

# ペットを対象とした自律型手術カメラ助手ロボットの研究開発

日本大学 理工学部 精密機械工学科  
羽多野 正俊

## 1. はじめに

本研究の目的は、近年増加するペット手術において獣医師が不足している問題に対して、助手作業に特化した自律型手術助手ロボット、その中でもまず自律型手術カメラ助手ロボットを新たに研究開発することである。これにより、獣医師とロボットの協働作業によりペットの高度医療を目指すものである。

人間に対する手術において現在主流となっている低侵襲手術である腹腔鏡手術は、患者の腹部に10mm程度の穴を複数開け、カメラや鉗子を挿入し、モニターを見ながら手術を行うものである。この時、患部を切除するための「執刀医」に加え、体内に挿入したカメラを保持・操作し必要なカメラ映像を提供する「カメラ助手医」、体内に挿入した鉗子を保持・操作し患部周囲の臓器をハンドリングし術野を確保する「術野確保助手医」の3名の医師によって手術が実施される。現在、外科医の数は減少の一途であり、米国製ダ・ヴィンチに代表されるような手術支援ロボットが普及し始めているが、高額であるため大病院でのみ導入が可能であり、全国で医療格差が拡大している。この問題に対し、執刀医1名と手術助手ロボット2台で従来の内視鏡手術を実現することを目指し、手術助手ロボットを研究開発してきた。

一方で、高齢化社会や新型コロナウイルス期を経てペットを飼う人が増え、近年は主に犬などのペットにおいても腹腔鏡手術が主流となってきており、さらにペットも高齢化し、癌切除手術などの件数も増加の一途である。またペットは去勢手術も多く行われており、動物病院における手術件数は増加の一途である。これに対し、獣医師の数はそれほど増えておらず、十分な手術件数が行えず、人間の腹腔鏡手術の問題と同様な問題がある。

本研究は、これまでのロボット開発の知見を応用し、主に犬などのペット用の自律型手術助手ロボットを実現しようとするものである。その中でもペットは体が小さいため、執刀医とカメラ助手だけで手術が可能な場合も多く、本研究期間ではまず専用の小型化した自律型手術カメラ助手ロボットの実現を目指す。なお、動物用医療機器は基本的に薬事法で規程されており、人間に対する機器よりも導入ハードルが低く、実現性が高いことが期待できる。本研究期間において、ロボット機構については、小型モーターや新規設計の金属加工部品・機械構造部品等を購入し、新規に小型ロボットの開発・製作をおこなった。またカメラ助手ロボットには体表に開けられた穴に設置されたトロカールと呼ばれる導入器具まわりに回転運動しながら、体内の対象部位の注視ポイントを追従し続ける必要があり、AIを用いたビジュアルフィードバックシステムの研究開発を行った。それらの結果について報告する。

## 2. 研究開発したロボット

まず、以前に開発した人間用ロボット開発で得た知見をもとに製作したペット用カメラ助手ロボットを図1に示す（このロボットを第1世代と呼ぶ）。本ロボットは、3自由度の水平リンク部と3自由度の垂直リンク部、および1自由度のカメラ挿入用シリンダー部から構成され、計7自由度を有する。カメラ助手ロボットの用途として、カメラを体内に挿入し初期姿勢を決めた後は、水平方向に動作させることは少なく、主に垂直リンクを用いてカメラの姿勢を変化させることが求められる。一方、産業用ロボットでよく見られる垂直6自由度型は、手先の位置姿勢の稼働範囲を広く取れる一方、重力に対抗して姿勢を維持す

るために全モータを常に動作させる必要がある。これに対し、前述のように手術助手ロボットは要求される動作範囲に限られるため水平リンク部分を持つことにより重力にして姿勢を維持するためにモータを常に動作させる必要が無く、垂直リンク部を始めとする最低限のリンクの駆動だけで良い。

人間用ロボットに対し、ロボットアーム部分を全て小型化したため、従来使用していたモータは全て利用できず、新しく水平リンク用には小型ステッピングモータ、垂直リンク部には小型電動シリンダーを用いた。また各リンクは全てオリジナル設計であり、材質はアルミ材（A2017）を用いた。水平リンク部は小型ステッピングモータのギアボックスとベルトプーリーで 1:87 のギア比で使用している。この第 1 世代のロボットを用いて制御系の開発を行った。なお、制御系の開発については次章で詳しく述べる。

