

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 5 卷

2024 年度

工学教育研究推進機構

目次

- ・ オートエンコーダを用いたロボットの異常検知

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

臨床工学科 金大永（代表者）、大瀧保明、松田康広

オートエンコーダを用いたロボットの異常検知

研究者名：河原崎徳之

1. 研究の目的

本研究では、ロボットの動作異常およびその原因を自動で判断するシステムを構築することを目的としている。具体的には、教師なし機械学習の一つであるオートエンコーダを使用してロボットの異常を自動で検出することを目標とした。

2. 研究の必要性及び従来の研究

今日、多くのロボットアームが様々な場所で稼働しているが、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、様々な原因で正しく動作しないことがある。また、ロボットによる作業のさらなる自動化を進めるにあたり、ロボット動作の異常検知も人の手で行わないことが望まれている。本研究では、ロボットの動作異常を引き起こす様々な要因を判別するために、オートエンコーダという機械学習の手法を使っている点が特徴である。

3. 期待される効果

ロボットを動作させたときの多くのセンサ情報（加速度、速度、自己位置、電流値など）から、異常をおよび異常の原因を自動で判断することができれば、ロボットを効率よく動作させることができる。例えば、工場内でのロボットの動作トラブルに対して、短時間で修正対応ができるようになる。

4. 研究の経過及び結果・評価

本研究では、ロボットアームのモータ電流の変化に着目し、この電流変化から動作の異常を検知するシステムを開発した。ロボットアームは、6 軸度多関節型 (Tinkerkit Braccio, Arduino. org 製) であり、シングルボードコンピュータ (Arduino Uno) から各関節サーボモータの制御ボードに動作コマンドを送ることで動作をさせることができる。また、ロボットアームの第 2 関節から第 6 関節の計 5 か所のサーボモータに流れる電流値を電流センサ (ACS712, Allegro 社製) により計測する。電流センサで取得した電流値は対応するデジタル値に変換され、その値をテキストファイル (csv 形式) に変換し保存する。それらの csv 形式の電流値をオートエンコーダにより学習させ、通常の状態と異なる部分を特定することで異常を検知する。オートエンコーダの特徴は、教師なしで異常検知できることである。正常データだけで学習すると、デコーダで復元後は正常データに近いデータが出力される。しかし、異常データを入力すると正しく復元できず、もとの入力データとの誤差が大きくなる。その誤差により、正常か異常か判断でき、誤差が大きい場所が、異常が発生している状態を特定できる。

オートエンコーダにより、ロボットアームの正常な動作と異常な動作を区別することができるか確認するため、動作実験を行った。正常な動作としてロボットアームを垂直に

伸ばし, 第 4 関節を 90° 曲げた状態でアームの手先を開いた状態から完全に閉じた状態まで 3 回動作させた。また, 異常な動作を想定し, 同条件でロボットアームの手先に棒(半径 1.25cm)を挟ませ, 第 2 関節から第 6 関節のモータ電流の変化をそれぞれ測定した。ロボットアームの動作の様子を Fig. 1 に示す。

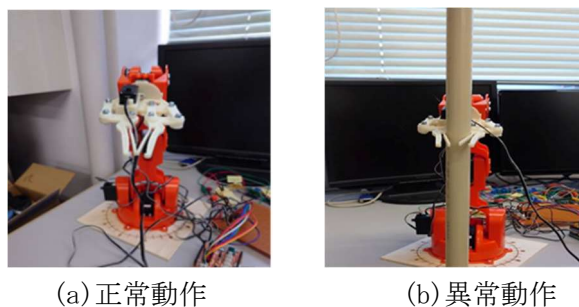


Fig.1 Hand motion of robot arm

ロボットアームの正常動作時の第 2 関節のモータ電流を学習データとしてネットワークを学習させ, その後異常動作時のモータ電流を検証データとした。その結果, Fig. 2 の赤色が異常部分として検出できた。Fig. 2 において, 計 3 か所で異常部分と判断され, 赤く描画されている。今回の実験では, ロボットアームの手先に棒を 3 回挟ませているので 3 回の異常が検出できていると考える。

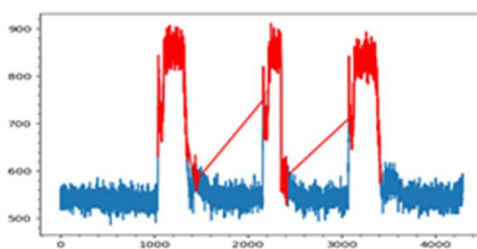


Fig.2 Anomaly detection of current of Joint motor

5. 今後の計画

今回は, 単一関節の動作のみを対象としたが, 今後は, 複数の関節に同時に負荷が掛かっている場合でも異常を検知できるようにシステムを拡張したい。

6. 研究成果の発表

- 1) 河原崎、石田、吉留：“オートエンコーダを用いたロボットアームの異常検知”、第 25 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2024), 3B7-07, 2024

