医用水圧駆動型リニアアクチュエータの開発

Development of a medical hydraulic linear actuator for surgical assistant robotic systems

○学 谷口和弘（阪大基） 西川敦（阪大基） 数原幸平（大研医器）
小林武治（大研医器） 関本貢嗣（阪大医） 瀧口修司（阪大医）
岡田一幸（阪大医） 門田守人（阪大医） 宮崎文夫（阪大基）

Kazuhiro TANIGUCHI, Osaka Univ., taniguti@robotics.me.es.osaka-u.ac.jp
Atsushi NISHIKAWA, Osaka Univ., Kouhei KAZUHARA, DAIKEN MEDICAL Co., Ltd.,
Takeharu KOBAYASHI, DAIKEN MEDICAL Co., Ltd., Mitsugu SEKIMOTO, Osaka Univ.,
Kazuyuki OKADA, Osaka Univ., Shuji TAKIGUCHI, Osaka Univ.,
Morito MONDEN, Osaka Univ., Fumio MIYAZAKI, Osaka Univ.

We developed a medical hydraulic linear actuator for surgical assistant robotic systems. This actuator is driven by hydraulic pressure, and is disposable, and can be sterilized. It mainly consists of a polycarbonate cylinder with a diameter of 10mm and the initial length of 235mm, which elongates to the final length of 360mm. The actuator has the capability of generating forces over 2kgf and its weight is approximately 30g. We will apply this actuator to a laparoscope manipulator using parallel mechanism.

Key Words: Surgical assistant robotics, Linear actuator, Laparoscopic surgery, Disposable, Hydraulic actuator.

1. 緒言

「人間のカメラ助手の代わりに腹腔鏡を把持・位置決めするロボット（内視鏡ロボット）」をはじめさまざまな医用ロボットの開発が国内外で行われている。しかし現行のロボットに使用されているアクチュエータの多くは医療用に開発されたものではないため、清潔性の面で問題がある。例えば一般的なステッピングモータなどの工業用アクチュエータを用いた内視鏡ロボットは、機構を工夫しアクチュエータを清潔野から遠ざける方法や滅菌ドレープでロボット全体を覆うなどの方法で清潔性を確保している。

本稿では、我々が開発を進めている内視鏡ロボット[1, 2]に適用可能な医用水圧駆動型リニアアクチュエータの開発について報告する。我々は、清潔性に重点を置き、ディスプレイブルなアクチュエータの開発を目指している。

2. アクチュエータの一般的な要求仕様[2]

医用ロボットのためのアクチュエータに求められる仕様の中で「安全性」と「清潔性」が最も重要視されている。

はじめに安全性について述べる。医用アクチュエータ（医用ロボット）が引き起こす危険状態や危険源には「コントローラの暴走による患者・医療スタッフとの接触」、「電気配線のショートによる感電」、「アクチュエータの発熱によるやけど」、「不洗浄」、「滅菌不良による細菌感染」、「有害物質による細菌感染」、「有害物質による汚染」、「アクチュエータの転倒・転落」、「アクチュエータの破損・分解」、「操作スケーリングの不整合」、「誤動作」などがある。これらの危険源や危険状態について十分な考慮が必要である。また以下に挙げる Taylor ら[3]による安全性に関する提案も一般的に参考にされている。

- 複数の安全機構、緊急停止機能を備える。
- 利用するアクチュエータのトルクを必要最小限とする。

- 開発時のドキュメント、テスト、品質管理を徹底する。

次に清潔性について述べる。清潔野内の機構に用いるアクチュエータは、清潔（滅菌可能）である必要がある。医療現場で行われている滅菌方法には以下のものがある。

- 滅菌ドレープ：滅菌された布が使い捨ての不織布で不潔な部分を覆ってその表面の清潔性を確保すること。
- エチレンオキシドガス滅菌：ガス充滿下 60℃で 2 から 5 時間滅菌を行う。ガスの除去に数時間かかる。比較的長時間必要な滅菌法である。その一方で加熱に弱い物品に使用できるというメリットがある。
- オートクレーブ滅菌：110℃から 200℃、2 気圧の高温高圧で 20 分以上滅菌を行う。

一般的な工業用アクチュエータを使用した医用ロボットは、ガス滅菌が滅菌ドレープを行っている。理想的にはオートクレーブ滅菌をロボット全体に施すほうが良いが、ステッピングモータなど一般的なアクチュエータは熱に弱いなどの理由からオートクレーブ滅菌が行えないものが多い。

