

## 軟性内視鏡ロボットの現況と方向性

久米 恵一郎\*

産業医科大学 医学部 第3内科学

**要 旨**：軟性内視鏡分野のロボット開発は、経管腔の内視鏡手術(natural orifice transluminal endoscopic surgery: NOTES)における tissue triangulation を可能にするプラットフォームとして研究が始まった。その後、早期消化管癌に対する内視鏡的粘膜下層剥離術(endoscopic submucosal dissection: ESD)の出現・普及により現行の診断目的に開発された軟性内視鏡による治療手技の限界が改めて意識され、上下部消化管内視鏡分野にも治療を目的とした内視鏡ロボットの開発が始まる。軟性内視鏡の先端に両手のように2本のアームが搭載されたものが中心で、把持、牽引、切開、切除、止血などの手技を可能にしたが、ロボット化のメリットを具現した理想的な最終形態は提示されていない。本稿では、軟性内視鏡ロボットの開発状況と筆者の開発したロボットについて概説する。

**キーワード**：軟性内視鏡ロボット, 経管腔の内視鏡手術, 内視鏡的粘膜下層剥離術, tissue triangulation.

(2015年2月13日 受付, 2015年4月20日 受理)

### はじめに

現在、いくつかの医療分野で進行するロボット化のコンセプトは、「操作の支援」にある。上下部消化管内視鏡に代表される軟性内視鏡分野のロボット開発は、経管腔の内視鏡手術(natural orifice transluminal endoscopic surgery: NOTES)における tissue triangulation を可能にするプラットフォームとして研究が始まった[1-2]。安全かつ安定した組織切開・切除を実現するために、対象となる脆弱な組織に微妙な牽引をかけ、かつ良好な視野を維持することを triangulation と呼ぶが、この triangulation を機能の集約された1本の軟性内視鏡に適切な「操作支援」として如何に搭載するかが解決すべき課題であり、現在も妥当な最終形態は提示されていない。

一方、腹腔鏡下手術分野では、術者の手の生理的震えを除去する filtering 機能などの術者の努力や上達では克服できない「操作の支援」を実現した“da Vinci”の出現により、一般臨床にロボット手術が導入され成功している。

本稿では、現在の軟性内視鏡分野のロボット分野の開発状況と“da Vinci”の成功ポイント、および筆者の取り組みにつき概説する。

### 軟性内視鏡の限界

軟性内視鏡は診断目的に開発されたこともあり、長い軟性の挿入部をもち、その先端を上下左右にコントロールする2つのアングルノブ1,2軸、内視鏡の挿脱3軸、軸の回旋の4軸を基本操作としている。これに送気と吸引および1つの鉗子チャンネルを介して行う処置操作で、複雑な治療手技を実施しなければならない。様々な処置具・デバイスの開発が、この軟性内視鏡での治療手技を可能にしてきたが、早期消化管癌の内視鏡治療の適応を拡大することとなる内視鏡的粘膜下層剥離術(endoscopic submucosal dissection: ESD)の登場により、改めて軟性内視鏡による治療手技の限界を痛感させられることとなった。早期癌を伴う粘膜面を管腔側に牽引もしくは持ち上げることを counter traction と呼ぶが、ESDでは、この counter traction により牽引され

\*対応著者：久米 恵一郎, 産業医科大学 医学部 第3内科学, 〒807-8555 北九州市八幡西区医生ヶ丘1丁目1番, Tel: 093-603-1611, Fax: 093-692-0107, E-mail: k-kume@med.uoeh-u.ac.jp

て露出した粘膜下層を、電子ナイフを用いてひたすらノミで彫刻するように剥離しなければならない。出血する度に止血を要し、曲面である消化管の剥離は一期的には行えないので行き詰まればその度に適切なcounter tractionを獲得し直して、電子ナイフの挿入角度を調節しながら剥離を進行させねばならない。これを1本の軟性内視鏡で行っていると知らぬ間に5時間程度は過ぎていたこともある。この手技の律速段階を解決すべく様々な処置具・デバイスが開発されてきた[3-4]。有効なcounter tractionを獲得するものとしては、先端フードの装着・糸付きクリップ・外付けチャンネルを介する把持鉗子などがあるが、いずれにも特有の短所・限界がある。先端フードには視野の狭細化、糸付きクリップには剥離の進行に伴うcounter traction能の低下、外付けチャンネルを介する把持鉗子では内視鏡の軸方向のみでの調節に限定され、それぞれ局面によってはその存在が障害となる[5]。電子ナイフも、切除効率の上昇、穿孔の回避、緻密な剥離などの観点から数多のデバイスが開発された[3-4]。

