

「軟性内視鏡手術支援ロボットの効果的な操作インターフェースの構築法」

神戸大学 大学院医学研究科

中楯 龍

1 研究の背景と目的

消化管（大腸・胃・食道・十二指腸）がんは、早期に発見されれば軟性内視鏡（いわゆる、胃カメラ）で口や肛門から病変にアクセスして治療することができる。皮膚切開を伴いさらに臓器の一部を失う従来の外科手術に比べ、大幅に低侵襲で術後QOLも高い。その代表的な術式であるESDは日本の医師が開発したため日本では普及しているが、特に欧米においては技術が普及しておらず、患者に選択肢が無い。本研究は、このアンメットニーズを解決することが期待される技術である。

軟性内視鏡の手術は治療デバイスの自由度が限られることから手技の難易度が高い。これを解決するため、申請者らは軟性内視鏡による治療を圧倒的に容易にする手術ロボットの開発に取り組んでいる。通常の軟性内視鏡が4自由度であるところ、屈曲部を追加した6自由度の電動ロボットを開発し、理論的には全ての方向から病変にアプローチできるシステムを構築した。

しかしながら、屈曲部1つにつき上下、左右に各1つのダイヤルを操作する必要があり、従来の屈曲部1つでも熟練に時間を要するのに対し、屈曲部が2つとなった6自由度の操作は煩雑すぎて、マニュアルで行うのは非常に難しい。さらに、動作範囲に障害物がある場合、意図しない動作となってさらに操作者を混乱させる要因となる。このような6自由度軟性内視鏡を直感的に操作するために、適切な操作インターフェースの方式を、試作と実験により明らかにすることを目的とする。

2 研究方法・研究内容

(1) 6自由度軟性内視鏡ロボットの試作

使用するロボット自体が持つ応答性が悪いと、被験者試験の際、操作方式が悪いのか、ロボットそのものの能力が悪いのかの区別がつかないため、まずロボットの改良を行った。具体的には、市販内視鏡の修理部品パーツを調達・追加工し、屈曲部の内部に使われるヒンジ、ワイヤ、チューブ、外皮などを市販品同等の素材に置き換え、これに自作の3Dプリンタパーツ、3Dカメラなどを追加し、市販の内視鏡程度の剛性、屈曲能力をもつプロトタイプを内製した。

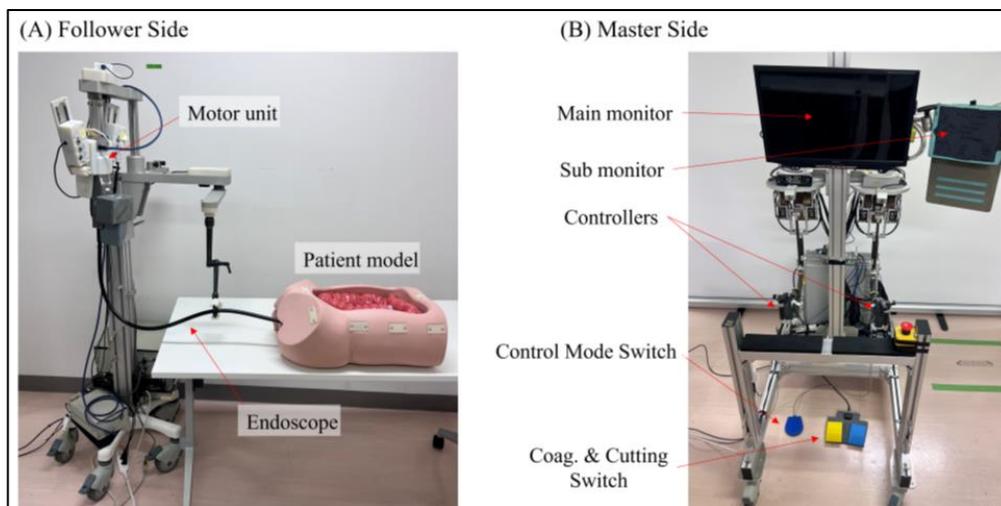


図1 (A) 軟性内視鏡ロボットの全体写真 (B) マスタデバイスの全体写真

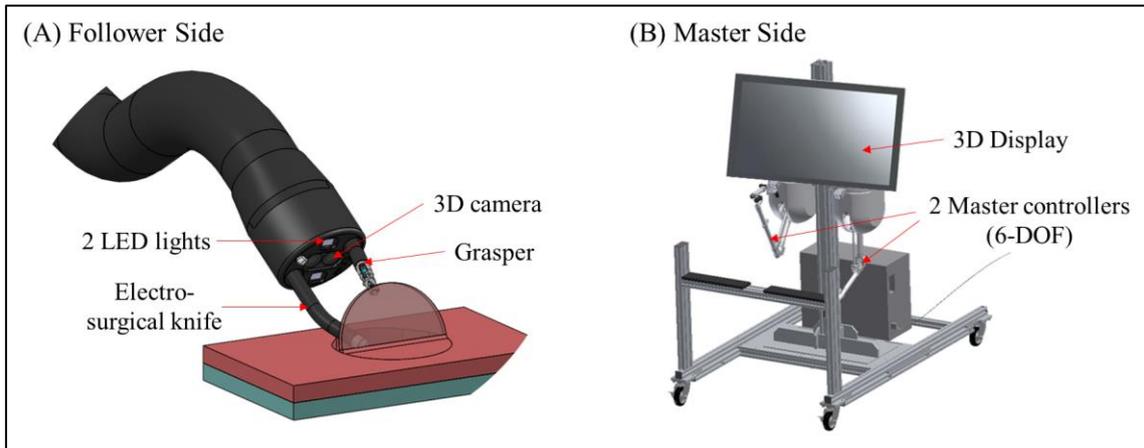


図2 (A) 軟性内視鏡ロボットの先端部 (B) マスタデバイス (操縦桿)