また、「安全性」と「清潔性」以外にも、「機構が単純」「準備や後片付けが容易」「コード類が少ない」などが重要である。

3. 既存の医用アクチュエータの調査検討

3.1 アクチュエータの分類

医用ロボットに利用されているアクチュエータを駆動源で分類すると次のものがある。カッコ内は、アクチュエータを制御する際に用いる物理量をさす。ただし、すべての物理量は直接的、間接的に電圧や電流で制御されている。

- ステッピングモータ・DCモータ（電磁気）
- 超音波モータ（振動）
- 形状記憶合金（熱）

また、アクチュエータを動力伝達方式で分類すると次のものがある。

- リンク機構
- ワイヤ伝達機構
- ベルト伝達機構
- 空気圧駆動／マッキンベン型人工筋肉
- 水圧駆動

ここでは、モータなどにより発生した動力を伝達する媒体（構造、ワイヤ、空気、水）に注目して分類している。

以下、医用ロボットに使用されている代表的なアクチュエータについて簡単に述べる。

3.2 ステッピングモータ・DCモータ

ステッピングモータをアクチュエータに使用している内視鏡ロボットにはPASEO[4]、NaviotTM [5]、Wide-Angle View Endoscope[6]、COVER[7,8]などがある。一方、DCモータを使用しているものには、LER[9]やKaLAR[10]などがある。

電磁気を利用したモータを選ぶ場合、DCモータよりもステッピングモータが良いとされている。DCモータは小型軽量であるが、一度指令を与えると変更があるまで止まることがないので、駆動命令が出された後にコントローラが暴走すると停止命令が出力されずそのまま回り続けることになり危険である。また、一般的な工業用モータは、洗浄できないものが多いため、清潔性を重視した場合、滅菌ドレープではなく、ワイヤ伝達機構やNaviotTM に見られるようなリンク機構などを利用し、モータを清潔野外に設置する方がよいとされている。

3.3 超音波モータ

守屋らはコイル型ステータを用いる超小型超音波モータ[11]を開発している。このモータは、ロータに導波路（ステータ）を巻きつけただけの非常にシンプルな構造である。守屋らは、この超小型超音波モータの血管内超音波法（IVAS）への応用を試みている。

3.4 形状記憶合金

形状記憶合金を使用した医用ロボットには、我々が開発を進めている患者着用型内視鏡マニピュレータ[1,2]や牧志らの能動屈曲電子内視鏡[12]などがある。形状記憶合金は滅菌洗浄可能であり清潔性の面で有利である。駆動速度が遅く歪量が数%程度と小さいため、ゆっくりと微量の動きをするロボットに向いている。

3.5 空気圧駆動方式／マッキンベン型人工筋肉

空気圧シリンダをアクチュエータとしたものに只野らが開発した空気圧駆動多自由度鉗子システム[13]がある。またマッキンベン型人工筋肉を使用したものには、Berkelmanらの内視鏡ロボット[14]がある。両者とも、エアーソースからの動力をいったん清潔野外にある空気圧シリンダや人工筋肉に伝達したのち、清潔野内へその動力をワイヤ伝達機構で伝達している。

3.6 水圧駆動方式

生田らは水圧駆動方式の多自由度能動カテーテル[15]を開発している。この水圧駆動方式のメリットは、通電しないため体内で漏電する可能性がなく安全であることと生理食塩水を使用しているため、万が一破損により駆動水が漏れた場合でも清潔面において問題が生じないことである。