筆者らもこの難点を改善するため、いくつかの処置具・デバイスを開発した。先端フードに可動式の弧状ナイフを装着し、鉗子チャンネルから把持鉗子を挿入可能としたフード型ESDナイフは、「洗浄用キャップナイフアタッチメント(Type KUME)」として市販化され、切除効率は高かったが、病変部位が限定され剥離深度のコントロールが難しかったためか、普及しなかった[6-8]。「高粘稠物質による鈍的剥離を原理としたESD」は、高粘稠物質を局注することのみで、自動的に粘膜下層が剥離されるため、局注後に周辺切開を実施すればESD完了となり画期的かと思われたが、ミニ豚を用いた全麻下の動物実験では成功したものの、臨床応用では止血に難渋した[9-11]。他に臨床応用に至ったものに「凝固洗浄機能付先端アタッチメント」[12]、動物実験で終了したものに「ワイパーナイフ」[13]、「スイングナイフ」[14]、「内視鏡用ファンデバイス」[15]、「振動機能付き内視鏡」[16-17]などがあるが、いずれも現時点の軟性内視鏡の限界を超えるに至らなかった。

ESDなどの難易度の高い内視鏡治療に対し数多の処置具・デバイスが開発されてきたが、診断目的に開発された現行の軟性内視鏡に迎合する形態で開発されるので、その限界は自明である。

以上のような限界と今後軟性内視鏡治療が拡大・発展して行きそうな領域を睨みながら、NOTES自体の発展は停滞気味であるが、NOTESの出現で開発の緒に付いた軟性内視鏡ロボットの開発は消化器内視鏡治療の分野にも進出した。

## 軟性内視鏡ロボットの現状

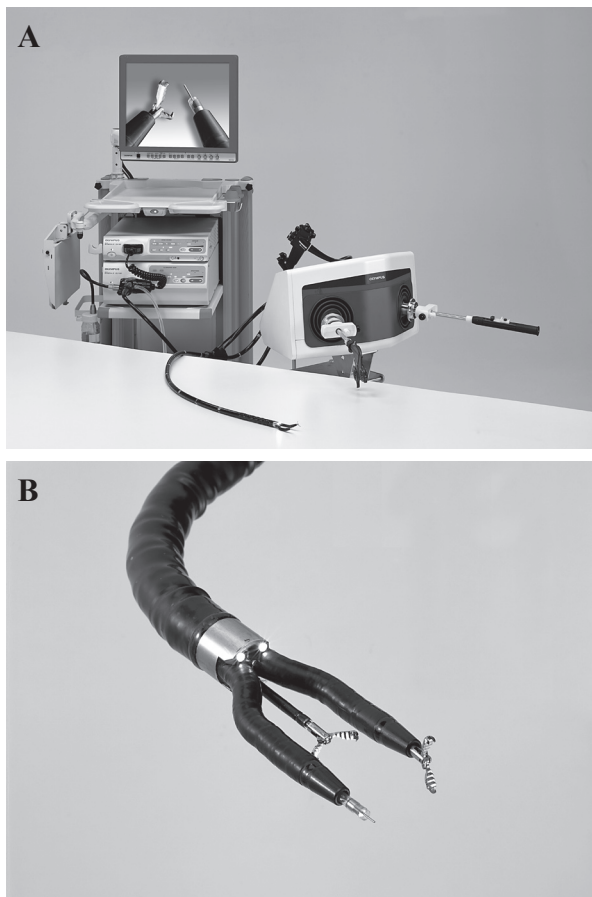
軟性内視鏡ロボットは、軟性内視鏡の先端に両手のように2本のアームが搭載されたものが中心で、この2本のアームによりの確なtissue triangulationを得て、把持、牽引、切開、切除、止血などの要素手技を直感的に実現できることを目指している。代表的な軟性内視鏡ロボットを概説する。