実験に用いたロボットシステムを図1、2に示す。操作者は2本の7自由度を持つ操縦桿を握り、モニタに映し出される内視鏡画像を見ながら手術を行う。軟性内視鏡の先端から微小な4自由度のマニピュレータが2本（病変をつかんで持ち上げるグラスパーと、電気メス）出ており、2本の操縦桿がその操作に対応している。手術中に頻繁に視野を変えるため、フットスイッチを踏んでいるときのみ、軟性内視鏡（カメラ）の操縦モードに切り替わり、その間、マニピュレータ2本は停止し、操縦桿で軟性内視鏡を操作することができる。この時の、軟性内視鏡の操作方式を、すなわち、左右操縦桿をどのように軟性内視鏡の動作に変換するのか、が本研究の課題である。

## (2) 軟性内視鏡ロボットの操作体系の構築

以下 i, ii, iii の3通りの操作体系を実装した。

### (i) Tip-Base Distributed Control (DC)

この操作体系では、内視鏡先端の屈曲量と内視鏡先端の位置を分けて操作する。da Vinciのような操作感を目指して実装したものである。操縦桿のノブをクラッチと見なし、インデキシングができる操作系とした。操作系は二つに分かれており、マスタデバイスがニュートラルラインよりも奥側に位置しているときには内視鏡先端の屈曲量を操作し（先端屈曲操作モード）、手前に位置しているときは内視鏡先端の位置を操作する（先端位置操作モード）。二つの操作系が切り替わる点でマスタデバイスに反力を与えることで、どちらの制御モードになっているかを分かりやすくした。

### (ii) 6自由度 Position Control (POS)

左手側操縦桿のみを使用し、逆運動学解を用いて6自由度を位置制御する方式である。操縦桿の先端がスコープ先端の位置・姿勢に一致して動作する。

### (iii) Joint-to-Joint Control (JJ)

右手側操縦桿を上下左右に動作させることで基端側の屈曲2自由度の屈曲量を操作し、操縦桿の回転・前後動作によって挿入管の回転、進退を操作する。左手側操縦桿では先端側の屈曲2自由度を同じように操作する。左右それぞれの操縦桿に対し、可動範囲外への入力時には(i)と同じ手法でマスタ反力を提示した。

(3) 評価試験

14名のボランティアに、ロボットを操作してもらい、タスクを達成する課題を与えた。タスクとして、軟性内視鏡の位置、姿勢を適格に合わせることを求められる作業を選んだ。

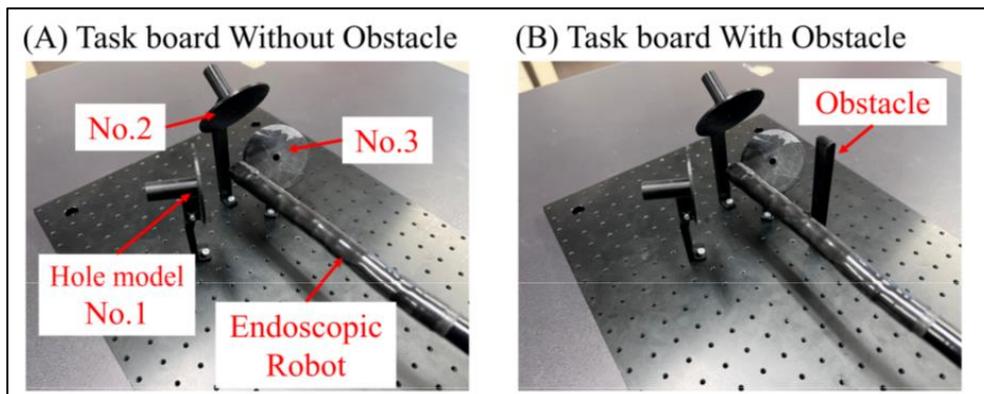


図3 被験者試験のタスク (A) 障害物なし (B) 障害物あり

構築したタスクボード図3に示す。被験者には、内視鏡ロボットを操作して貫通穴モデルの奥をのぞき込むタスクを与えた。完了基準は、貫通穴モデルの奥側のエッジが確認できること、またタスクを完了した位置で静止できることの2点である。初めに操作練習の時間を設け、十分に操作方法を理解できるまで時間を取った。次に、障害物が無い状態でタスクを実施し、完了後にVAS (Visual Analog Scale) アンケートに回答してもらった。(2)で述べた3つの操作手法をすべて完了した後、良い順に点数をつけてもらった(主観評価)。これらを障害物なし、有りの順で施行した。タスクの達成度および達成時間、練習時間、VAS アンケート、主観評価、を評価項目とした。