本研究とは、手法、サイズ、出力、そして用途において違う。

3.7 その他のアクチュエータ

我々は、今後の医用アクチュエータの一つとして電圧活性高分子アクチュエータ（EPAM）[16, 17]にも注目している。

4. 水圧駆動型リニアアクチュエータの開発

4.1 基本コンセプト

清潔性を重視した場合、医用アクチュエータも他の医療器具と同様に、滅菌洗浄可能で再利用できるものよりもディスポーザブルなもの（そのまま直ちに使用でき、かつ1回限りで使い捨てるもの）である方がよい。また、破損時も清潔野を汚染しないものでなければならない。汚染の恐れがある場合は、そのアクチュエータを迅速に清潔野外に排除できる機構であるといふ。次に安全性の観点からアクチュエータは通常動作時はもとより破損時も発熱・感電・分解等により患者や医師に危害を与えてはならない。以上の考察をもとに、清潔性と安全性の両方を兼ね備えたアクチュエータとして我々は「水圧駆動ディスポーザブルリニアアクチュエータ」を提案する。本アクチュエータは、ディスポーザブルであるため、医療現場で滅菌洗浄等の前処置をしなくてもそのまま清潔野内で使用可能である。ディスポーザブル化は清潔性以外にも、現場の作業効率向上と機器の安全管理を同時に図ることができる。また本アクチュエータは、チューブを通じて清潔野外に設置したシリンダやポンプから送られる水量によってアクチュエータの駆動量を制御する方式をとるため、漏電の可能性がなく安全である。本コンセプトを4.2節のアプリケーションに応用するための要求仕様を4.3節に記す。

4.2 アプリケーション

本アクチュエータのアプリケーションとして、我々が現在開発している内視鏡ロボット[1,2]を想定している。この内視鏡ロボットは、6本のリニアアクチュエータを用いたStewart-Gough機構で構成されており、手術台や患者の腹部に固定し使用する（図1）。現行のコンセプトモデルのアクチュエータには、形状記憶合金を用いている。しかし形状記憶合金の発熱が安全面において問題であるため、将来的には本アクチュエータへの移行を進める予定である。

Fig.1 内視鏡ロボット

Fig. 2 医用水圧駆動型リニアアクチュエータの外観

Fig. 3 医用水圧駆動型リニアアクチュエータの寸法と材質

4.3 要求仕様

内視鏡ロボットへの応用を目指し、要求仕様を以下のように設定した。

● 清潔性・安全性：

- ①ディスポーザブル化する。ガス滅菌可能とする：清潔性・安全性をメーカー側が管理するので、医用現場での準備や後片付けが容易である。
- ②破損時に、部品や水が周囲に散らばることが無い：アクチュエータの破壊モードを検討し、破損時でも、部品や水をアクチュエータ内部から外に出ない機構とする。
- ③アクチュエータ取り外しが容易：アクチュエータ破損時の交換が迅速に行える。例えば、アクチュエータとロボットとの接続には、永久磁石を用いる。

● コスト：材料費が 1 本 100 円程度である：コスト面でロボットのディスポーザブル化を可能にしている。

● 出力：700gf 以上：6 本のアクチュエータで内視鏡の把持・位置決めを行う場合を想定している。

● 可動範囲：100mm 以上：腹腔鏡下胆嚢摘出術への適応を想定した数値。手術対象により数値の設定が必要。

● サイズ：縮小時のアクチュエータ長 150mm 以下。円柱型で直径 10mm 以下：縮小時のサイズが大きいと術中に邪魔になる。今回の試作では、縮小時のサイズの条件をはずし、可動能力を優先させた。

● 耐久性：負荷を加えた状態で 1000 回の駆動に耐える（手術一回分）：耐久性は、腹腔鏡下胆嚢摘出術一回分の内視鏡操作回数 (MAX.400 回) と安全率 (2.5) の積、負荷は出力と安全率 (1.41) の積である。これらの数値は、我々独自のものである。今後も引き続き、数値を検討していく。

4.4 コンセプトモデル

我々の開発した水圧駆動リニアアクチュエータのコンセプトモデルの外観を図 2 に、サイズと材質を図 3 に示す。アクチュエータを構成する合成樹脂には、ポリカーボネートを使用した。この材料は軽量・耐衝撃性・耐熱性・不燃性・通電性・透明度の高さといった点において、他の合成樹脂よりも優れている。水供給のためのチューブ用継手には、株式会社コガネイ社製クイック継手ミニタイプ T S 3-M3M を用いた。本アクチュエータの材料は、すべてエチレンガス滅菌可能である。本アクチュエータは、100 円程度で製作可能であるため、コスト面でもディスポーザブル化が可能である。

本アクチュエータの機構は、注射器の構造と類似している。ただし、注射器の構造とは異なり、内蔵されたバネ (図 2) により、アクチュエータを縮める方向に (注射器を押し込む方向) に力が常にかけてられている。アクチュエータ両端には、鉄製の球面軸が取り付けられている。ロボット側にはフェライト磁石・黄銅製の球面軸受けを取り付ける。その球面軸は軸受けの磁力のみで把持・固定されているため、アクチュエータの取り外しは手動で容易に行うことができる。