制御系の開発を行いながら動作実験を繰り返すと、オリジナルで設計した各リンクの機構について問題点が発生した。特に垂直リンク部分は重力に対抗して内視鏡カメラを保持するために必要な出力を持つ駆動用電動シリンダーを採用しており、アルミ材を用いて保持強度と軽量化を両立するように設計開発しているが、図 1 に見られるように、水平リンク部分に対して垂直リンク部分が大きく重くなり、水平リンク部への負担が大きくなり、ロボットアーム全体の姿勢によっては、しなりが生じてカメラ先端を所望の姿勢に保つことが困難である場合があることが明らかとなっていった。以前の間用カメラ助手ロボットの開発でも同様の問題は発生していたが、その時はロボットアームの各リンクの金属フレーム材の板厚を増加させることにより対処していたが、全体が大型化し各駆動モータへの負担増や消費電流の増大に伴う発熱量の増大につながっていた。

これに対し、本研究で研究開発しているペット用ロボットは、その動作環境である診療台・ペット・バイタル計測器など全体のスペースが小さいため、ロボット本体は可能な限り小型コンパクトであることが望ましい。一方、大学の研究室レベルのロボット開発では、金属材の加工は板材を用いた 2.5 次元加工が一般的であり、ロボットを小型化するには限界があった。これに対し、精度が良く低価格な 3D プリンターの出現により複雑な 3 次元の部品製作が容易になってきた。よって、3D プリンターで用いる素材として代表的な PLA（ポリ乳酸（Polylactic Acid））素材にてロボット開発を行った。開発したロボットを図 2 に示す（このロボットを第 2 世代と呼ぶ）。ロボットアームの垂直リンク部のみを PLA 素材で開発し、垂直リンク部は図 1 のものを流用している。この時、垂直リンク部は図 1 に示した板材形状のままの置き換えではなく、完全に 3 次元形状のものを新設計した。また PLA 素材の採用により金属材料に対して飛躍的に軽量化できたため、駆動モータも小型サーボモーターを採用することができた。このロボットを用いて繰り返し動作実験を行っていたが、PLA 素材の強度不足による変形・破損が発生するようになってきた。

この問題に対し、高強度な CF（Carbon Fiber）材を使えば強度不足を解消できることは分かっていたが、CF 材を扱える 3D プリンターは非常に高価であった。しかしここ数年、少し強度は落ちるが CF パウダーを入れた複合材が出現し、それを扱える 3D プリンターが低価格で出現してきた。そこでこのプリンターを導入し使用した。フィラメント素材として、PA6-CF 材、PAHT-CF 材、PLA-CF 材など、材質や充填率を変えて試作を繰り返した結果、PLA-CF 材を用いて、ある充填率で作成することにより、必要な強度と軽さを両立できることが分かっていた。またこの PLA-CF 材の採用により、ロボットアームの全リンクを 3 次元の複雑な形状で製作することが可能となった。また試作→実験→改良（再設計）→試作の PDCA サイクルを飛躍的に高めることができるようになった。なお、各リンクの接続軸などは金属材を用いて重力によるねじりモーメントに対して十分な強度を持たせている。これらの改良により図 3 に示すようなロボットを開発した（このロボットを第 3 世代と呼ぶ）。垂直リンク部と水平リンク部のすべてを PLA-CF 材を用いた新設計としている。またモニター 2 台を設置し、内視鏡カメラ映像にロボットが認識している結果をオーバーレイ表示したロボットの動作状況等がリアルタイムに表示される。また土台形状もカーブを描くような形状に変更し、診察台周りのフリースペースを広く取れるように再設計している。

