

総括研究報告書

ロボット型内視鏡操作支援システムの AI による高度化と
各種医療機器統合インターフェースとしての展開に関する研究

研究代表者 江口 晋

長崎大学大学院 医歯薬総合研究科 移植・消化器外科 教授

研究要旨 ロボット型内視鏡操作支援システムに AI を組み込むことで、術中に外科医を適切にサポートするシステムとして発展させ、同時に、各種術中のデータを体系的に統合・収集できるインターフェースとしても機能させることを目的とする。

本年度は AI システムの構築として、AI システムに対する学習用の手術時動画、静止画を用いたデータベースの構築の基礎を完成。また、改良を行った内視鏡操作支援ロボットにデータベースを基にした AI を用いた手術ナビゲーションシステムを組み込み、ブタの胆嚢摘出術モデルで動作検証を実施した。

共同研究者

伊藤信一郎（長崎大学病院 移植・消化器外科 講師）

足立 智彦（長崎大学病院 移植・消化器外科 助教）

小坂太一郎（長崎大学病院 移植・消化器外科 助教）

喜安 千弥（長崎大学大学院 工学研究科 電気情報科学部門 教授）

柴田裕一郎（長崎大学大学院 工学研究科 電気情報科学部門 准教授）

藪田光太郎（長崎大学大学院 工学研究科 電気情報科学部門 助教）

諸麥 俊司（中央大学 理工学部 准教授）

A. 研究目的

当研究グループは、これまで内視鏡担当医に代わって腹腔鏡を支持し、術者の操作信号に沿って腹腔鏡の操作を行うロボット型内視鏡操作支援システムの開発に取り組み、外科医 1 名による腹腔鏡手術を可能とするシステムを高安全性、高コスト性のもとに実現した。本研究課題では開発したロボット型内視鏡操作支援システムを他の手術関連機器と接続し、また AI を組み込むことで術者らとコミュニケーションを取りながら、術中に外科医を適切にサポートするシステムとして発展させる。本システムは、

外科医の負担軽減と精度の高い判断を支援すると同時に、各種術中のデータを体系的に統合・収集できるインターフェースとしても機能する。具体的には本研究は次の二つの研究目的を有する。

(1) 上記内視鏡操作支援システムに AI を組み込み、事前に熟練外科医の内視鏡操作を学習させることで、熟練の内視鏡担当医のような腹腔鏡操作を可能とし、より確実にスムーズな一人手術を実現する。

(2) AI によるナビゲーション機能の実装とそのためデータベースの構築方法および標準化の方法を検討する。

開発するシステムは、一人手術の実現に加えて、若手外科医の執刀時に、あたかも熟練外科医が内視鏡担当として立会い、内視鏡操作を行うと同時にアドバイス提供を行うような高度な外科手術サポート機能を実現する。

B. 研究方法

実施課題

ロボット型内視鏡操作支援システムのAIによる高度化に向けて本研究で計画している実施課題は次の7つである。

課題1)操作支援、(自動操作)ナビゲーションシステムのためのデータベースの構築(データベース共通化・標準化の検討含む)

内視鏡の操作支援(自動操作)及びナビゲーションシステムの構築を目的として、AIに与える術前、手術情報のデータベースを構築する。術前のカンファレンスで使用した術前画像データ、電子カルテの患者情報(年齢、性別、身長、体重、炎症マーカーなど)手術前工程表データ、執刀データなどを用いる。執刀データは具体的には手術動画解析、モーショントラッキングによるカメラワーク、内視鏡画像データから抽出される鉗子操作とともに、外科医が判別しマーキングを行った手術操作用メルクマール画像(静止画)とカメラ焦点、中心との位置関係等が含まれる。手術操作用メルクマールの対象臓器は手術で摘出対象となる胆嚢(周囲ライン)切離対象となる胆嚢管、胆嚢動脈(点線などで図示)損傷を回避すべき総胆管(領域図示)とし、手術症例の動画より静止画を約30枚程度抽出、画像上に手術操作用メルクマール(胆嚢、胆嚢管、胆嚢動脈、総胆管)にデジタルペンでマーキングしたものをメルクマール画像とする。本研究施設及び研究協力施設で、過去に施行された手術症例(胆嚢摘出術)(n=100)に関して、前述データを収集し、これを解析、データベースを構築する。

その後、AIシステムを構築する。アプリケーションはGoogle社の無償提供システムである「テンサー・フロー」を使用する予定

である。

(江口、伊藤、足立、小坂、(収集情報の決定、収集方法の検討担当)喜安、柴田(情報収集技術担当))