### 1) MASTER (Master and slave transluminal endoscopic robot)

MASTERは、シンガポール大学が中心となって開発されている。胃病変ESDの臨床例が実施された唯一のロボットで、5例が行われている。病変部位は前庭部4例、体部大弯1例、平均病変径2.2 cm (1.5-3 cm)で、平均施行時間39.2分(26-68分)の成績である[18]。オリンパス社製GIF-2T240の2つの鉗子チャンネルに7自由度のロボット鉗子が装着されている。これらはアクチュエータによる電動式で、専用のマスタ装置を専任の術者が遠隔操作し、内視鏡本体はもう1人の術者により通常操作される。しかしながら、MASTERが手技に使用されたのは、粘膜下層の剥離のみで、マーキングや周辺切開は通常の内視鏡により行われるため、5病変のESDでいずれも3回の内視鏡の入れ替えを行っている。

### 2) ENDOSAMURAI™

ENDOSAMURAI™は、オリンパスメディカルシステムズ社が開発した内視鏡の先端に2本のアームを装備したプラットフォームで、内視鏡本体および2本のアームに鉗子チャンネルを備え、3本の鉗子を差し替え可能で同時に使用できる(Fig. 1)。MASTERと同様、2本のアーム操作専任の術者と内視鏡本体の従来操作のための内視鏡医の2名が手技に最低必要である。マニュアル操作のため、内視鏡の挿入部が屈曲すると操作性が低下することやMASTERに比べ全体がやや大きいことが操作の緻密性に影響する可能性があるが、鉗子の入れ換えが可能なのは利点である。しかしながら、NOTES目的に開発されたこともあるが、登場してかなりの年月が経過し、改良が加えられているものの、腹腔鏡下で従来鉗子に比べて操作性が高いこと[19]や内視鏡的全層切除[20]などを動物実験で実証するに留まり、同社に確認したところいまだ臨床使用されていない。



**Fig. 1.** ENDOSAMURAI™ (OLYMPUS), A: the system, B: the insertion part.

### 3) The direct drive endoscopic system (DDES)

DDESは、ボストンサイエンティク社が開発したオーバーチューブの先端に2本のアームを装備したプラットフォームで、通常内視鏡をチューブ内に挿入するため、内視鏡とアームの動きが同期しない点が利点である。前二者と同様、2本のアーム操作専任の術者と内視鏡本体の従来操作のための内視鏡医の2名は手技に最低必要である。2本のアームには把持鉗子やハサミ鉗子などの幾つかの鉗子を選択できる他、画期的だったのは持針器による縫合を実現したことである[21]。しかしながら、その性能は動物実験にて実証するに留まり、臨床使用例の報告もなく、開発も中止している。

### 4) Anubiscope®

Anubiscope®は、Research Institute against Digestive CancerとKarl Storz社が共同開発した内視鏡の先端に2本のアームを装備したプラットフォームだが、特徴的

なのは本体を消化管内に挿入する際には先端が流線型のカプセル状となり、消化管内に挿入後カプセル部分が中央から2つに割れて開口し、格納されていた2本のアームの操作が可能となることである。工業デザイン的にも美しいプラットフォームである。動物実験で大腸ESDを実現し[22]、経臍的なNOTESとなる胆嚢摘出術が臨床例として報告されている[23]。

### 5) その他

Cobra systemは、3本のアームを装備したプラットフォームだが、鉗子の交換ができないため、DDES同様内視鏡の入れ替えを要する。主だった性能試験なども報告されていないため詳細は不明である[24]。Viacath systemは、7自由度をもつ軟性シャフトの鉗子システムで、オーバーチューブ下に2本使用したプラットフォームとして腹腔鏡下手術用に開発されたが[2]、その後消化器領域外で発展した。

