

電動湾曲マルチベンディング内視鏡システム

○澤田 将太^{*1}, 柳川 涼太^{*1}, 樋口 達矢^{*1},
神戸 秀^{*1}, 山中 紀明^{*1}, 小室 考広^{*1}, 岸 宏亮^{*1}

^{*1}オリンパスメディカルシステムズ株式会社

ESD is widely performed as a treatment for early-stage cancer. But there are some difficult scenes because of limited DoFs of usual endoscope. Multi-bending endoscope was developed to solve this issue, but it causes physical burden due to the heavy control section and requires skill to operate. We have developed a motorized bending endoscope system with two bending sections which can be operated independently or in coordination, a long-distance wire control, and a light-weight and intuitive operation interface. We have succeeded to perform ESD with a prototype in a difficult scene by using a simulator, and confirmed less burden and easy operation of two bending sections.

1. はじめに

軟性内視鏡を用いた消化管治療は、外科的な開腹手術と比べ低侵襲で患者への負担が少ない。特に近年普及した内視鏡的粘膜下層剥離術(ESD)は、病変周囲を切開した後、病変下に潜り込んで剥離し、病変を切り取る手技であり、大きな病変を一括切除できるため、早期がんの標準治療となっている[1][2]。しかし、厚さ数[mm]の管腔壁に生じた直径数[cm]の病変に対し、様々な位置姿勢から精緻にアプローチする必要があり技術的な難度が高い[3]。

上記課題を解決するために開発された図 1 に示すマルチベンディングスコープ[4]は、2つの駆動可能な湾曲部を有しており、従来の内視鏡では届きにくい部位へのアプローチが可能であり、ESDにおける有用性が報告されている[5]。しかし、2つの湾曲部を動かすための操作部は重く、アングルノブの操作には左手だけでなく、右手も使う必要があり操作が煩雑である。

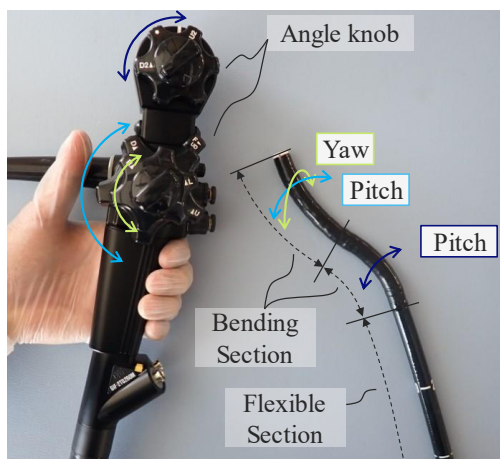


図 1 Multi-bending endoscope (Olympus GIF-2TQ260M)

体内で多自由度の操作を容易に実現するために、Intuitive Surgical (Sunnyvale, CA)社の da Vinci をはじめ、多くの手術用ロボットが開発されている[6][7]。近年では軟性内視鏡を対象にしたロボットシステムの開発も進んでいる[8][9][10]。しかし、これらのシステムは治療に特化しており、コンソールから操作入力を行うリーダーフォロワー型システムであるため、大型で、既存の狭い内視鏡室には導入しづらい上、既存内視鏡ユーザは操作方法を学びなおす必要がある。

2. 課題と目的

一般的な内視鏡を操作する際は、左手で操作部を保持しアングルノブを操作して内視鏡先端部の湾曲部を駆動し、右手で挿入部(軟性部)を持って内視鏡の進退と振りを操作する。湾曲部を動かすためには、湾曲部に接続されたワイヤをアングルノブを介して左手の親指で牽引するため、左手の親指には大きな負荷がかかる。操作部自体の重量も重く、術者の肉体的負担は大いため、内視鏡操作により筋骨格障害が引き起こされるという報告がある[11]。

また、ESD のような精緻な動きが要求される手技では、自由度の多いマルチベンディングスコープが望まれるが、操作部には2つのアングルノブがあるためさらに重く、2つ目のノブを操作するためには、右手を挿入部から離す必要があり、操作が煩雑となる。