○河原崎徳之（神奈川工科大学）石田優真（神奈川工科大学）吉留忠史（神奈川工科大学）

○Noriyuki Kawarazaki (KAIT), Yuma Ishida (KAIT) and Tadashi Yoshidome (SICE)

1. はじめに

2. システム構成

3. オートエンコーダによる異常検知

本研究ではネットワークを 7 層で構成し、オートエンコーダとするため、畳み込みでサイズ変更後、再び同じサイズに戻した。Fig. 3 に本システムのネットワークのモデル構成を示す [4].

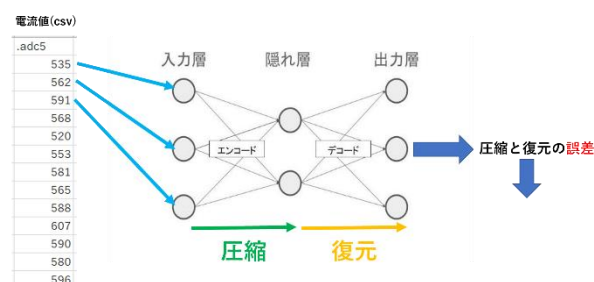


Fig. 2 Anomaly detection using autoencoder

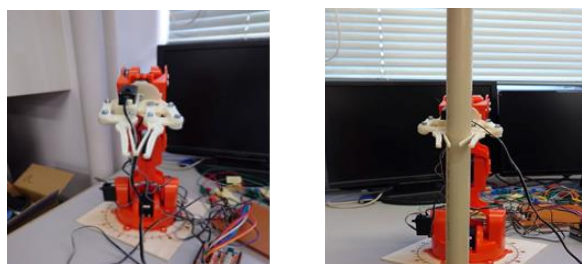
Model: "sequential"		
Layer (type)	Output Shape	Param #
conv1d (Conv1D)	(None, 50, 32)	256
dropout (Dropout)	(None, 50, 32)	0
conv1d_1 (Conv1D)	(None, 50, 16)	3600
conv1d_transpose (Conv1DTranspose)	(None, 50, 16)	1808
dropout_1 (Dropout)	(None, 50, 16)	0
conv1d_transpose_1 (Conv1DTranspose)	(None, 50, 32)	3616
conv1d_transpose_2 (Conv1DTranspose)	(None, 50, 1)	225
Total params: 9,505		
Trainable params: 9,505		
Non-trainable params: 0		

Fig.3 Network Model

異常検出は、学習したネットワークに対して正常データをいくつかに分けて入力し、得られた出力値との平均絶対誤差を求める。それらの平均絶対誤差の平均値を異常判断の閾値とする。次に異常データも同様の学習したネットワークに入力し、得られた出力値との平均絶対誤差を求め、その平均絶対誤差が閾値を超えた場合、異常と判断する。尚、最適化にはAdamを使用した。

4. 動作実験

オートエンコーダにより、ロボットアームの正常な動作と異常な動作を区別することができるか確認するため、動作実験を行った。正常な動作としてロボットアームを垂直に伸ばし、第4関節を90°曲げた状態でアームの手先を開いた状態から完全に閉じた状態まで3回動作させた。また、異常な動作を想定し、同条件でロボットアームの手先に棒(半径1.25cm)を挟ませ、第2関節から第6関節のモータ電流の変化をそれぞれ測定した。Fig.4にロボットアームの動作の様子を示す。



(a) 正常動作 (b) 異常動作

Fig.4 Hand motion of robot arm

手先を3回開閉させたとき(正常動作)と棒を挟んで開閉させたとき(異常動作)の第2関節から第6関節のモータ電流値をFig.5に示す。Fig.5より、ハンド部である第6関節(最上部の波形)電流波形のみ正常動作と異常動作で大きな違いが見られた。

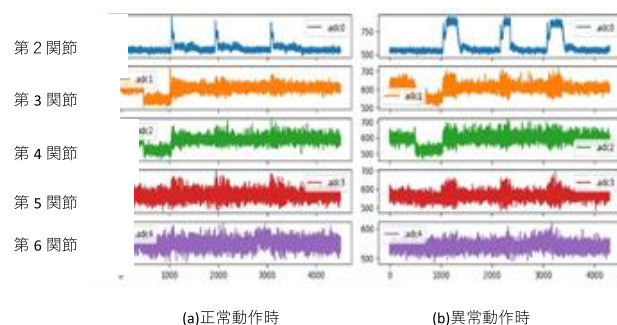


Fig.5 Currents of Joint Motors

ロボットアームの正常動作時の第2関節のモータ電流を学習データとしてネットワークを学習させ、その後異常動作時のモータ電流を検証データとした。その結果、Fig.6の赤色が異常部分として検出できた。Fig.6において、計3か所で異常部分と判断され、赤く描画されている。今回の実験では、ロボットアームの手先に棒を3回挟ませているので3回の異常が検出できていると考える。