## Endoscopic Operation Robot (EOR)

EORは、筆者が医工連携で共同開発中の軟性内視鏡ロボットである。前項で概説した如く、軟性内視鏡の先端に両手のような2本のアームが搭載されたプラットフォームが開発の主流だが、これらのプラットフォームには専任の術者と通常の内視鏡自体を操作するもう1人の内視鏡医が必須である。筆者は、まず後者の通常の内視鏡操作をプラットフォーム化することが必要と考え、EORの開発に着手した。理由は、①原則1人の内視鏡医によりすべての操作を可能にすること、②アーム型鉗子により緻密かつ直観的な操作を可能にするにはアームのサイズが限定されるため、例えば治療困難部位にある大型病変をESDするには、アーム操作と内視鏡本体の操作を同期させた上での直観的な操作が要求されると予想されること、③通常軟性内視鏡の経験的な操作感がEOR操作の直観性に活かされると予想されたことの3点である。

EORは、現在第3世代まで開発している。1号機は、2つのジョイスティックにより軟性内視鏡の4軸の遠隔操作を可能にした(Fig. 2)。右側のジョイスティックがスコープ本体の上下アングルノブと左右アングルノブの操作を担当し、左側のジョイスティックがスコープ本体の回旋と出し入れの操作を、また、3個のフットスイッチにより送気・レンズ洗浄を担当させ、軟性内視鏡の完全な遠隔操作を可能とした。この1号機を用いて大腸内視鏡挿入トレーニングモデルにおける盲腸までの挿入時間を検討し、訓練によりラーニング

カーブが描けることを確認した[25-26]。2号機では、トルクの伝達に関する2点の問題の解決と、1号機では駆動系を内視鏡スコープに直付けしたため緊急時に取り外して従来の用手的操作を可能にする安全機構がなかったため、着脱可能な仕組みを搭載して、現行の内視鏡を容易に着脱できる支援装置として完成させた。大腸内視鏡挿入トレーニングモデルにおける盲腸までの挿入時間を大幅に短縮した[27]。3号機では、臨床試験を念頭において双方向の力覚フィードバック機能を搭載することを目的とした。消化管、特に複雑に屈曲する大腸に挿入する軟性内視鏡の操作は、挿入される消化管からの反力とスコープ自体のしなりを合わせた力覚を前提に行っている。この力覚をマスタ(操作)装置で感じ、術者がマスタ装置に加えた力量が等量で内視鏡の先端に伝達する双方向の力覚フィードバック機能の搭載が軟性内視鏡を遠隔操作するために必須と考えた。実際には力覚を感じながら挿脱方向にスライド可能なマスタデバイスのハンドルを握り、ハンドルを回転させることで回旋動作となる2軸に力覚フィードバック機能を搭載し、アングル操作を可能にするミニジョイスティックをハンドル部に装着して片手で操作可能なマスタロボットとして完成した(Fig. 3)[28]。大腸内視鏡挿入トレーニングモデルにおける盲腸までの挿入(京都科学社モデル：パターン1)では、8人の内視鏡医により各6回全48回の挿入で平均1分58秒であり、臨床に準じた直観的な挿入感を獲得できた[29]。3号機により、軟性内視鏡操作支援としてのプラットフォーム化に一定の目処が付いたので、現在EOR専用の鉗子アームの開発に移行している。

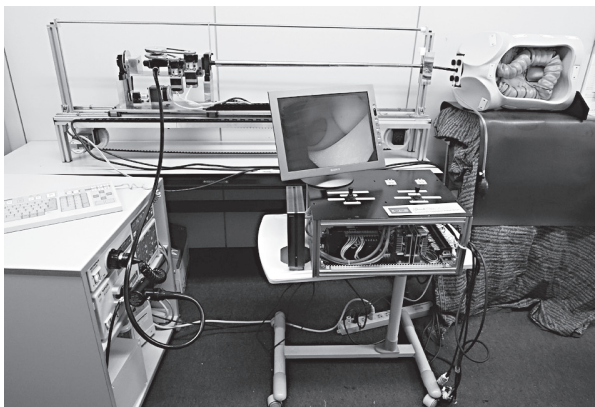


Fig. 2. The Endoscopic Operation Robot version 1.