本報では、これらの課題に対し、既存内視鏡ユーザが慣れている操作方法をできるだけ変えずに、ユーザの肉体的負担を軽減しつつ治療性と操作性を両立する電動湾曲マルチベンディング内視鏡およびその制御システムを開発することを目的とする。

3. 電動湾曲内視鏡システム

3.1 システムコンセプト

既存の内視鏡室に導入可能で、既存ユーザの操作方法と親和性を保つために、内視鏡の進退・振りは、従来通りユーザが右手で操作しつつ、左手の肉体的・技術的負荷を軽減することを基本コンセプトとして、以下の3つの機能を有するシステムを開発する。

独立・協調操作可能な2段湾曲

内視鏡先端での位置・姿勢 6 自由度を実現するために、内視鏡先端部は Pitch-Yaw 湾曲(本報では以後、内視鏡分野の慣例に倣いそれぞれ UD, LR と記載する)を有する湾曲管を2つ直列に接続した2段湾曲の構成とし、内視鏡軟性軸の進退、振りと合わせて6自由度を実現する。なお、処置具の進退も加えると冗長7自由度となる。この2つの湾曲部を、一般的な単段の内視鏡のように協調制御したり、個別に独立制御したりできるようにする。

直観的操作インタフェース

既存の内視鏡は UD, LR の操作部がそれぞれ独立したノブを回転させる構成となっているため、左手だけでこの2つのノブを協調操作するのが難しく、内視鏡操作のラーニ

ングカーブが長い要因の一つとされている。そこで、肉体的負担を低減しつつ直観的な操作インタフェースを有する操作部を実現する。

長距離ワイヤ駆動伝達制御

術者の親指の負担を軽減しつつ、操作部の重量を軽減するために、操作部にワイヤ駆動源を配置せず、映像処理系が配置されている内視鏡トロリーにワイヤ駆動源を配置し、3[m]以上のワイヤによる動力伝達およびその駆動制御を実現する。駆動制御では、高い応答性を実現するために、駆動伝達系のモデル化、およびそれに基づいた補償制御を実現する。

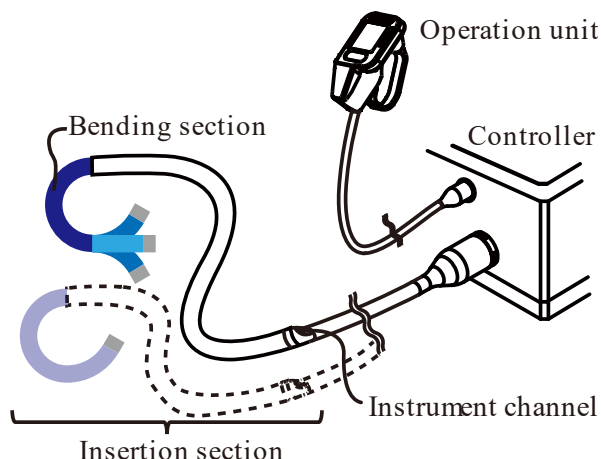


図2 Conceptual diagram of motorized endoscope system

これらの機能を実現するシステム構成を図2に示す。操作部は、挿入部後端の鉗子口附近に取り付けて既存の内視鏡のように操作したり、挿入部とは分離して操作したりすることが可能である。また、様々な種類の内視鏡をコントローラに着脱可能にすることを目指す。

3.2 独立・協調操作可能な2段湾曲

内視鏡先端部に2つのUD-LR湾曲をつけることにより、位置姿勢6自由度を有することになるが、内視鏡の進退と振りには術者が右手で操作するため、逆運動学を解いての先端位置決め制御は困難である。