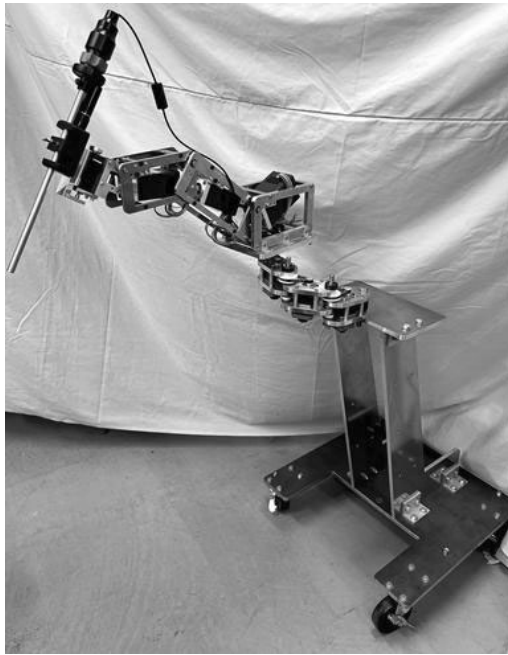


図1. 開発したペット用ロボット（第1世代）

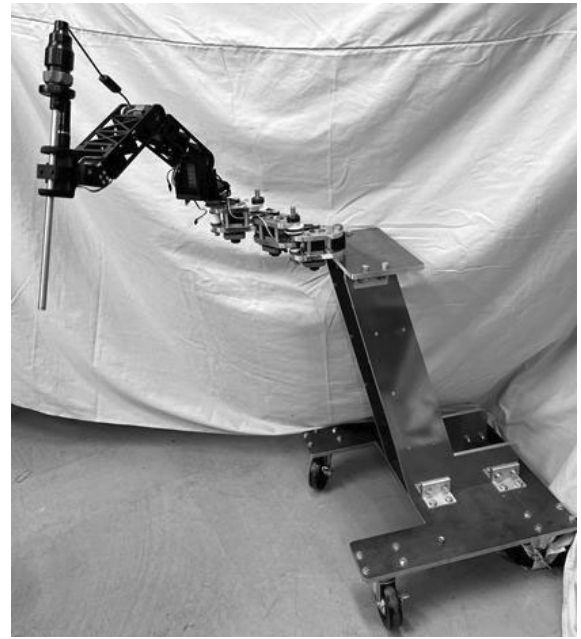


図2. 開発したペット用ロボット（第2世代）

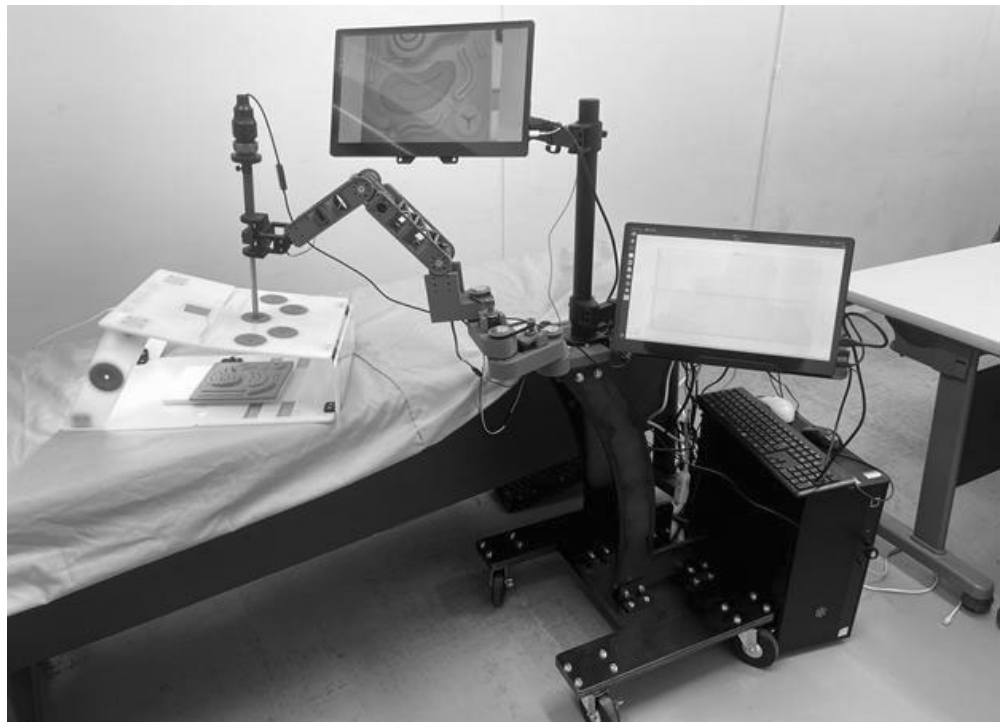


図3. 開発したペット用ロボット（第3世代）

### 3. 構築した制御システム

#### 3.1 運動学モデルの構築

図3で示したロボットの運動制御系を構築するために、まず運動学モデルを構築した。垂直リンク部のモデルを図4に、水平リンク部のモデルを図5にそれぞれ示す。前章で述べたように、本ロボットアームは垂直リンク部と水平リンク部に分かれているため、逆運動学問題を求める際の計算量が少なく済むメリットもある。各リンクの駆動軸に $\Sigma_1$ から $\Sigma_6$ を取付け、 $\Sigma_7$ を内視鏡カメラに取り付けた。各リンク角度とカメラの位置姿勢関係である順運動学はこれらの座標変換により求められる。

