

神奈川工科大学

スマートロボティクス研究開発センター

研究報告

第 6 卷

2025 年度

目次

- ・ 低侵襲腹腔鏡下手術を目的とした能動的制限制御による鉗子トレーニングシステムの開発及び定量的評価について

臨床工学科 金大永

- ・ 機械学習を用いたロボットの異常動作検出に関する研究

情報システム学科 河原崎徳之

低侵襲腹腔鏡下手術を目的とした能動的制限制御による鉗子トレーニングシステムの開発及び定量的評価について

研究者名：金 大永

1. 研究の目的

本研究では、能動的制限制御を用いて、より効果的な内視鏡手術用鉗子操作トレーニングシステムの開発及び評価を目的とする。ゴールとしては、軟部組織の安全な把持、また、スーチャに必要な適切な操作法取得を設定している。提案するシステムは、スキル取得と能動的制限制御を用いることでより早い内視鏡手術用の鉗子操作上達が可能である。単に反復練習するだけではなく、①動作データを取得し、問題点を数値として明確に出来る、②既存データや操作時の取得データに基づいて行う能動的制限制御を使うことにより、より科学的な練習方法を提案する。学術的には、「操作に慣れる」ことを定量的に評価する、また、熟練した外科医のスキルを利用したロボットの制御の有用性を定量的に評価することが大きな目的となる。

2. 研究の必要性及び従来の研究

腹腔鏡下手術において、術者は弾性等の臓器の力学的特性を経験から判断して、適切な力加減で操作を行うことにより臓器損傷を最小限に抑えている。しかし、経験の少ない医者やロボットにはその判断が難しく、操作や臓器の移動によって臓器を傷つける恐れがある。よって、低侵襲手術支援の為に、鉗子にかかる負荷の計測やナビゲーションの研究が数多く行われている。申請者らは、計測したデータを基に臓器損傷を起こさない操作を誘導するデバイスを開発した。当該デバイスは、臓器の力学特性を推算して術者の安全な操作を誘導する装着型デバイスである。鉗子の把持によって臓器の弾性を計測し、必要以上の把持力がかかる場合は、能動的に操作に制限をし、その動作を干渉する仕組みである。しかし、①能動的制限制御を行うまでの応答性がまだ不十分 (0.1sec) であり、②支援が必要な未熟練者の場合、事前に十分な練習がないと上達は難しい、③モニタ上のガイド表示が術者の座標と差があり、慣れるに時間が必要であることが in vivo で明らかになった。

3. 期待される効果

腹腔鏡手術の他にも、同様に器具を介して生体組織に作用する医療手技、例えば、腰椎穿刺、透析穿刺などに対しても技術転用が可能である。現代の医療教育は、従来の業務を通じた修練 (OJT: On the job training) から、客観的な評価方法による技能の評価

(OSATS: Objective Structured Assessment of Technical Skills) に移行しており、そのための技術開発には産業的にも高い関心がある。本研究が提供する技能の計測技術、評価技術、医療支援はその実現に貢献でき、内視鏡外科を中心として医療機器開発に関連する分野はすべて市場となりうる。提案するシステムは、スキルデータの計測システムとして機能すると同時に、動作状況に対して能動的な可動域制限やフォースフィードバックを掛けるアシストデバイスとしての活用も期待できる。すなわち、ロボットの技能支援による低侵襲手術 (RMIS: Robot-Assisted Minimally Invasive Surgery) を提案できる。操作スキルの主因子に集中させた動作訓練を提供することで、施術者自身の本質的な技能向上を効果的に行える可能性がある。また、操作ミスにより組織の損傷を防止する手術アシスト機構としての適用が提案できる。この内容は、AI を利用することで更に視野を広げての展開を目指している。

また、適切なファントムの利用により何回も同じ内容の練習が可能であり、現在外科医のトレーニングに有用とされている動物実験を最小限に抑え、動物に対する倫理的配慮も期待できる。

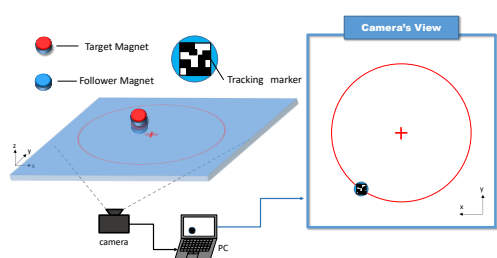
4. 研究の経過及び結果・評価 (図 1 参照)