ESDにおいて重要なことは、図3に示すように管腔壁を突き破らないように粘膜に対して浅い角度でアプローチして病変部を切開・剥離することである。そこで、2段の湾曲部を既存の単段湾曲のように操作して粗位置決めした後、角度を維持したまま先端の湾曲部だけを動かして精密に切開や剥離を行えるように、動作モードおよび2段のそれぞれの湾曲長を設計した。この動作モードの概念図を図4に示す。図4左のように、既存の単段内視鏡のように2段を協調制御させたり、図4右のように1つの湾曲部を固定したままもう一つの湾曲部を独立して駆動したりすることが可能となる。さらに、2段の湾曲に逆位相の入力を入れることで、姿勢を保ったまま先端の位置を移動させるような動きも実現できる。

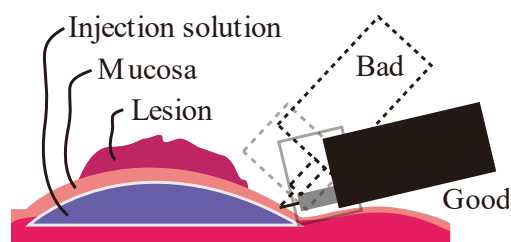


図3 Preferable approach posture of endoscope in ESD

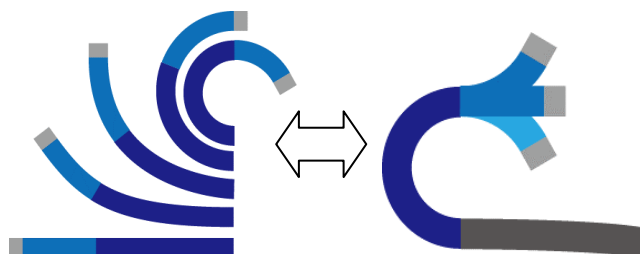


図4 Coordinated and independent control of multi-bending section

3.3 直観的操作インタフェース

操作者の肉体的負担を軽減しつつ、直観的な操作を実現するために、スマートフォン操作で一般的となったタッチパッドを用いて、あたかも内視鏡画面を親指でスライドして操作するかのような操作インタフェースを開発し、直観的な操作の実現を目指す。UD/LRを同時に入力可能なタッチパッドの周辺には、画像処理系のモードを切り替えるスイッチや、電動特有の機能のための各種操作モードを切り替えるスイッチ、操作の入出力比を変更するスライダなどを配置し、これら全ての操作を左手の親指1本で操作可能とする。

3.4 長距離ワイヤ駆動伝達制御

既存内視鏡では、湾曲部遠位端に固定した約1.5[m]程度のワイヤを軟性部に配置したコイルシースを通して操作部のアングルノブで牽引することにより湾曲部を駆動する。しかし本システムでは、ワイヤを牽引するアクチュエータをトロリーに配置するため、約3[m]のワイヤを牽引して先端の湾曲部を既存と同様に駆動する必要がある。ワイヤ経路が長くなることにより、ワイヤの摩擦や伸びの影響が大きくなり、正逆転時の不感帯が大きくなることが予想できる。そこで、ワイヤ・シース系をモデル化し不感帯量を推定して補償する不感帯補償制御を開発した(図5)。事前に同定したワイヤ・シース系の摩擦係数や剛性パラメータと、形状センサ等から得る形状パラメータを基に、摩擦によるワイヤの伸びやたるみを推定し、不感帯量分を補償しワイヤを高速駆動する。