課題2)AI知能化とその評価を目的としたロボット型内視鏡操作システムの製作

すでに構築したロボット型内視鏡操作支援器具は、プタを用いた動物モデルを用いた安全性の確認を施行しており、更なる操作性および実用性向上のためのハードウェア構成に関して以下の改良に取り組んでいる。

(1)内視鏡支持部品のディスプレイ化

これまでの生体プタによる実験を通して、術中に内視鏡の着脱が必要となった際に血液等により装置が汚れ、衛生管理上の対策の必要性が認識されていた。装置本体は他の手術ロボットと同様にビニール製カバーで覆うことで保護可能であるが、内視鏡を支持あるいはロックするための部品はビニールカバーでは十分な保護が困難である。そこで、内視鏡と触れる部分は全てディスプレイ化し、手術毎に交換できるように設計を見直す。

(2)装置本体からモータや回路など電気的設備の分離

現在の内視鏡操作支援ロボットは本体にモータやモータドライバなどの電気システムを内蔵している。これらを本体から切り離し、ワイヤ駆動方式とすることで、本体をまるごと清掃、滅菌可能とすることを検討する。本体の詳細設計および製作は自動車用ドア窓の駆動ユニットの最大手で多数のワイヤ駆動ユニットの製品群を有する株式会社ハイレックスコーポレーションに依頼する予定であり、現在協力して設計を進めている。自動車用の駆動ユニットの採用で駆動系の信頼性向上および装置本体の大幅なスリム化も期待される。

改良型装置の完成後に引き続き、安全性の確認を行うべく、PMDAへの相談実施準備を行っている。PMDAから指摘を受けた評価項目に沿って、プタを用いた更なる安全性の評価を行う(n=3~5)。(現在、想定している評価項目としては、手術時間、出血量、

操作鉗子の移動距離、カメラヘッドの移動距離などを予定している。)安全性を確認の後、同装置に AI 実装を行う。
(諸麥、柴田、喜安)

課題 3) 手術ナビゲーション機能の実装

データベースを学習した AI の判断したメルクマールを元に、リアルタイムに画面上に切離ラインや切除対象部位など線や色調変化として臓器上に重ねて表示する。画面上の適切な位置に適切なタイミングで執刀医の安全・確実な施術に役立つ情報をリアルタイムで提示する技術を確立する。
(喜安、柴田、諸麥)

課題 4) 手術ナビゲーション機能の評価

同システムを用いて、3 名の研修医を施行者とし、プタを用いた生体試験を施行し、そのシステムの有用性を、手術時間、出血量、内視鏡技術認定医による審査、内視鏡および鉗子に取り付けた 3 次元位置センシング、カメラワークと施術の正確さ、やりやすさ、作業時間などから評価する。
(江口、伊藤、足立、小坂)

課題 5) 内視鏡操作支援機能の実装

課題 1) で構築した術前取得情報のデータベースから随時判断して術者による内視鏡操作をアシストする機能を実装する。特にデータベース内の過去の術式データ (施術内容 (胆嚢管周囲剥離、胆嚢動脈同定・切離、胆嚢管切離、胆嚢床剥離) とスコピストあるいはロボット型内視鏡操作支援システムによるカメラワークデータから最適なカメラ操作および適切でないカメラ操作を判断。適切でないカメラ操作を自動的に修正するとともに、最適な操作に近づける補助的制御機能を実現する。具体的にはカメラの先端移動時の移動不足、行き過ぎの補正、適切でない視野で鉗子操作がなされた際の警告と視野の補正 鉗子操作中の操作野のセンタリング (視野の中心に操作部位を置く) の安定化時補助 (鉗子操作の追尾など) を行う。

(喜安、柴田、諸麥)

課題 6) 内視鏡自動操作機能の実装

課題 2) と同様にデータベースと術中取得データから随時判断して常時最適視野を確保するための自動的内視鏡操作の機能を実装する。ただし、微調整を人的操作 (ヘッドセット) で可能とする。
(喜安、柴田、諸麥)

課題 7) 操作支援機能、自動操作機能の評価

同システムを用いて、3 名の内視鏡手術技術認定医を施行者とし、胆嚢摘出術を施行 (各術者 n=3)。そのカメラワークと施術の進行具合、やりやすさ、作業時間などから評価する。
(江口、伊藤、足立、小坂)

C . 研究結果

課題 1) 操作支援、(自動操作) ナビゲーションシステムのためのデータベースの改良

昨年同様に胆嚢摘出術内視鏡手術動画よりキー画像となる、静止画を抽出。これに胆嚢、胆嚢管、総胆管部位を外科医がマーキングしたものを教師画像として、AI 画像診断システムに学習を施行させた。その後検証を行っている。