この内視鏡カメラ視軸を対象部位の注視ポイントに向け続ける手法の概略を述べる。図6に対象部位（主に胆嚢）の注視ポイントを表す。このポイントに内視鏡カメラのカメラ視軸を合わせるようにまず $\Sigma_7$ の位置姿勢を決定する。決定された $\Sigma_7$ の位置姿勢を満足するために逆運動学により $\Sigma_4$ から $\Sigma_6$ の各位置姿勢が逆運動学計算により求められる。ただしここで、産業用ロボットとは異なり、手術用カメラ助手ロボットの内視鏡カメラはペットの体表に開けられた穴に取り付けられたトロカーと呼ばれるプラスチック製のカメラ・鉗子の誘導器具を介して体内に挿入されている。よって、内視鏡カメラをこのトロカー回りに回転運動するように動作させる必要がある。そのため逆運動学問題を計算する際に、この拘束条件を加味して計算する。ここで、図4と図5の $\Sigma_4$ は一致している。よって、図4の $\Sigma_4$ のz軸方向（鉛直方向）の位置は、水平リンク部により一意に定まる。基準座標系 $\Sigma_w$ における $\Sigma_4$ の位置姿勢は前述の垂直リンク部のカメラ視軸により定まるため、これを実現するために図5の水平リンク部において $\Sigma_1$ から $\Sigma_3$ の位置姿勢を逆運動学問題により算出する。以上により、注視ポイントにカメラ視軸を向けるための垂直リンク部と水平リンク部の各リンクの位置姿勢を求めることができる。

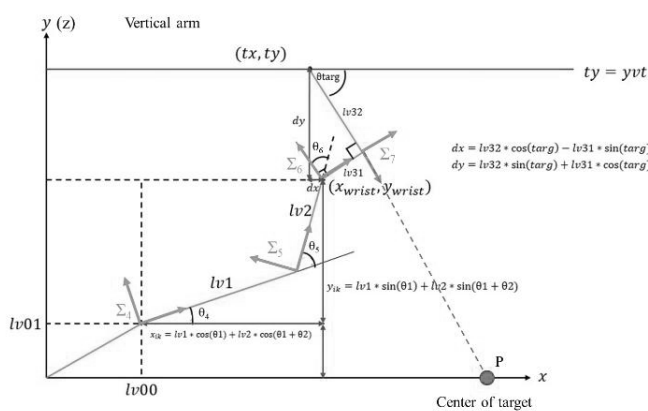


図4. 垂直リンク部の運動学

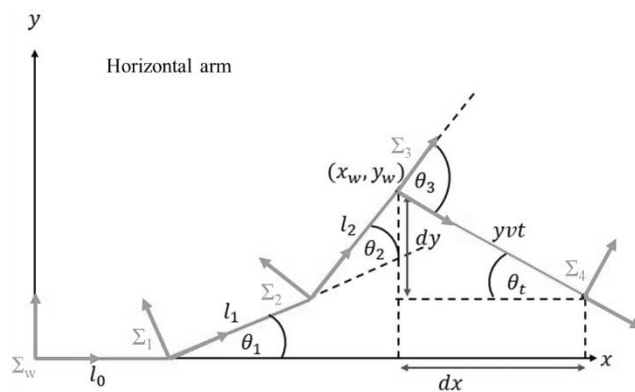


図5. 水平リンク部の運動学

### 3. 2 制御システムの構築

手術中におけるペットの拍動や手術中のペットの姿勢変化および執刀医の注視ポイントの移動動作（切除部位を見続けるだけではなく、その周辺の臓器の様子や位置姿勢も常に観察しながら手術を行う）に対し、前述のカメラ視軸を注視ポイントに向け続けるために、リアルタイムにロボットアーム全体の運動制御をし続ける必要がある。このような画像情報からロボットを動作させ注視ポイントにカメラ視軸を合わせ続ける手法をビジュアルフィードバックと呼ぶ。このフィードバック制御を実現するために構築したシステムを図6に示す。この制御システムは小型PC上にてPython言語とC言語の併用によって実現されている。ロボットアームの制御にはROS(Robot Operating System)を用いており、図6はそのノード（各センサ・モータなどの要素毎の信号処理プログラム）接続図である。図6の左上に示した「YOLACT」部において、後述のAIで認識された対象部位における注視ポイントが識別され、制御システムに入力される。その信号より垂直リンク部および水平リンク部の各リンクの角度制御が、前述の座標系 $\Sigma_i$  ( $i=1\sim 7$ )で示された各軸の角度制御として実現される。制御用PCには小型PCボードであるArduino UNOがUSB接続され、これをインターフェースして各モータと接続されて信号の送受信が行われる。