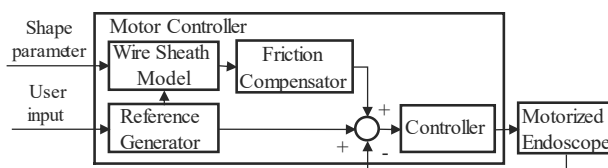


図5 Control system of motorized endoscope

4. 試作した電動湾曲内視鏡システム

4.1 システム外観

システム外観を図 6 に示す。操作部は独立して持つことも、従来のように内視鏡軟性部にあわせて持つこともできるようにになっている。

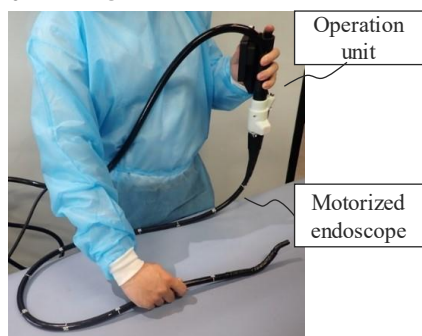


図 6 Motorized endoscope system

4.2 独立・協調操作可能な 2 段湾曲

開発した電動内視鏡の湾曲部を既存内視鏡の湾曲部と並べて比較した様子と、基端側湾曲部を反転した状態で先端湾曲部のみ動作させた様子を合成して示した様子を図 7 に示す。電動内視鏡の 2 段湾曲部の長さが、通常検査で使用されている PCF-H190DL (Olympus) の単段湾曲部の長さと同じ長さであり、2 段の協調操作により通常の挿入診断操作と同様の動作の実現が期待できる。また、治療用内視鏡として湾曲長が短い PCF-H190TL (Olympus) よりも電動内視鏡の先端湾曲長が更に短くなっていることにより先端位置決め精度がより高くなることが期待できる。

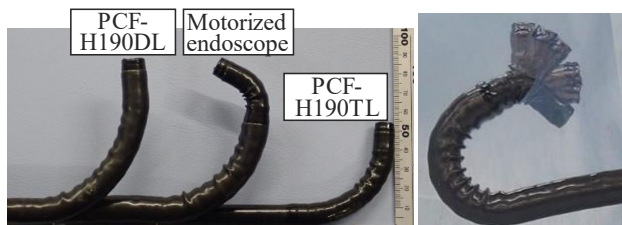


図 7 Comparison of the bending sections and independent motion of the distal bending section

4.3 直観的操作インターフェース

タッチパッド式操作部の外観を図 8 に示す。感圧式のタッチパッド上で UD/LR を親指 1 本で入力可能とし、UD/LR の同時入力も可能となっている。さらに、湾曲操作モードの切り替えスイッチ群をタッチパッドの左部に配置し、2 段の湾曲部を既存の単段の内視鏡のように協調して動かすモードや、姿勢を保ったまま位置を移動させる z-turn モードで粗位置決めをした後、先端湾曲部のみを操作するモードに切り替えるといった操作が実現できる。

また、湾曲操作後、その湾曲操作をロックしたままにするか、既存の内視鏡でアングルノブから指を放した時のように湾曲部の湾曲が解除されるかを、タッチパッドから指を離す際に、タッチパッドを押してから離すか、タッチパッドから自然に指を離すかで切り替える機能を搭載することで、親指一本での容易な切替を実現した。さらに、タ

ッチパッドの下部には、入出力比率を変更するためのスライド式のタッチパネルを用意し、操作入力に対して湾曲部をより精密に動かすことを可能とした。タッチパッド背面部は、操作部単体でも内視鏡と組み合わせてでも保持できるようにになっている。人差し指がかかる部分には、既存と同じように送気・送水・吸引用のボタンが配置してある。

