

体内深部到達を目的とした単孔式手術ロボット鉗子の

2 自由度関節の開発

電気・化学専攻 医用工学領域 2181260 林 賢吾

(主査：和多田 雅哉 教授 副査：京相 雅樹 教授，島谷 祐一 准教授)

1. 緒言

近年では新たな手術方法が提案され、手術に用いられる医療機器の開発が活発に行われている。腹部外科手術の現場において、従来の手術で行われてきた開腹手術は、切開創が 100 [mm] から 200 [mm] 程度であり、患者への負担が大きい。手術器具や手術技術の進歩により胸腔鏡手術や腹腔鏡手術などの、内視鏡を用いた内視鏡手術が開発された。内視鏡手術は新たな手術方法の 1 つであり、従来の手術と比べ低侵襲な手術として、普及してきている。図 1 に開腹手術のイメージ，図 2 に単孔式腹腔鏡手術のイメージ，図 3 に単孔式切開創のイメージを示す。複数の切開創で行う腹腔鏡手術を多孔式腹腔鏡手術，単一の切開創で行う腹腔鏡手術を単孔式腹腔鏡手術と呼ぶ。多孔式腹腔鏡手術は，腹壁に 10 [mm] 程度の創を数か所開け，内視鏡と鉗子を挿入し行う。長所として，術後の創が小さいことから，早期の社会復帰が可能であり，整容性に長けていることが挙げられる。しかし，短所として，小さな創から内視鏡などの手術器具を扱わなければならないため，鉗子の作業領域が狭く，操作に制限があり，術者に負担がかかることが挙げられる。単孔式腹腔鏡手術は，腹壁に 20 [mm] 程度の創を 1 か所開け，内視鏡と鉗子を挿入し行う。長所として，臍部のみでの切開のため，術後の創が目立ちにくく，複数孔の手術と比べさらに整容性に長けていることが挙げられる。しかし，短所として，切開創が 1 か所であることから手術の難易度が高くなり，手術時間が 2 倍程度に増加することが挙げられる。さらに，対象疾患は虫垂切除術や胆のう摘出術，大腸がん等に限定されることも挙げられる。従って，本研究では，単孔式腹腔鏡手術における術者の負担を軽減することを目的とした手術ロボットの開発を行う。本稿では，単孔式手術ロボットの概要を述べ，開発する 2 自由度関節について述べる。

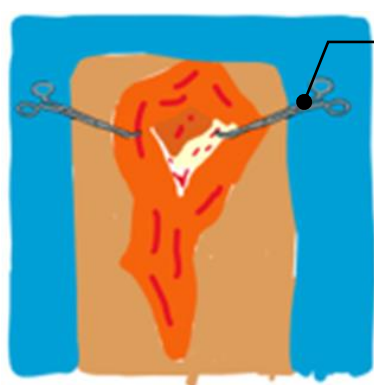


図 1 開腹手術のイメージ

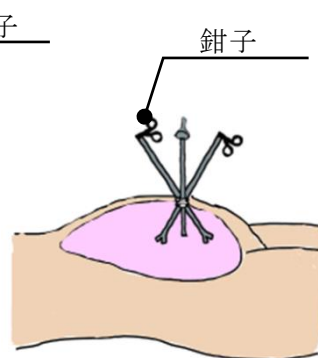


図 2 単孔式腹腔鏡手術のイメージ

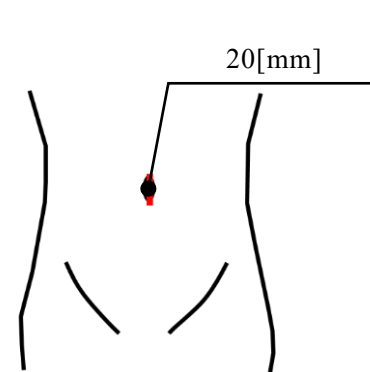


図 3 単孔式切開創のイメージ

2. 単孔式手術ロボット

1章に述べたように、腹腔鏡手術は患者に対して従来の開腹手術と比べ低侵襲であるという利点があるが、術者には鉗子の作業領域が狭いなど、欠点が存在する。術者の補助を行い、手術の難易度を下げる目的として、多孔式腹腔鏡手術を対象とした手術支援ロボットが開発され、臨床の現場で利用されている。単孔式腹腔鏡手術は単一の創により手術を行うため、多孔式腹腔鏡手術と比べ、さらに手術の難易度が高いことが言われている。そのため、作業領域の確保や、高い精度を必要とする。そこで、単孔式腹腔鏡手術を対象とした手術ロボットの研究・開発が行われている。