### 3. 3 AIによる対象部位検出

図4に対象部位の注視ポイントを算出する手法について述べる。体内について対象部位を識別する手法としてAIを用いた。

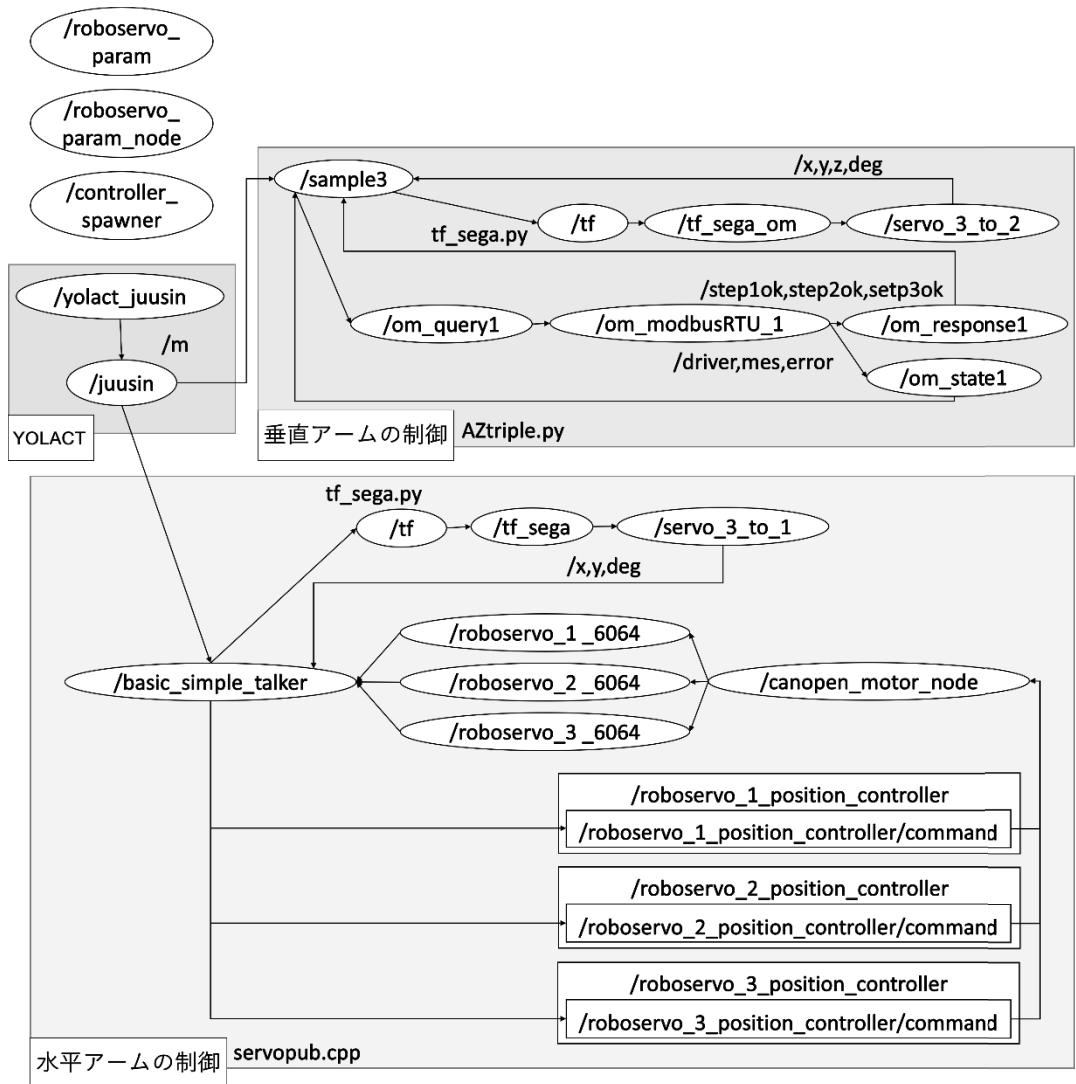


図6. 構築した制御システムのROSノード図

AIの中でもインスタンスセグメンテーションアルゴリズムであるYOLACT(You Only Look At CoefficientTs)を採用した。インスタンスセグメンテーションとは対象物の領域を抽出する手法であり、物体の輪郭に沿ってピクセルレベルの物体検出が可能となる。検出プロセスの全体的なワークフローは以下のようである。(1) オブジェクト領域とそれに対応するラベルを指定する注釈データを、注釈ツールであるLabelMeを用いて生成する。(2) 注釈付きデータセットは訓練部分集合と検証部分集合に分けられ、その後モデルトレーニング(学習)を行う。(3) その後、トレーニングで得られた重みパラメータを用いて画像の推論(物体検出)を行う。(4) 推論結果には、境界ボックス、対象の輪郭に忠実に従うマスク、予測対象クラス、そして関連する信頼度スコアが含まれる。図7に作成した学習データの一例を示す。これは手術のためのトレーニング用シリコン材を撮影した写真であり、その画像の中で胆嚢に見立てた部位の輪郭をコンピュータ画面上にてマウスでクリックしながら、その場所のタイトルを「gall bladder」として保存する。これにより学習用画像を生成する(アノテーション)。深層学習には、この学習用画像の生成が大量に必要となるため、臨時職員を雇用し大量生成した。