操作部からワイヤ駆動系を取り除くことで、操作部重量は既存のマルチベンド型操作部重量に対し 77[%] 減となり、大幅に軽量化することができた。

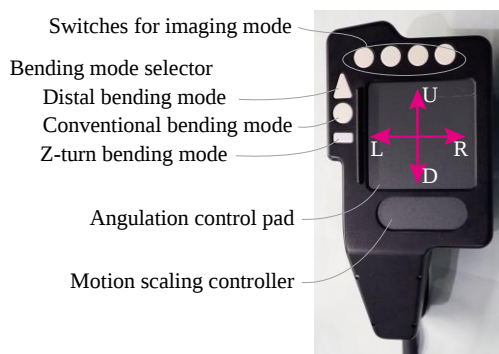


図 8 Operation units

4.4 長距離ワイヤ駆動伝達制御

不感帯補償制御の効果を確認するため、図 9 に示すように先端から 300 [mm] の位置で 360 [deg] の半径 75 [mm] のループをつけて電動湾曲内視鏡を配置し、図 10 に示すように湾曲管の往復動作を行った。ただし、今回は評価の単純化のためワイヤ長 3.2 [m] の単段湾曲電動内視鏡を用いて検証した。なお、湾曲角度実験値は、既知の外部マーカを内視鏡自身のカメラで撮像し、自己位置同定した結果を示しており、角度精度はおおよそ 1 [deg] である。内視鏡湾曲角度の指令値及びその結果の時系列変化を図 11 に示す。補償制御をかけることにより反転時も遅れなく湾曲管が追従することが確認できた。

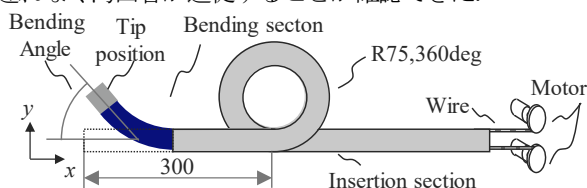


図 9 Experimental condition

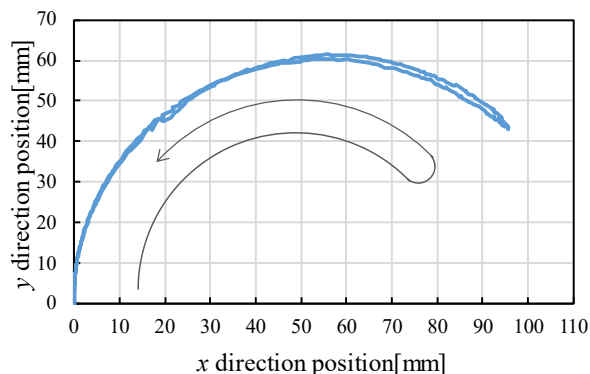


図 10 Trajectory of distal end in bending motion

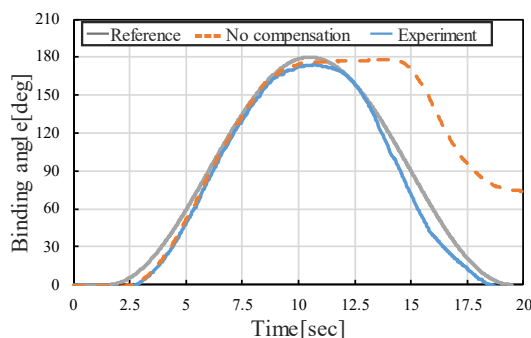


図 11 Experimental result of the friction compensation control

4.5 電動湾曲内視鏡を用いた ESD の実施

上行結腸でのESDを模擬し、模擬臓器 (KOTOBUKI Medical 株式会社) に対し、試作した電動湾曲内視鏡システムを用いて操作性を評価した。実験の様子を図 12, 図 13 に示す。左上に内視鏡画面、右上にシステムが認識している動作状況を CG(Computer graphic)で示したもの、下図が湾曲部を俯瞰した画像である。このCGは、内視鏡画面の左下に表示可能で、ユーザは湾曲状態を俯瞰して見ることができる。協調湾曲モードで病変部にアプローチ(図 12)した後、先端湾曲のUD操作を用いて粘膜下に潜り込みLR操作で粘膜下を剥離している(図 13)。左手親指でアングルノブを押さえ続ける必要がなくなったことで、指への負担が軽減すると共に、医師ではない開発者でもUDとLRの協調操作ができ、容易にESDを実施できることが確認できた。



図 12 Operating bending section in coordinated mode in ESD performance evaluation.