申請者らは、2024 年度に以下ようなことを実施した。

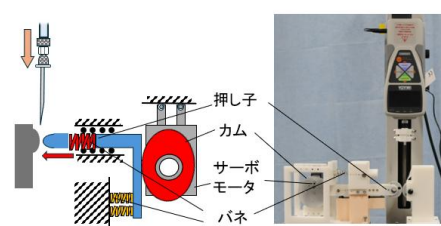
- **トレーニングシステムのプロトタイプを設計・製作**：合計 3 自由度を持つトレーニングシステムを設計・製作した。
- **鉗子先端の把持力と開閉角度によって、対象物の力学的物性（弾性）が分かり、手元のグリップパーにもストレインゲージを付けて術者の力を測ることによって、その差分から能動的制限制御に使われた力を算出した。**
- **スキルデータの計測、特徴の定量化、因子の分析**：ここでは、編みの動作を事例として、手指で扱う道具（かぎ針）の動きの円滑さを定量化することで、熟達度の評価を目指した。かぎ針と手掌の動きはモーションキャプチャシステムを用いて計測した。
- **振動による感覚的操作誘導システムの開発及び評価**：熟練した外科医の動作の正解となる情報をトレーニングする側に伝えることでより効果的トレーニングが可能と考えている。しかし、操作において視覚的・聴覚的情報は操作を妨げる懸念があり、本研究では操作を行っている手に直接その情報を伝える方法を提案した。小型の振動子アレイを利用し、リアルタイムでその情報を伝える。初年度は主にその方法の有効さを証明する基礎研究を行い、より高度の操作が誘導可能なシステムを構築した。
- **VR を用いたトレーニングシステムの構築**：VR・AR トレーニングシステムを試みることにした。VR 装置はヘッドマウント型機器の装着など現状では自由な操作は困難と考えている。しかし技術の進歩は早く、その将来性に期待して研究を早めることとした。ターゲットを追従するまでのトレーニングシステムを構築した。

2025 年度では、以下のような内容で研究を行った。

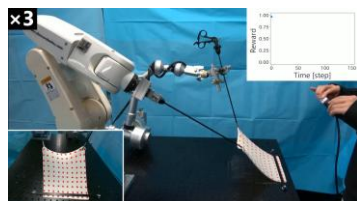
- **マグネット・カプラ位置計測**：平面上の 2 自由度、軸回転計測を、マグネット・カプラを利用して実現した。
- **能動的制御のための機構開発**：バネで鉗子のロッドを横から抑える力をモータでカムの回転によってコントロールする。その変位量とモータの回転速度の組み合わせによって反力の変化を再現する。
- **強化学習を利用した自動カウンタートラクション**：カウンタートラクションの目的は、左のように組織を面状に展開することで緊張状態を与えると同時に視認性を担保することです。これを踏まえ、組織表面の形状と向きに基づいて報酬を設計しました。表面形状については面に近づくほどよいと捉え、点群から計算された最小二乗平面との距離 d の平均を正規化することで評価した。表面の方向については、カメラ方向に向いているほど視認性が担保できていると捉え、組織表面の法線ベクトルとカメラベクトルの余弦値によって評価した。
- **タブレット（2D）と VR（3D）環境を用いた単眼・両眼視における速度変化追従運動の比較**：2024 年度に続き、VR での熟練度の定量的評価も同時に行った。
- **模倣シミュレーションシステムの構築**：市販のハプティックデバイスと先行研究での成果を融合した模倣シミュレーションシステムを構築している。2026 年度にその完成を目指す。
- **電気メス使用時の組織損傷評価**：カウンタートラクションは電気メス使用を補助するためである。しかし、どのような操作が良いのかは機械的でなく、組織の結果で判断すべきと考えている。その基礎実験を行った。電気メス電極の移動速度と組織を引っ張る力によって熱損傷の根拠となる黒炭化痕跡の面積との相関関係を確認した。



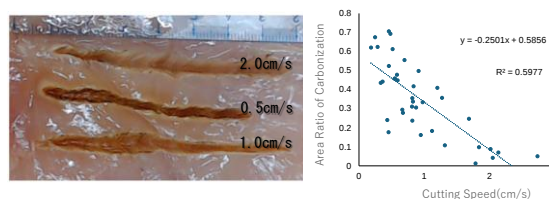
マグネット・カプラを利用した位置計測



カム機構によるハプティックデバイス



強化学習による鉗子の自動運用



電気メスによる組織損傷の定量的評価

図 1 2025 年度の研究成果

5. 今後の計画

2026年度は生体と手術環境の力学的パラメータを特定するVRーリアルハイブリッドシミュレータ構築を目的とする。最初の挑戦として、申請者らはカウンタートラクションによる電気メスでの切開をその対象にする。