その後、この学習画像を用いて学習を行った。学習用ソフト内では、さらに画像の輝度・左右上下反転・カラーなどを変化させてさらに8~10倍程度にバリエーションを増やす(データ・オーギュメンテーション)。これにより学習させて結合係数のデータセットを作成し、これを用いて推論(物体検出)させた一例を図8に示す。濃い色で塗られている領域が対象部位であり、図では見にくいだが、それが99%の確率でgall bladderであると認識されている。

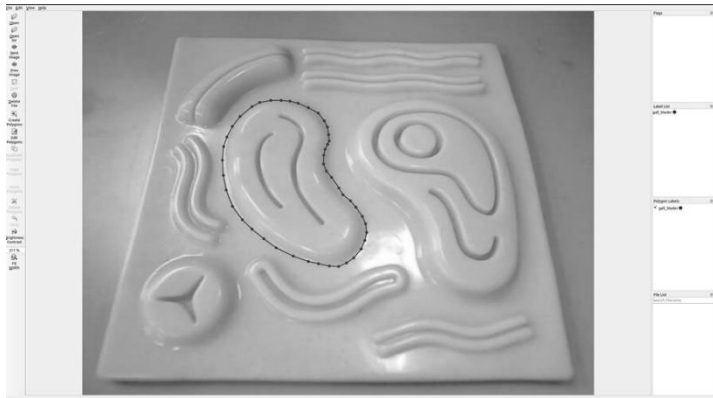


図7. 作成した学習データの一例



図8. 推論結果（検出された対象部位）の一例

この検出された領域のみを抽出し図11に示すように二値化する。二値化した画像の重心の座標は、画像モーメントから算出される。算出された重心位置の一例を図9に示す。この算出された重心位置が図4の赤丸であらわされた点である。なお、実用化に向けて必要な対象部位の学習を追加することにより、同様に検出可能な対象を増やすことができる。

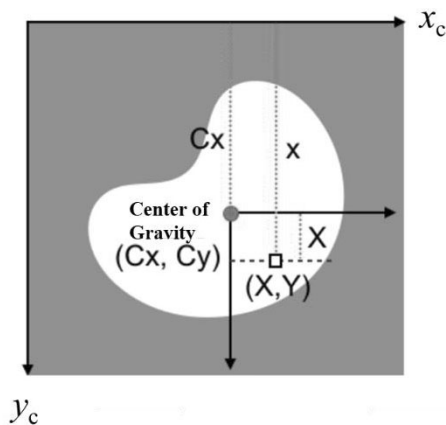


図9. 重心位置の算出

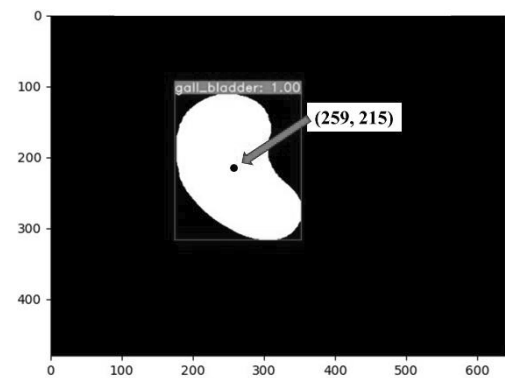


図10. 算出された重心位置の一例

#### 4. 動作実験

これまで述べたシステムにより、体表のトロカー回りに回転運動しながら挿入した内視鏡カメラで模擬胆嚢をトラッキングし続けることができるかどうか実験を行った。実験方法を以下に示す。