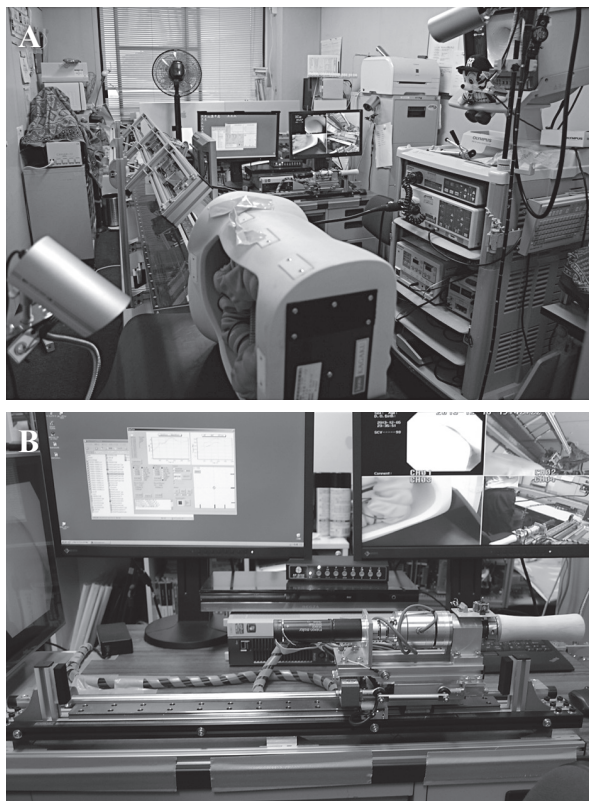


Fig. 3. Teh Endoscopic Operation Robot version 3. A: the system, B: the manipulation unit.

### da Vinciの特徴と現状

da Vinciが提供する「操作の支援」は次の3つの要素、すなわち、①術者の手の生理的震えを除去する filtering 機能、②微細な処置を可能にする motion scaling 機能(顕微鏡で最終のピントを合わせる調節ネジの機能から想起しやすい。)、③3次元モニター下の3D画像から成る。これらの特徴的な機能により、術者の努力や上達では克服できない操作性が提供され、それまでになく精度の高い手術を可能にしている。消化器領域では、例えば、直腸癌の手術において狭い骨盤内での神経温存や骨盤深部の肛門管付近の操作に威力を発揮し、通常の腹腔鏡下手術に比べ、切除断端の陽性率と性腺機能障害の有意な低下[30]や肛門を温存する内括約筋切除術でのメリットが報告されている[31]。一方、婦人科領域では、リンパ節郭清を伴う広汎子宮全摘術では有効だが、単純子宮全摘術では単にコスト高となるだけで手術自体にはメリットの無いことが報告されている[32]。術者の努力や上達では克服できない「操作の支援」は、この操作を習得した術者に、微細な血管

の吻合・神経温存・困難極まる癒着の丹念な剥離などを可能にすることで、これまでにない精度と完成度の高い手術、予後やQOLを改善する手術を出力させる一方で、単純な摘出術などの精緻さを要求されない手術、「操作の支援」を活かせない術者には、コスト高が重荷となるだけで有用な機器とはならないようである。

da Vinci手術も単に入院期間を短縮する程度ではコストに見合わないが、QOLの向上も術後患者の社会的生産性を高める程度の身体的高機能を維持し、豊かな人生を営めるのであれば、大局的な社会的コストとして見合う可能性もある。