本研究の目的を達成するため、申請者らはハプティックデバイスをVRシミュレータとリアルモデルによるデータ収集に双方に利用し、外科医の操作のコツを獲得可能な、力学パラメータ、境界条件の力学特性が可変なVRーリアルハイブリッドシミュレータを提案する。リアルモデルによるデータ収集では、外科医が手術操作をした際の操作力、組織のひずみ状態等力学的情報を獲得する。一方、力学パラメータや境界条件を可変なVRシミュレータを構築し、リアルモデルでの実験データとの比較により、外科医が操作の際に組織の力学状態を再現するためのカギとなるパラメータの探索を行う。外科医は鉗子を通して感じた組織の物性値と内視鏡画像などで得た形状に基づいて、カウンタートラクションを行う。本研究は今までの研究成果を活かした内容となる。本研究は、柔らかい組織を対象にした腹部外科における自動手術を最終目標としている。我々は占有率の高い自動カウンタートラクションを自動手術のファーストステップと考えている。我々は、マーカー付きのモデルにて、計測と強化学習の有望性を確認したものの、適切な報酬の設計に課題があった。他にも、シミュレータにて再現する場合の明確な境界条件なども課題となった。これらの課題を解決するために申請者らが挑戦したいことは、ハプティックデバイスを合わせた仮想空間での実験から、学習に必要な数多くのソリューションを得ることである。しかし、そのソリューションにはエビデンスが必要であり、そのためにリアルモデルや摘出臓器を用いた力学的特性を考慮した実験と併用しながら研究を進める。また、金は鉗子操作中に鉗子を通して生体組織の物性値を計測し、そのデータを基に不要な把持に制限を行う能動的制限制御を持つ鉗子の開発とその解析を行った。鉗子で確実に区別可能な把持対象の弾性の分解能は25kPaであり、この能力はかまぼこの表面と内側の区別が可能なレベルである。これらの研究と、立体内視鏡を用いた臓器表面のひずみ情報取得に関する基礎研究は、本研究で構築するシステムの中に組み込まれ、力学的パラメータを取得可能にすると考えている。

外科医のスキルは機構学的情報のみでは対象が変わったときに応用が困難で、強化学習の報酬も変わる。先行研究での成果を組み込み、外科医の月原からアドバイスを受けながら模倣シミュレーションシステムを構築し、その結果を小林に渡して、自動切開での有用性を確かめる。

6. 研究成果の発表

Yuta Terauchi, Kouki Takizawa, Riho Kawamura, Shinsuke Tobisawa, Daeyoung Kim, and Jongho Lee • Analysis of brain motor control in 3D space using Virtual Reality technology • International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC) 2025

機械学習を用いたロボットの異常動作検出に関する研究

研究者名：河原崎徳之

1. 研究の目的

今日、多くのロボットが様々な場所で稼働しているが、長期間繰り返し動かしていると電源電圧の低下やセンサ信号の誤差、摩擦による影響などで、正確に動作しないことがある。ロボットがこのような異常動作を起こした場合、原因となる不具合個所を特定し、動作を修正する必要がある。しかしながら、動作不良には様々な原因が考えられ、不具合個所を特定するのが困難である。

本研究では、機械学習の一手法であるオートエンコーダを応用して、ロボットの動作状態を大規模なセンサ情報から判断し、異常動作の原因を特定するシステムの開発を目的としている。本研究で対象としているロボットは、環境が時々刻々と変化する人の生活環境で動作させる移動型生活支援ロボットである。ロボットが目的の動作を正しく行わない原因としては、車輪と床面との摩擦によるスリップ、急激な動作変化による軌道からのずれ、モータの電圧低下、センサ信号の誤差などが考えられ、オートエンコーダにより異常とその原因を特定する。

2. 研究の必要性及び従来の研究

今後、ロボットの活動領域は人間の生活環境に広がることが期待されており、動作領域が人間の生活領域と重なるロボットは次世代ロボットと呼ばれる。このように人間と関わるロボットは、人間との関わり方そのものを明確に書き下すことができないために、従来の工場内で稼働するロボットを開発してきた方法論を適用することができない。

本研究で対象とするロボットは、このような次世代ロボット、具体的には日用品を持ち運ぶなどの生活支援ロボットである。特に、ロボットが目的の動作を達成できなかった場合、産業用ロボットに比べて生活支援ロボットは対象とする環境が複雑であるため、何の不具合であるか特定するのが困難である。

一方、ディープラーニングをはじめとする人工知能技術が進み、画像認識などに応用されて成果を挙げている。このような人工知能技術をロボットにも取り入れることで、より高度な知的動作を行わせることが期待されている。しかし、人工知能技術は画像認識やゲームなどの情報の分野では応用されているものの、ロボットなどのハードウェアと結びついた開発例は少ない。人工知能を取り入れたロボットの研究も進んではいるが、その多くは機械学習などでロボットの動作を生成し、その結果をロボット実機に与えて動かしているものが多い。