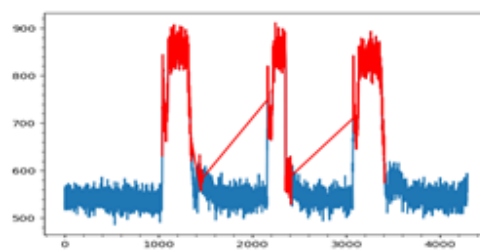


Fig.6 Anomaly detection of current of Joint motor

5. おわりに

- (1) ロボットアームのモータ電流より、異常動作を検知するシステムを作成した。また、異常検知を判断するにあたり、教師なし機械学習の一つであるオートエンコーダを適用した。
- (2) 動作実験により、ロボットアームの関節動作の違いをモータの電流値から判断することができた。

今回は、単一関節の動作のみを対象としたが、今後は、複数の関節に同時に負荷が掛かっている場合でも異常を検知できるか実験により確認したい。

参考文献

- [1] Ledge.ai, オートエンコーダ(自己符号化器)とは | 意味、仕組み、種類、活用事例を解説, : <https://ledge.ai/autoencoder/> (2023年3月1日参照)
- [2] 河原崎徳之, 高川俊輔, 吉留忠史: “オートエンコーダを用いたバイタルサインの異常検知”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023, 2P2-B07, 2023.
- [3] 曾我部東馬著, 曾我部完監修: Python による異常検知, pp. 247-249, オーム社
- [4] Jianing Guo, 造酒裕貴, 藤田康寛, 切通恵介, 伊藤浩二: オートエンコーダを用いた地震計の時系列異常検知, 人工知能学会全国大会論文集, JSAI2020(0), 4L2GS1303, 2020.

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（代表者）、大瀧 保明、松田 康広

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¹⁾ (図1)。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進める可能性がある。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

① 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。鉗子の把持（手元のグリップの把持）1 自由度、腹腔鏡下手術での腹壁のトロッカを想定した点をピボッティングする回転 2 自由度で構成される。各自由度には、手技の動作を阻害しない機構を追求した。運動学情報は高性能のポテンショメータを用いて得た。鉗子使用時の反力や鉗子先端の軸回転量計測は、先行研究での成果を活かした³⁾。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。今後、被験者を増やした評価実験と自由度の追加が課題となっている。しかし、自由度が増えるとその評価が困難である。鉗子軸の回転、鉗子先端の軸周り回転と軸の並進運動を追加し、効果的評価法を試していく。

① 把持力を含んだ操作トレーニングデータ取得・分析

肝臓や脾臓などの柔らかい組織は、必要以上の力で把持をすると回復不可能な損傷をうけてしまう⁴⁾。特に、そのような臓器を持ち上げて動かす際に初心者は、臓器の把持に必要な力と動かす力が独立せず、力の配分に乱れが見られる¹⁾。鉗子に負荷をかけながら決まった軌道上の操作を行い、反復練習によつての学習効果が評価できることを確かめた。今後、動作の正解データは、外科医の月原から提供を受ける。また、倫理委員会に必要な申請を行い、初心者は無作為 15 人のボランティアから選び、能動的制限制御有無による学習効果の差を定量的に評価する予定である。

② スキルデータの計測、特徴の定量化、因子の分析

医療手技や手工芸など、様々な場面で手指による巧みな動作がある。それらは、狭い領域で運動自由度の高い繰り返しがあるものが多い。動作の安定性、円滑さは熟達者の目安となるが、効率的に熟達度を計測・評価する方法は乏しい。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。実験ではなくさり編みを課題とした。未習熟者に対しては、計測を行う前に熟練者が編みの方法を教え、10 分間練習後に計測した。データは一目ごとの計測波形を切り出し、内挿補間を行って点数を揃えた。波形の再現性、類似度を波形間の標準偏差やユークリッド距離、相互相関係数を指

標として評価した。

熟練者がくさり編みをした時のかぎ針の軌道を空間座標で比較すると熟練者では比較的似た形の軌道を描いているのに対して未習熟者は散逸的な軌道であった。標準偏差、ユークリッド距離は熟練者と未習熟者を比較すると熟練者の方が距離は小さく、相互相関係数は