### 今後の課題

軟性内視鏡ロボットの現状は、da Vinciに遠く及ばない。臨床例は現行の治療に優位性を提示するものではなく、動物実験もそれぞれのデバイスに都合のよい手技を提示しているにすぎない。MASTERが実現したESDの病変部位・大きさでは、現行のESDを実施する内視鏡医が通常実現できる手技時間であり、困難さもほぼ感じずに完遂できる容易な病変なため、ロボット化のメリットはない。ロボット化の意義を見出すとすれば、例えば、治療困難部位にある癒着形成を伴う大型病変で穿孔などのリスクを感じながら長時間緊張を強いられるようなESDを、トレーニングを要さない直観的かつ容易な操作で程良い緊張下に短時間で完遂できるようにすることである。しかし、一方でこのような病変のみが対象であれば使用頻度が限られるので、胆嚢系の内視鏡治療や内視鏡的全層切除術などの今後の展開が期待される治療手技、単孔式腹腔鏡下手術、NOTESなどにも使用できる汎用性がないとコスト面で厳しい。またda Vinciが、手の震えや微細な操作など術者の努力や上達では克服できない「操作の支援」により緻密な手術を可能にし、予後やQOLを改善する手術を可能にする優位性を提供したように、軟性内視鏡ロボットとしてもコストに見合う優位性を提示しなければならない。筆者はEOR開発のコンセプトを、ウイスキーの瓶の中で帆船を組み立てるような作業に例えられる内視鏡治療を、あたかもウイスキーの瓶の中から取りだしたように操作できる「治療の容易化」を実現する内視鏡ロボットとして開発することとした。

現在、先端に両手のように2本のアームを装着するかはともかく、tissue triangulation他、後述する軟性内視鏡ロボットが満たすべき課題を検討しながら、EORに搭載・合体可能な鉗子アームのマスタースレーブ型装置の開発に取り組んでいる。鉗子アームの操作性に緻密

さを追求すれば関節の多自由度化に傾くが、マスタ装置が複雑となり操作の直観性が犠牲になる。各アームの長さや関節の位置、各アームの到達距離・展開可能な術野は、直観性・操作性に強く影響するため、アームは長すぎても短すぎても、広すぎても狭すぎても不都合である。病変が如何に大きくとも、またどの部位に存在しようとも治療可能でなければならない。鉗子アームの緻密な操作性を維持するためには、アーム単独の展開領域は限定されるので、内視鏡本体も同期する操作性が要求される。一方、現行の内視鏡治療は1本の内視鏡操作にすべてが同期してしまうことが手技の限界となっていることから、同期性がすぎれば本末転倒である。また、これらを実現する素材・剛性の検討、術野を視認するカメラの追従性や3D化の要・不要と課題は数多にのぼる。これらの課題を解決して、然したるトレーニングも要さず直感的に治療できる軟性内視鏡ロボットが必要である。内視鏡治療は、全身麻酔を要さず、1人の内視鏡医が短時間で完遂できる低侵襲であるから発展してきた。内視鏡治療のロボット化が目指すところは、da Vinci手術が果たした臓器摘出に伴うQOLの低下の改善という患者へのメリットは価値対象とはならないので、如何に内視鏡医のQOLを改善するかが標的となる。コストに見合いかつ現行の軟性内視鏡治療では実現し得ない「手技の容易化」を提示して初めて普及する可能性が視野に入る。一方、日本が世界に冠たる技術立国でありながら、普及する製品をなかなか世界に提供できないのは、過剰な機能を搭載して孤立化してしまうことにある。内視鏡医を満足させる性能を確保できたら、如何に贅肉を削ぎ落とすかを検討しなければならない。理想的な軟性内視鏡ロボットの出現には、まだまだ紆余曲折が予想されるが、筆者も上述した課題を克服しながら、帆船の組み立て作業をウイスキーの瓶の中から取りだしたいと考えている。

### 謝 辞

EOR 1, 2号機的设计・開発では、九州職業能力開発大学校生産技術科教授 黒木猛先生、同教授 新貝雅文先生に、3号機的设计・開発では九州工業大学大学院先端機能システム系准教授 坂井伸朗先生、同大学院先端機構システム工学系 後藤高彰氏に、一部部材の開発・提供では、吉川工業株式会社技術部長・執行役員 権藤拓氏、エンジニアリング・機械事業部室長 大坪純一氏に、医工連携のマネジメントなどでは日本文理大学工学部情報メディア学科准教授 稲川直裕先生、産業医科大学産

学連携的財産担当教員講師 橋本正浩先生に、御協力を頂いております。この場を借りて、改めて御礼申し上げます。

EORの研究開発は、産業医科大学高度研究費(高度H23-3)、科学研究費(課題番号23500573, 26350554)、高松宮妃癌研究基金研究助成金(13-24505)、北九州産業学術推進機構産学連携開発助成金シーズ探索助成金を得て実施しております。