3. 研究目的

単孔式腹腔鏡手術は整容性に長け、先進的な手術である。しかし、作業領域の狭さにより、手術時間が通常の1.5~2倍かかり、医師の負担が大きいという欠点が存在する。また、単一の創から複数の鉗子を挿入するため、鉗子同士の干渉が問題となる。したがって、作業領域を確保し鉗子同士の干渉を避けることを目的としたロボットの関節機構の開発を行う。図4に対象物に対しての回り込み動作を示す。腹腔鏡手術では、鉗子は関節を持たない1本の棒の形状をしており、正面に臓器等の遮蔽があり目標物に到達するためや臓器の裏側を手術するため、図4に示すような対象物に対して鉗子が回り込むような動作が必要であるといわれている。また、鉗子の回り込み動作は、作業領域内に対象臓器以外の臓器が存在し、臓器の持ち上げが行えない場合等に有効であると考えられる。ロボットに回り込み動作を搭載することで手術時間の短縮や手術の難易度を下げる効果、手術の対象疾患の幅を増やすことを目標とする。本研究は、多自由度鉗子を搭載した単孔式手術ロボットの第1関節の開発を目標とする。

4. 提案する単孔式手術ロボット

図5に提案する単孔式手術ロボットのイメージを示す。図5のように、開発する単孔式手術ロボットは、体内にロボットを挿入したのち、シャフトが腹壁に位置する。1つのシャフトに3本の鉗子と内視鏡を搭載する。3本の鉗子を搭載する根拠は、胆のう切除術に対する肝臓の把持、持ち上げに1本、バイポーラ等切除器具に1本、疾患部の把持に1本要するためである。

1本のアームには関節を3つ持たせ、各関節に自由度を設け、合計5自由度以上を目指し、ピッチ・ヨー・ロール・インサージョン・鉗子先端部の開閉を行う。第3関節はアームの開状態を維持する働きを担い、0または90[deg]固定とし、能動的には動かない。

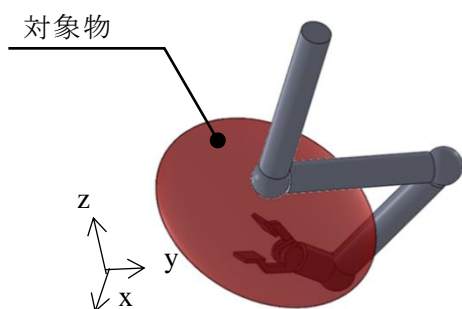


図4 対象物に対しての回り込み動作

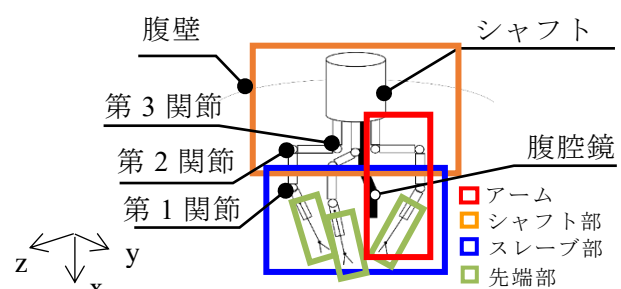


図5 提案する単孔式手術ロボットのイメージ

4.1 気腹時の腹腔の高さ

図 5 に示した単孔式手術ロボットを腹腔内に挿入する際、気腹時の臓器から腹壁までの高さにロボット全体を位置させるのは不可能であると考えた。そこで、腹腔の高さを推測しロボットをどのように挿入するか検討する。腹腔の高さは患者の体格や体質による個人差がある。そこで、腹腔の高さの最悪値を求める。図 6 に作業領域のイメージ、図 7 に男性の腹部を示す^[1]。図 7 に示す男性は、身長 1910[mm]体重 75[kg]である。腹腔は横隔膜より下部の腹壁で囲まれた空間であり、息を吐いた状態で肋骨の下から 5 番から 6 番の間である。したがって図 7 のように男性の腹部を測定した。腹腔鏡手術は一般的に 10 [mmHg]の気圧で行われる。腹腔鏡下胆嚢摘出術 20 例、年齢 35～80（平均 59）歳、男性 7 例、女性 13 例を対象に、10 [mmHg]での二酸化炭素容量は $(2.45 \pm 0.46) \times 10^6$ [mm³]である^[2]。腹腔を 300 [mm]と 200 [mm]の四角形と仮定し、二酸化炭素容量から気腹の高さを求める。

$$\frac{\text{二酸化炭素容量}}{\text{腹腔面積}} = \frac{1990000}{300 \times 200} = 33 \text{ [mm]}$$

よって、気腹時の腹腔内の高さは最悪値で 33 [mm]と推測する。

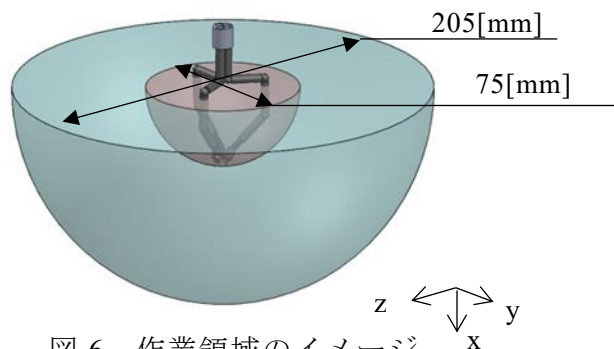


図 6 作業領域のイメージ



性別：男性
身長：1910 [mm]
体重：75 [kg]