1. 腹腔鏡トレーニングボックスに内視鏡カメラを挿入する。
2. カメラから得られた映像に対し、YOLACTによる推論（模擬胆嚢の領域抽出）を行う。
3. 得られた模擬胆嚢の領域から重心位置計算（注視ポイント）を行い基準座標系  $\Sigma_w$  における位置に変換する。
4. 算出された注視ポイントを常に画面の中央に捉えるように、ビジュアルフィードバックによりロボットマニピュレータを動作させる。この時、模擬胆嚢は拍動や手術中のペットの動きを模して実験者により往復運動させる。

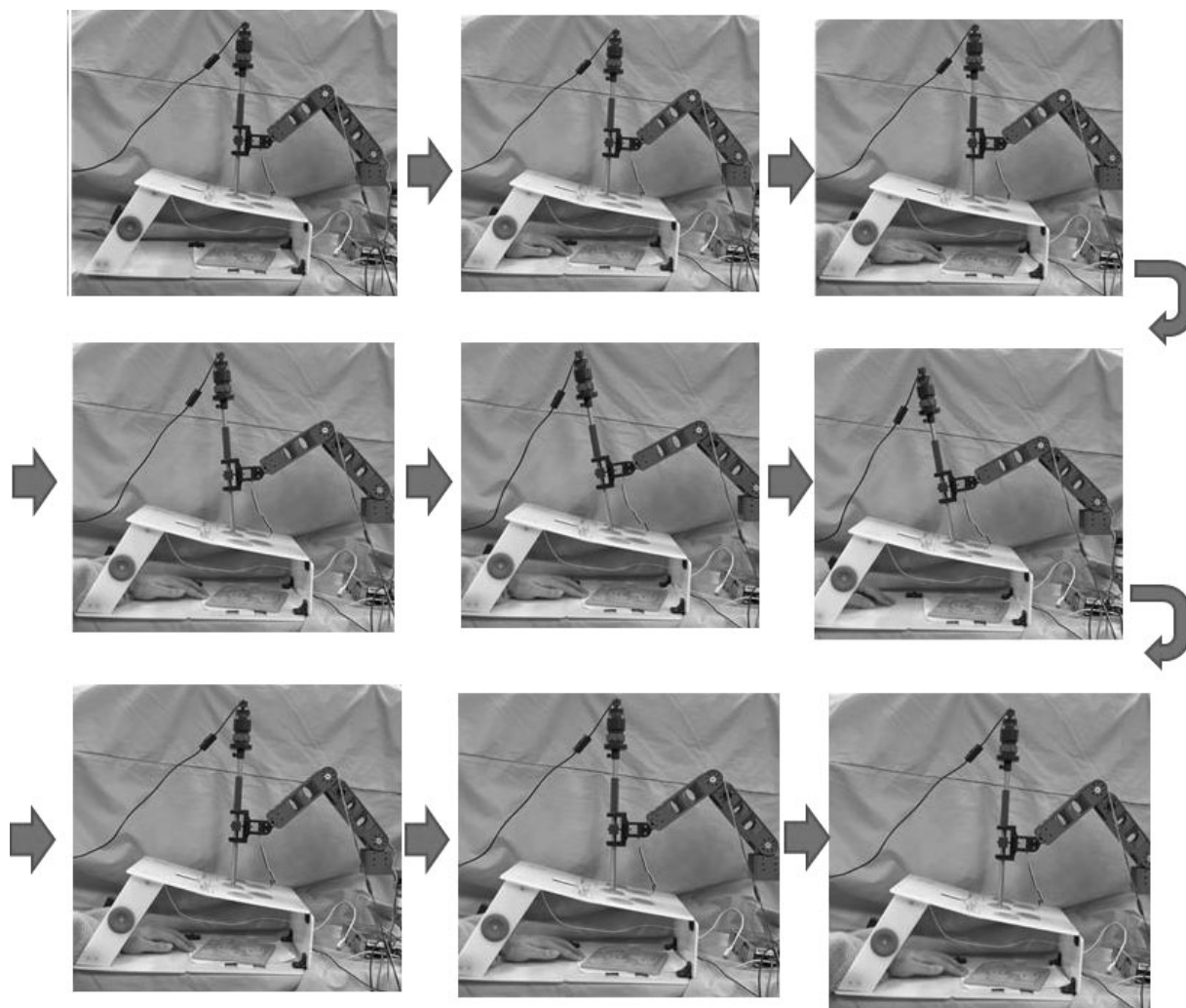


図11. 動作実験の一例

実験結果について、分解写真の一部を時系列で図11に示す。模擬胆嚢の動きに従ってロボットマニピュレータが動作し、その際トロカール回りに動作できていることが分かる。またこの時の時間応答評価について、図12に示す。図中の目標値は内視鏡カメラ映像の中心位置、現在値は映像中心位置からの距離を表す。それぞれ映像情報のピクセル情報を基準座標系の距離(mm)に変換している。図中で、現在値が5, 30, 55, 80(秒)付近で4回大きく変化している。これは図11に示すように模擬臓器を移動させたときに画面中心位置から注視ポイントが大きくずれたことを意味しており、その後、ビジュアルフィードバック制御により、現在位置が目標値である画面中心位置である0(ゼロ)に収束しており、所望の機能を得ていることがわかる。なお、現在位置がずれた後に0に収束するまで20秒ほどかかっているが、これはビジュアルフィードバック制御の応答特性、つまりロボットアームの各リンクの動作速度をあまりに速くすると、カメラ映像の急激な動きで執刀医の酔いが発生するからである。そのため、動作速度を意図的に遅くしている。この成果について、国際会議およびシンポジウムにて研究成果発表を行った<sup>2),3)</sup>。

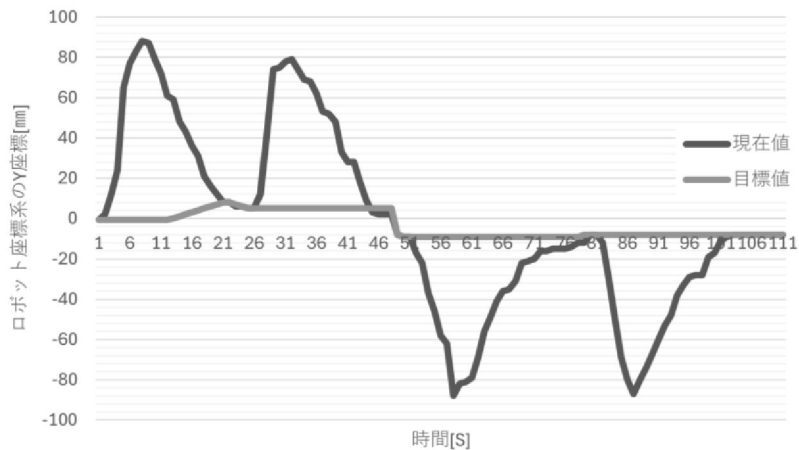


図12. ビジュアルサーボの時間応答の一例