### 利益相反

なし。

### 引用文献

- Swanstrom LL (2011): NOTES: Platform development for a paradigm shift in flexible endoscopy. *Gastroenterology* 140: 1150-1154
- Yeung BP & Gourlay T (2012): A technical review of flexible endoscopic multitasking platforms. *Int J Surg* 10: 345-354
- Kume K (2009): EMR and ESD for early gastric cancer: Current and original devices. *World J Gastrointest Endosc* 1: 21-31
- Kume K (2014): Endoscopic therapy for early gastric cancer: Standard techniques and recent advances in ESD. *World J Gastroenterol* 20: 6425-6432
- Imaeda H, Hosoe N, Kashiwagi K, Ohmori T, Yahagi N, Kanai T & Ogata H (2014): Advanced endoscopic submucosal dissection with traction. *World J Gastrointest Endosc* 6: 286-295
- 久米恵一郎(2008): 内視鏡用フードナイフ. 特許第4061594号
- Kume K, Yamasaki M, Kanda K, Yoshikawa I & Otsuki M (2005): Endoscopic submucosal dissection using a novel irrigation hood-knife. *Endoscopy* 37: 1030-1031
- Kume K, Yamasaki M, Yoshikawa I & Otsuki M (2007): Grasping-forceps-assisted endoscopic submucosal dissection using a novel irrigation cap-knife for large superficial early gastric cancer. *Endoscopy* 39: 566-569
- 山崎雅弘, 久米恵一郎, 学校法人産業医科大学(2005): 高粘稠物質を用いた内視鏡的粘膜剥離術及びそのシステム. 特許第4761921号
- Yamasaki M, Kume K, Kanda K, Yoshikawa I & Otsuki M (2005): A new method of endoscopic submucosal dissection using submucosal injection of jelly. *Endoscopy* 37: 1156-1157
- Yamasaki M, Kume K, Yoshikawa I & Otsuki M (2006): A novel method of endoscopic submucosal dissection with blunt abrasion by submucosal injection of sodium carboxymethylcellulose: an animal preliminary study. *Gastrointest Endosc* 64: 958-965
- Kume K, Yamasaki M, Yoshikawa I & Otsuki M (2006): New device to perform coagulation and irrigation simultaneously during endoscopic submucosal dissection using an insulation-tipped electro-surgical knife. *Dig Endosc* 18: 218-220
- Kume K, Yamasaki M, Kanda K, Yoshikawa I & Otsuki M (2007): Endoscopic submucosal dissection using a novel irrigation wiper knife. *Endoscopy* 39: E144
- 久米恵一郎(2006): 内視鏡用高周波切開具(スイングナイフ). 特願2006-113837号
- Kume K (2009): Endoscopic therapy using novel fan devices. *Endoscopy* 41: E236-E237
- 久米恵一郎, 公益財団法人北九州産業学術推進機構(2013): 内視鏡. 特許第5072021号
- Kume K (2010): Endoscopic submucosal dissection using a novel vibration endoscopy. *Hepatogastroenterology* 57: 224-227
- Phee SJ, Reddy N, Chiu PW, Rebala P, Rao GV, Wang Z, Sun Z, Wong JY & Ho KY (2012): Robot-assisted endoscopic submucosal dissection is effective in treating patients with early-stage gastric neoplasia. *Clin Gastroenterol Hepatol* 10: 1117-1121
- Spaun GO, Zheng B & Swanstrom LL (2009): A multitasking platform for natural orifice transluminal endoscopic surgery (NOTES): a benchtop comparison of a new device for flexible endoscopic surgery and a standard dual-channel endoscope. *Surg Endosc* 23: 2720-2727
- Ikeda K, Sumiyama K, Tajiri H, Yasuda K & Kitano S (2011): Evaluation of a new multitasking platform for endoscopic full-thickness resection. *Gastrointest Endosc* 73: 117-122
- Thompson CC, Ryou M, Soper NJ, Hungess ES, Rothstein RI & Swanstrom LL (2009): Evaluation of a manually driven, multitasking platform for complex endoluminal and natural orifice transluminal endoscopic surgery applications (with video). *Gastrointest Endosc* 70: 121-125

