展開する医療用マイクロロボットの検討”, 令和5年度(第67回)日本大学理工学部学術講演会講演論文集, pp.589-590