3 研究成果

(1) 結果

被験者試験で得られた結果のプロットは省略するがその要約を図4に示す。

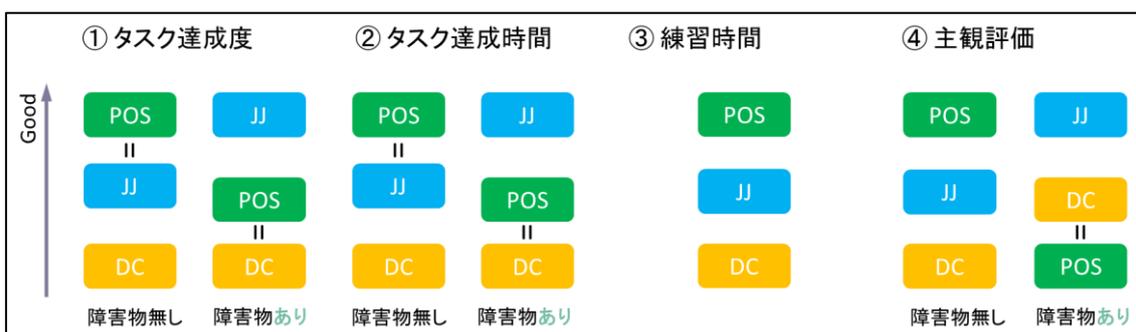


図4 評価試験結果の要約 (略称は2(2)の通り)

タスクの達成度について、障害物の無い環境では POS および JJ が DC に比較して十分に高い達成度を得られることが確認された。障害物のある環境では DC と POS に比べ JJ が有意にタスク達成度が高かった。タスク達成時間についても同様の傾向であった。練習時間は、他二つの手法に比較して DC が有意に長く、POS が最も短かった。JJ は POS より大きな標準偏差を有し、最大値も大きかった。RAW-

TLX スコアによると、他二つの手法に比べて有意に DC が有意に高負荷であった。POS、JJ の間に有意差は見られなかった。主観評価の結果、障害物の無い状態では他の 2 手法に比べて POS が最も直感的と回答された。障害物がある環境では一転し、被験者は、残り 2 手法に比較して JJ が最も操作が直感的であると回答した。障害物を設置する前後でアンケートの結果を比較した所、POS は有意にスコアが低下し、逆に JJ は有意にスコアが増加した。

## (2) 考察

特にスコープ付近の障害物の有無によって操作の直感性や負荷に大きな影響があることが判明した。タスクの達成度は、障害物の無い環境では POS および JJ が DC に比べて有意に高い達成度を示した。しかし、障害物のある環境では DC と POS に比べて JJ が有意に高いタスク達成度を記録し、タスク達成時間についても同様の傾向が観察された。特に障害物が無い場合、DC は他の手法に比べて有意に長時間を要したが、障害物のある状態では JJ のみが有意に短時間でタスクを完了した。この結果は、障害物の有無が操作方式の有効性に大きな影響を及ぼすことを示唆している。また練習時間の分析から、DC が他の手法に比べて有意に長い学習時間を要する傾向が確認された。POS は最も短時間で習得され、JJ と POS の間に有意な差は見られなかったが、JJ は標準偏差が大きく、学習に要する時間の個人差が大きい可能性が示された。

興味深い点として、被験者の主観的な評価において、障害物の無い状態では POS が最も直感的な操作方法と評価されたが、障害物を設置した環境では JJ が最も直感的と評価された。この結果は、POS は障害物の有無によって直感性が大きく損なわれる一方で、JJ は環境の影響を受けにくく、相対的に優位性が高まることを示唆している。特に障害物の設置前後で POS の評価が有意に低下したことは、POS の操作が障害物のある環境では直感的でなくなることを示している。

## 4 生活や産業への貢献および波及効果

手術支援ロボットは、hinotoriやda Vinciに代表される「硬性鏡」の手術を目的としたものが多数開発されてきたが、「軟性鏡」の手術ロボットはまだ商品として普及しているものがない。研究レベルでも、申請者らのフルモーションで動作するロボット軟性鏡の例はまだ少なく、さらに、直感的な直交座標系の制御を取り入れたものはまだ無い。本研究は、さらにその先の問題解決に取り組むものであり、世界の最先端を走っている。県内には既に「硬性鏡」の手術を目的としたロボットhinotoriを実用化したロボット産業が存在する。「軟性鏡」の手術ロボットも本県から発信できるよう、本研究の実用化を目指す。

「軟性鏡」の手術ロボットは、細長いチューブ状のマニピュレータであるので、管腔状の臓器が適用の対象となる。そのような臓器は、本研究で対象とする胃・食道・大腸の他にも、尿道、膀胱、腎臓、肺、胆のう、膵臓、血管、心臓、耳、鼻腔などが挙げられ、ロボットのサイズを変更することで大きな発展性（潜在市場）を秘めている。