伸張時のアクチュエータ長は、アクチュエータ内の水量とガス量、そして外部からアクチュエータに加わる外力によって決まる。ここでアクチュエータ内のガスの体積が外力によって変化することに注意が必要である。アクチュエータ内のガス量が少ない場合、アクチュエータ長はその内部の水量によって決定できる。そのため製作時にアクチュエータ内のガス抜きを念に行う必要がある。

次にアクチュエータの動作方法について説明する。本アクチュエータは、水をアクチュエータ外部から内部に入れることで伸び方向に動く。また、縮み方向の動きには、アクチュエータ内部の水量を減らすとともにバネの反発力も利用して行う。バネの反発力を利用する理由は、アクチュエータ内部の水量を減らすと、アクチュエータの内部が負圧になり、そこに含まれるガスの体積が増えるため、アクチュエータの動きが鈍くなるからである。

本アクチュエータは、清潔性と安全性の観点から、破壊モードも設計に入れられている。ここで破壊モードとは、アクチュエータに過負荷がかかった場合に、どのようにアクチュエータが破壊するかである。破壊モードは次の順で進む。

1. パッキン (図 3) から少量ずつ水が漏れ出る。漏れた水は、アクチュエータ内部にたまる。
2. 清潔野のチューブ継手 (図 2 のエアシリンダ側) からチューブが外れ、外部に水が漏れる。ただし今回のコンセプトモデルでは、この破壊モードは設定されていない。

以上の破壊モードはいずれも、アクチュエータから水が漏れ出ることによって内圧を減らし、アクチュエータの物理的な破壊を防いでいる。また、アクチュエータに外力が加わり物理的な破損を起こしたときに生じる水漏れや部品の飛び散りを防ぐ対策として、アクチュエータ表面に薄く柔軟な膜をコーティングしておく方法も検討しており、次期モデルで採用する。

Fig. 4 医用水圧駆動型リニアアクチュエータの破壊モード

4.5 動作実験

動作実験として、可動範囲、最大発生力、耐久性（繰り返し可動回数の計測）の測定を行った結果を以下に示す。

- 可動範囲：125mm
- 最大発生力：20kgf 以上
- 耐久性：1kgf（ $=700\text{gf} \times 1.41$ ）の負荷がかかった状態で100mmの伸縮を1000回以上繰り返し動作可能。
- 破損モード：静荷重を増加しながら加えると、パッキンからの水がにじみでた（図4）。20kgf 以下では水漏れはなかった。

ここで、アクチュエータへの水の供給は、SMC 株式会社製エアシリンダ CJ2RA10-75 により行った（図2）。また、最大発生力試験は、アクチュエータに静加重を加えたときの値である。この加重値の測定には、株式会社イマダ製デジタルフォースゲージ DPS-20（Max. 20kgf）を用いた。発生最大荷重は、機器の測定範囲を超えたため測定不能であったが、要求仕様 700gf を十分に満たしている。耐久試験では、アクチュエータの伸張時に 1kgf の負荷をかけて 100mm の伸縮を 1000 回繰り返し行ったのち、目視試験と最大発生力試験によりアクチュエータに劣化が無いことを確認した。以上の結果から、本アクチュエータは、要求仕様を満足していることが確認できた。

5. 結論

我々は、Stewart-Gough 機構で構成された内視鏡ロボット用の医用水圧駆動型リニアアクチュエータを開発した。本アクチュエータは、清潔性に重点を置いて開発し、エチレンオキサイドガス滅菌可能、ディスプレイザブル、破壊時にアクチュエータ外部へ水漏れをおこさないなどの特長がある。本アクチュエータの制御は、清潔野外からチューブを通じてアクチュエータ内部へ水を出し入れることで、その内部の水量を変化させて行う。また、本アクチュエータは機構等を工夫することでロボットとの脱着を容易にした。