22. Diana M, Chung H, Liu KH, Dallemagne B, Demartines N, Mutter D & Marescaux J (2013): Endoluminal surgical triangulation: overcoming challenges of colonic endoscopic submucosal dissections using a novel flexible endoscopic surgical platform: feasibility study in a porcine model. *Surg Endosc* 27: 4130-4135
  23. Perretta S, Dallemagne B, Barry B & Marescaux J (2013): The ANUBISCOPE® flexible platform ready for prime time: description of the first clinical case. *Surg Endosc* 27: 2630
  24. Bardaro SJ & Swanstrom L (2006): Development of advanced endoscopes for natural orifice transluminal endoscopic surgery (NOTES). *Minim Invasive Ther Allied Techol* 15: 378-383
  25. 久米恵一郎, 学校法人産業医科大学(2014): 内視鏡遠隔操作システム. 特許第5605613号
  26. Kume K, Kuroki T, Sugihara T & Shinngai M. (2011): Development of a novel endoscopic manipulation system: The Endoscopic operation robot. *World J Gastrointest Endosc* 3: 145-150
  27. Kume K, Kuroki T & Shinngai M. (2015): Development of a novel endoscopic manipulation system: The Endoscopic Operation Robot Ver. 2. *Hepato-Gastroenterology* (in press).
  28. 久米恵一郎, 坂井伸朗, 後藤高彰, 学校法人産業医科大学, 国立大学法人九州工業大学(2012): 内視鏡操作システム. 特願2012-60648号
  29. Kume K, Sakai S & Goto T (2015): Development of a novel endoscopic manipulation system: The Endoscopic Operation Robot Ver. 3. *Endoscopy* (in press).
  30. Kim JY, Kim NK, Lee KY, Hur H, Min BS & Kim JH (2012): A comparative study of voiding and sexual function after total mesorectal excision with autonomic nerve preservation for rectal cancer: laparoscopic versus robotic surgery. *Ann Surg Oncol* 19: 2485-2493
  31. Park SY, Choi GS, Park JS, Kim HJ & Ryuk JP (2013): Short-term clinical outcome of robot-assisted intersphincteric resection for low rectal cancer: a retrospective comparison with conventional laparoscopy. *Surg Endosc* 27: 48-55
  32. Sarlos D, Kots L, Stevanovic N & Schaer G (2010): Robotic hysterectomy versus conventional laparoscopic hysterectomy: outcome and cost analyses of a matched case-control study. *Eur J Obstet Gynecol Reprod Biol* 150: 92-96
-

## Ongoing Development and Directions in Flexible Robotic Endoscopy

Keiichiro KUME

*The Third Department of Internal Medicine, School of Medicine, University of Occupational and Environmental Health, Japan. Yahatanishi-ku, Kitakyushu 807-8555, Japan*

**Abstract :** The robotic system for flexible endoscopy was first developed as a platform enabling tissue triangulation in natural-orifice transluminal endoscopic surgery (NOTES). Then endoscopic submucosal dissection (ESD) was introduced and has widely been employed for the treatment of early gastrointestinal carcinoma. Subsequently, endoscopists became well aware of the limitations of their endoscopic manipulations with the conventional flexible endoscopes developed for diagnostic use, which led to the development of robotic systems for upper/lower gastrointestinal tract endoscopes intended for therapeutic use. Most flexible robotic endoscopes have 2 mechanical arms attached to the head, allowing surgeons to perform endoscopic manipulations, such as grasping, traction, incision, excision, and hemostasis. However, there are still many challenges that remain to be addressed: the ideal robotic endoscope has not yet been realized. This article reviews the ongoing developments and our own efforts in the area of flexible robotic endoscopy.

**Key words:** flexible robotic endoscopy, natural-orifice transluminal endoscopic surgery (NOTES), endoscopic submucosal dissection (ESD), tissue triangulation.