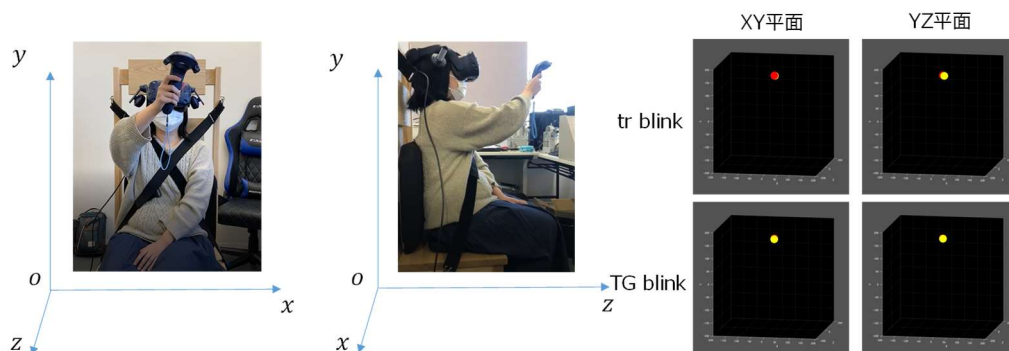
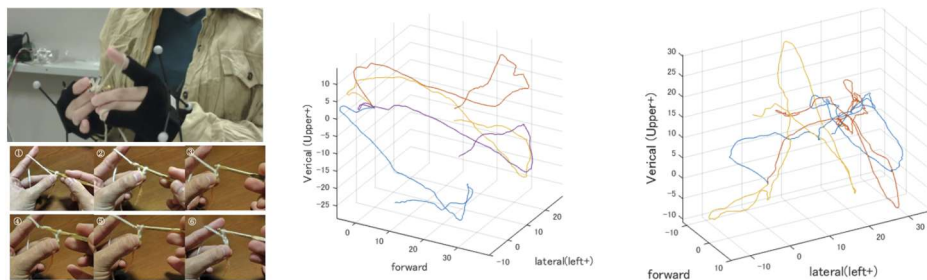


図1 研究内容

大きく、狭い空間に同じ軌道で動作を再現してゐることを定量化することができた。動作の連続性、持続時間の考慮がデータ処理上の課題となった。道具の動きは慣性センサでも抽出でき、空間上の制約の多い状況に適切な計測方法へ移行が可能である。

③ 振動による感覚的操作誘導システムの開発及び評価

本研究のトレーニングシステムは、熟練した外科医の動作を正解と見なす。そ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。

④ VRを用いたトレーニングシステムの構築

3年の研究期間が終わってから始める予定であったVR・ARトレーニングシステムを試みることとした。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。このことにより、これまで2次元で行っていたトレーニングが、VRを使用することで奥行きを持つ3次元でのトレーニングに変わる。2024年度に所定の成果を出すことができ、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。

2024年度に進めた研究内容について図4に示す。

5. 今後の計画

システムの改善をしながら、カウンタ・トラクションとスーチャの訓練とその学習効果の定量的評価を中心に行う。必要に応じて、自由度の追加及び機構の設計変更を行う。特にスーチャについては屈折鉗子を使用する可能性が高く、鉗子先端の屈折角度計測法について前もって検討する必要がある。電気メス使用時に切開を容易にするために組織の表面を鉗子で引っ張るカウンタ・トラクションは、手術時間の短縮にも貢献できる。カウンタ・トラクションとスーチャに関しては、それぞれ必要な実験用ファントムを適切な材料で製作し、開発したトレーニングシステムを用いて決まった動作の訓練を行う。システムなしでのグループと比較することで学習効果を評価し、in vivo 実験にて拘束されない場合の術中データと比較することでその有用性を検証する。

6. 研究成果の発表

海外学会発表

1. Analysis of brain motor control in 3D space using Virtual Reality technology, Yuta Terauchi, Kouki Takizawa, Riho Kawamura, Shinsuke Tobisawa, Daeyoung Kim, Jongho Lee, The 24th International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC 2025), 2025

国内学会発表

1. 鉗子把持力能動的制限デバイスの定量的評価, 篠崎 拓人, 李 鍾昊, 金 大永, 第34回日本臨床工学会日本臨床工学技士会会誌, p. 158, 2024

2. 医療デバイストレーニングシステムにおける把持力学習に関する研究、大宮蓮、李鍾昊、小林英津子、根津竹哉、金大永、第 10 回北海道・東北臨床工学会, プログラム・抄録集 p55, 2024
3. 医療デバイストレーニングシステムにおける感覚誘導に関する研究、柳田竣奨、李鍾昊、小林英津子、松田康広、根津竹哉、金大永、第 10 回北海道・東北臨床工学会, プログラム・抄録集 p55, 2024