本研究では、機械学習の一手法であるオートエンコーダを応用し、ロボット動作のセンサ情報から、異常動作およびその原因を特定するシステムの構築を目指している。

3. 期待される効果

人工知能に関する研究は世界的に目覚ましい発展を遂げているが、画像認識などの認識技術への応用がほとんどであり、ロボットなど機械実機の動作まで含めて実現しているものは少ない。本研究では、実際にロボットが動作する過程において取得した情報から、動作の異常及び異常の原因を特定できる点が特徴であると考える。最新の人工知能技術をロボット実機に適用することは、高いロボット技術を有する日本が得意とするところであり、本研究もその一環と考えることができる。

4. 研究の経過及び結果・評価

研究課題の基礎となる CNN-LSTM オートエンコーダを用いた移動ロボットの異常検知の手法を開発し、シミュレーション上で検証した。CNN は、センサーデータ間の空間パターンを検出し、LSTM ネットワークは、センサー間の相互作用における時間的相互作用を特定する。シミュレーション上で、車輪型ロボットに正方形の軌道を繰り返し動作させ、位置・速度・加速度・IMU センサ・LiDAR センサのデータを随時取得する。シミュレーションによるロボットの動きを図 1 に示す。また、異常検出のための CNN-LSTM オートエンコーダのネットワーク構成を表 1 に示す。

ロボットの異常動作として、車輪と床面のスリップによる動作と急激な方向転換動作を行わせた。平均二乗誤差の値を閾値として、正常動作か常動作か判断した。この学習モデルにより異常動作の認識について、適合率 0.86、再現率 0.68 および F1 スコア 0.76 であった。また、車輪のスリップによる異常動作は、Z 軸方向の角速度の値から検出できることが分かった。この結果は、IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems において報告している。

表 1 ネットワーク構成

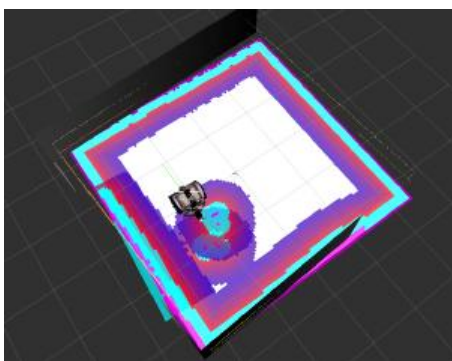


図 1 ロボットの動作（正方形軌道）

Layer Name	Filter/Unit Size	Number of Parameters
Input Layer	-	0
Conv1D_1	32, Kernel size = 3	128
Conv1D_2	128, Kernel size = 5	20,608
MaxPooling1D	Pool size = 2	0
LSTM_1	64	49,920
LSTM_Bottleneck	16	5,248
LSTM_2	64	20,736
UpSampling1D	Size = 2	0
Conv1D_3	128, Kernel size = 5	41,088
Conv1D_4	32, Kernel size = 3	12,288
TimeDistributed	11	363
Total Parameters	-	150,379

5. 今後の計画

今後は、オートエンコーダによるロボットの異常動作検出手法をロボット実機に適用する。具体的には、自作の生活支援ロボット KAIT-SMART を人の生活空間において動作させ、本手法の有効性を検証する。対象とする生活支援ロボット KAIT-SMART は、車輪型双腕のロボットアームである。KAIT-SMART は、シングルボードコンピュータを介してノートパソコン (GPU) で制御する。また、各種センサ (レーザーレンジセンサ, 電流センサ, ジャイロセンサ) および距離画像カメラを搭載している。ロボットからの大量なセンサデータを PC (GPU) に送り, 通常の状態と異なるセンサデータを機械学習の一手法であるオートエンコーダにより判断する。

6. 研究成果の発表

- [1] Sheng-We Sim, Noriyuki Kawarazaki, Danny Wee-Kiat Ng, Shalini Darmaraju, Jen-Hahn Low and Choon-Hian Goh “Anomaly Behavior Detection in Mobile Robot Navigation for Repetitive Tasks Using CNN-LSTM Autoencoder Reconstruction”, Proc. of 10th IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems, ID:20, pp. 55-60, (2025)
- [2] 河原崎徳之, 石田優真, 吉留忠史: “オートエンコーダを用いたロボットアームの異常検知”, システムインテグレーション部門講演会 2024 (SI2024), 3B7-07, (2024)