まず、セグメンテーションの正答率 (全画素のセグメンテーション結果を教師データと比較したとき、全画素数に占める正しいクラスに分類された画素数の割合) の評価を行った。その結果は、ノード数が 12 のとき 79.7%、ノード数が 16 のとき 82.9%、ノード数が 20 のとき 81.7%であった。

次に、推論の処理時間について評価を行った。実験環境として、CPU に Intel 社 Core i7-5930K 3.50GHz、GPU に Nvidia 社 GeForce GTX 1080 を用いた。それぞれ 600 枚の画像を処理した時の平均フレームレート (fps: frames per second) を測定したところ、ノード数が 12 のとき 56.71 fps、ノード数が 16 のとき 55.40 fps、ノード数が 20 のとき 55.17 fps であった。

課題 2) AI 知能化とその評価を目的としたロボット型内視鏡操作システムの製作、改

良

ワイヤ駆動による操作を実現し、操作性、軽量化によるポータビリティの向上を実現した。また、手術野に行けるパーツをすべて滅菌可能化し、臨床応用可能な状態とした。

課題3) 手術ナビゲーション機能の実装

課題5) 内視鏡操作支援機能の実装

課題6) 内視鏡自動操作機能の実装

データベースを学習した AI 画像診断システムを元に、リアルタイムに画面上に臓器(胆嚢、総胆管、胆嚢管など)を色調変化として臓器上に重ねて表示。画面上の適切な位置に適切なタイミングで執刀医の安全・確実な施術に役立つ情報をリアルタイムで提示する術中画像ナビゲーションシステムを確立した。

また、操作支援、自動操作機能に重要となる対象物追尾機能を内視鏡操作支援システムに実装。これとナビゲーションシステムの画像データを組み合わせて、対象臓器をセンタリングするシステムを実装した。

これをブタ手術モデルで検証した。具体的にはまた、課題1で検証したセグメンテーション結果に基づき、本課題研究分担者である中央大学の諸彦准教授らが作成した内視鏡操作ロボットを操作できるよう、ロボット接続のためのインターフェースを、非同期シリアル通信を用いて実装した。接続実験の結果、ニューラルネットワークによってロボットを正常に制御できることを確認した。

D. 考察

以下に本研究の成果と思われる項目を挙げる。

課題1) セグメンテーションについては概ね80%程度の良好な正答率が得られている。一方、ノード数が20のときの正答率は、ノード数が16のときよりもわずかに低下しており、この結果は過学習の影響が反映されたものと解釈できる。クラスラベリングの結果画像についても、臓器の位置を概ね妥当に捉えることができていることが確認できた。学習用データセットが少ない中、過

学習による品質劣化をある程度抑制することができており、提案ネットワークの構造上の工夫により一定程度の成果を得ることができたと判断できる。

また、ニューラルネットワークの構成をコンパクトにしたことにより、推論処理に要する時間の短縮にもつながっていることが、性能評価の結果から伺える。GPUによる計算アクセラレーションの効果ともあいまって、実験に用いたいずれの構造の場合でも55fpsを上回るリアルタイム性が確認できた。この処理性能は、ロボット制御の観点からも十分なものであると判断できる。

課題3) 手術ナビゲーション機能の実装

課題5) 内視鏡操作支援機能の実装

課題6) 内視鏡自動操作機能の実装

内視鏡操作支援システムに手術ナビゲーション、内視鏡操作支援、自動操作機能の実装を行い、動物実験において基本機能の実装可能であることを確認した。

E. 結論

本年度で、AIシステムのための学習データの収集・作成を完了し、術中ナビゲーションシステム、操作支援、自動操作機能の実装までを施行し得た。現時点では更なる制度の向上に向けてシステムの改良、検証を施行していく必要がある。

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

T. Manabe, Y. Shibata, K. Oguri, FPGA Implementation of a Real-Time Super-Resolution System Using Flips and an RNS-Based CNN, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol.E101-A, No.12, pp.2280-2289 (2018.12)

H. Egawa, Y. Shibata, Storing and Compressing Video into Neural Networks by Overfitting, Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol.772, pp.615-626 (2018.7)

2 . 学会発表

Y. Shibata, Near-I/O reconfigurable computing for medical engineering, International Symposium on Computing and Networking, CANREXI Workshop (2018.11)

H . 知的財産権の出願・登録状況(予定を含む。)

なし