今後は、本アクチュエータを内視鏡ロボットに搭載して可動実験を行い、その有用性を評価する。また、その評価結果をふまえて、アクチュエータのサイズや材質の最適化を行うとともに、破壊モードの検討を進め、安全性と清潔性のさらなる向上を目指す。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学技術振興調整費「先端融合領域イノベーション創出拠点の形成：ゆらぎプロジェクト」の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] Taniguchi, K., Nishikawa, A., Sekimoto, M., Yasui, M., Takiguchi, S., Seki, Y., Monden, M., and Miyazaki, F., "Design of a novel wearable laparoscope manipulator: SMART," *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, vol.1, Supplement 1, pp.213-215, 2006.
- [2] 谷口和弘, 西川敦, 関本貢嗣, 瀧口修司, 関洋介, 安井昌義, 門田守人, 宮崎文夫, "患者着用型腹腔鏡把持マニピュレータの提案", 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2006 講演会論文集CD-ROM, 2A1-A07, 2005.
- [3] 波多伸彦, "メディカルロボティクス 岩波講座ロボット学 6 ロボットフロンティア", 第4章, pp. 105-125, 岩波書店, 2006.
- [4] Nishikawa, A., Hosoi, T., Koara, K., Negoro, D., Hikita, A., Asano, S., Kakutani, H., Miyazaki, F., Sekimoto, M., Yasui, M., Miyake, Y., Takiguchi, S., and Monden, M., "FACE MOUSE: A novel human-machine interface for controlling the position of a laparoscope," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 19-5, pp.825-841, 2003.
- [5] Kobayashi, E., Masamune, K., Sakuma, I., Dohi, T., and Hashimoto, D., "A new safe laparoscopic manipulator system with a Five-Bar Linkage Mechanism and an Optical Zoom," *Computer Aided Surgery*, vol. 4, no. 4, pp. 182 - 192, 1999.
- [6] Kobayashi, E., Sakuma, I., Konishi, K., Hashizume, M., and Dohi, T., "A robotic wide-angle view endoscope using wedge prisms," *Surgical Endoscopy*, 18:1396-1398, 2004.
- [7] Taniguchi, K., Nishikawa, A., Yohda, T., Sekimoto, M., Yasui, M., Takiguchi, S., Seki, Y., Monden, M., and Miyazaki, F., "COVER: Compact Oblique Viewing Endoscope Robot for laparoscopic surgery," *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, vol.1, Supplement 1, pp. 207-209, 2006.
- [8] 谷口和弘, 西川敦, 養田隆宏, 伊藤藤奈子, 関本貢嗣, 安井昌義, 瀧口修司, 門田守人, 宮崎文夫 "斜視鏡の光学特性を利用した小型内視鏡マニピュレータの開発", 生体医工学, 45 号 1 巻, 2007. (印刷中)
- [9] Berkelman, P., Boidard, E., Cinquin, P., and Troccaz, J., "Control and User Interface Design for Compact Manipulators in Minimally-Invasive Surgery," *IEEE Conference on Control Applications*, pp.25-30, Aug. 2005.
- [10] J., Kim, J., Lee, Y. J., Ko, S. Y., Kwon, D. S., "Compact Camera Assistant Robot for Minimally Invasive Surgery: KaLAR," *In Proc. of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan, PP.2587-2592, 2004.
- [11] 守屋正, 古川勇二 "医療用超小型超音波モータの開発と応用", 日本機械学会講習会 No. 06-28 教材, pp. 25-30, 2006.
- [12] 牧志渉, 松永忠雄, 江刺正喜, 芳賀洋一, "形状記憶合金を用いた能動屈曲電子内視鏡", 第14回日本コンピュータ外科学会合同論文集, pp. 59-60, 2005.
- [13] 只野耕太郎, 川島健嗣, "力学提示機能を有する空気圧駆動多自由度鉗子システムの開発", 第14回日本コンピュータ外科学会合同論文集, pp. 219-220, 2005.
- [14] Berkelman, P. J., Cinquin, P., Troccaz, J., Ayoubi, J-M, and Letoublon, C., "Development of a compact cable-driven laparoscopic endoscope manipulator," *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)*, Springer LNCS2488, pp. 17-24, 2002.
- [15] 生田幸士, 松田喜勝, 矢島大輔, "多目的チャネルを持つ水圧多自由度能動カテーテルの研究", 第15回日本コンピュータ外科学会合同論文集, pp. 215-216, 2006.
- [16] Ashley, S., "Artificial Muscles," *Scientific American*, pp.52-59, Oct., 2003.
- [17] Kornbluh, R., Bashkin, J., Pelrine, R., Prahlad, H., Chiba, S., "Medical Applications of New Electroactive Polymer Artificial Muscles," *Seikei-Kakou*, vol. 16-10, pp.631 - 637, 2004