## 5. おわりに

本研究では、ペット手術のための自律型手術カメラ助手ロボットの研究開発を行った。ロボット本体については材質・構造について試行錯誤・改良を送り返し、本文中で述べたロボットを実現することができた。制御システムについては、カメラ映像を用いたビジュアルサーボ系を構築し、さらに体表上のトロカール回りの回転運動である拘束条件を満足しながら対象部位の注視ポイントをトラッキングし続けるシステムを構築することができた。これらの研究開発した手術カメラ助手ロボットについて模擬臓器を用いて動作実験し、所望の機能を実現できていることを確認することができた。

今後は、さらに様々な対象部位の検出機能や食肉等を用いたより実際に近い環境下の実験などを行い、実用化に向けて研究を進める予定である。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人 天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

## 参考文献

- 1) Motoki Akazawa, Kosuke Arai, Rina Karasawa, Yusuke Kobayashi, Masatoshi Hatano, “”Visual Feedback Systems for Camera Assistant Robots with AI”, Proceedings of the Twenty-Ninth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2024 (AROB 29th 2024), pp.1197-1200, 2024
- 2) Yuki Sukeyasu, Kensho Yamagata, Shimon Matsuzaki, Junha Hwang, Kazuya Edamura, Hiroharu Yamashita, Masatoshi Hatano, “Development of a Camera Assistant Robot for Pet Surgery”, Proceedings of the thirty-first International Symposium on Artificial Life and Robotics 2026 (AROB 31st 2026), pp.1498-1501, 2026
- 3) 羽多野正俊, Junha Hwang, 松崎史門, 枝村一弥, 山下裕玄, “ペット手術のためのカメラ助手ロボットの研究開発”, 医工連携シンポジウム 2026, pp.4-5, 2026