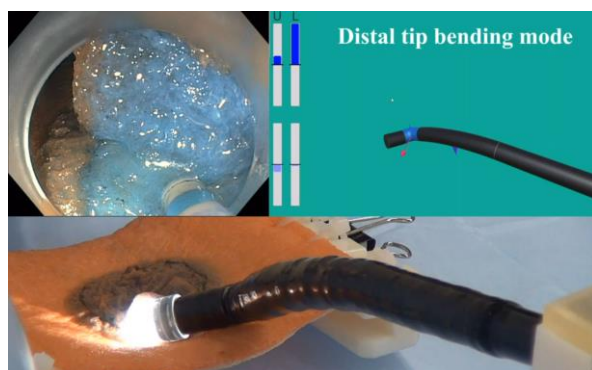


図 13 Operating bending section in independent mode in ESD performance evaluation.

5. 結論

既存内視鏡ユーザが慣れている操作方法をできるだけ変えずに、術者の肉体的負担を軽減しつつ治療性と操作性を両立するマルチベンディング電動湾曲内視鏡およびその制御システムを開発した。この電動内視鏡システムを用いてESDができることを確認した。今後、医師によるコンセプト評価を実施する。

なお、本報で報告した電動湾曲マルチベンディング内視鏡システムは、医薬品医療機器等法未承認品であり、研究開発中のものである。

参 考 文 献

- [1] 田中, 樫田, 斎藤, 矢作, 山野, 斎藤, 久部, 八尾, 渡邊, 吉田, 斉藤, 鶴田, 五十嵐, 豊永, 味噌, 杉原, 楠, 小池, 藤本, 田尻: “大腸ESD/EMRガイドライン (第2版)”, 日本消化器内視鏡学会雑誌, vol.61, no. 6, pp. 1321-1344, 2019.
- [2] 小野, 八尾, 藤城, 小田, 上堂, 二村, 矢作, 飯石, 岡, 味噌, 藤本: “胃癌に対するESD/EMRガイドライン (第2版)”, 日本消化器内視鏡学会雑誌, vol. 62, no. 2, pp. 273-290, 2020.
- [3] T. Sakamoto, G. Mori, M. Yamada, Y. Kinjo, E. So, S. Abe, Y. Otake, T. Nakajima, T. Matsuda, Y. Saito: “Endoscopic submucosal dissection for colorectal neoplasms: A review”, World J Gastroenterol, vol. 20, no. 43, pp. 16153–16158, 2014.
- [4] “EVIS LUCERA 上部消化管汎用ビデオスコープ GIF-2T Q260M”, https://www.olympus-medical.jp/product/gif/gif_2tq260m
- [5] N. Yahagi, M. Fujishiro, N. Kakushima, S. Kodashima, M. Nakamura, M. Omata: “CLINICAL EVALUATION OF THE MULTI-BENDING SCOPE IN VARIOUS ENDOSCOPIC PROCEDURES OF THE UPPER GI TRACT”, Digestive Endoscopy, vol. 17, pp. 94-96, 2005.
- [6] Intuitive Surgical: “Da Vinci Surgical Systems”, <https://www.intuitive.com/en-us/products-and-services/da-vinci>
- [7] 井上 慎太郎, 岸 宏亮, 高橋 誠也, 佐久間 一郎, 小野 稔: “エンコーダによる把持力推定技術とそれを用いたマスタスレーブ型手術支援システム”, 日本ロボット学会誌, vol. 31, no. 9, pp. 928-935, 2013.
- [8] 相原 弘之: “全層切除・ロボットESDの現状と今後の展望—アメリカの最先端の現場から—”, 日本消化器内視鏡学会雑誌, vol. 64, no. 1, pp. 19-28, 2022.
- [9] Intuitive Surgical: “Ion Robotic Bronchoscopy”, <https://www.intuitive.com/en-us/products-and-services/ion>
- [10] 岸 宏亮: “消化器内視鏡治療支援システムの実用化に向けた取り組み”, 日本機械学会誌, vol. 120, no. 1186, pp. 18-20, 2017.
- [11] Riddi W, Coté GA, Leung W, Buschbacher R, Lynch S, Fogel EL, Watkins JL, Lehman GA, Sherman S, McHenry L.: “Prevalence and risk factors for musculoskeletal injuries related to endoscopy”, Gastrointest Endoscopy, vol. 81, no. 2, pp. 294-302, 2015.