図 7 男性の腹部

4.2 寸法及び関節自由度

対象物に対して回り込み動作の実現や目標作業領域を満たす構造、寸法とするため、ロボット鉗子 1 本のモデルの作成を行った。図 8 にロボット鉗子のモデルを示す。また、表 1 に寸法を示す。対象物に対して鉗子先端部が回り込むような動作を実現するため、図 8 に示すロボット鉗子の動作を提案する。第 1 関節に、ピッチ軸、ヨー軸の自由度を設ける。また、第 2 関節はロボット中心方向への屈曲 1 自由度を設ける。第 3 関節は 90 [deg]で固定とする。鉗子先端から第 1 関節の長さ L1 は 4 章 3 節で求めた気腹時の腹腔の高さから決定した。また、図 6 に示す作業領域と関節動作から表 1 の寸法を決定した。

4.2 数値目標

単孔式手術ロボットの開発にあたり、必要となる数値目標を表 2、表 3 に示す。表 2、表 3 は先行研究を参考とし、決定を行った^{[3][4][5][6][7]}。単孔式手術において、対象疾患に胆のう切除が含まれる。胆のうは肝臓の裏側に位置するため、肝臓の把持・持ち上げ、バイポーラ等切除器具、疾患部の把持の最低 3 本の鉗子が必要であると考えられる。また、臨床の現場で使用されている腹部外科手術用ロボットはアームが 3 本備わって

いる。本研究の目標である単孔式腹腔鏡手術の対象疾患の幅を増やすため鉗子は 3 本必要であると考え。創の大きさは臍部に合わせ、20 [mm]とする。したがって、ロボットの体内に挿入する部分は 20 [mm]以下とする。体内において作業領域を確保するため、最大屈曲角度を 90[deg]とする。肝臓を把持し持ち上げ、裏側の手術をする際、肝臓の 1/3 を持ち上げる必要がある。肝臓は一般的に 1.2[kg]であるため、屈曲発生力は 4[N]とする。また、直径 1[mm]の血管を把持するためには、分解能は 0.1[mm]

表 1 寸法

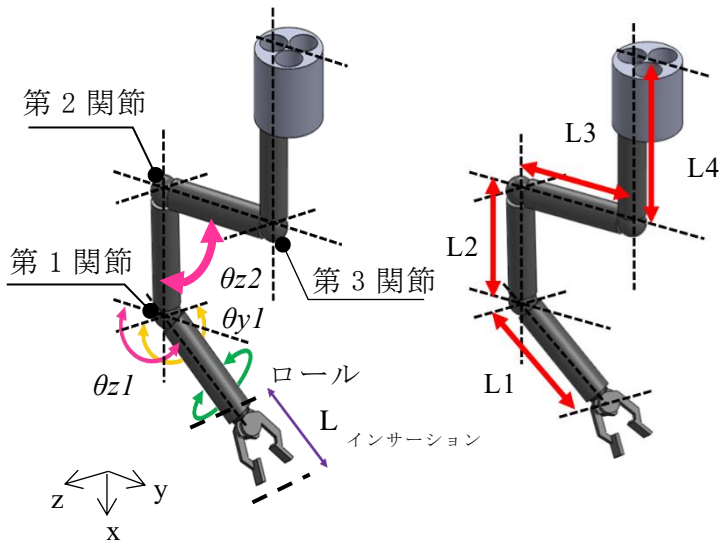


図 8 ロボット鉗子のモデル

名称	パラメータ		単位
鉗子先端から 第 1 関節	L1	33	[mm]
第 1 関節から 第 2 関節	L2	80	
第 2 関節から 第 3 関節	L3	40	
第 3 関節から シャフト部	L4		
インサージョ ン軸	L インサ ーショ ン	0 ~ 50	
第 1 関節	θ_{y1}	± 90	[deg]
	θ_{z1}	± 90	
第 2 関節	θ_{z2}	± 60	
第 3 関節	90		
ロール軸	± 180		
把持部開閉	0 ~ 60		

表 2 目標性能値

項目	目標値
1 鉗子の太さ	8[mm]
鉗子の本数	3
創の大きさ	20[mm]
鉗子の自由度	5 以上
最大屈曲角度	90[deg]
屈曲発生力	4[N]
把持部開閉角度	60[deg]
分解能	0.01[mm]
位置決め精度	0.01[mm]
把持力	4 ~ 5[N]

表 3 目標動作範囲・速度

能動軸	動作範囲	最高速度
ピッチ	± 90 [deg]	90[deg/s]
ヨー	± 90 [deg]	90[deg/s]
ロール	± 180 [deg]	90[deg/s]
開閉	0 ~ 60[deg]	90[deg/s]
インサージョン	0 ~ 50[mm]	100[mm/s]

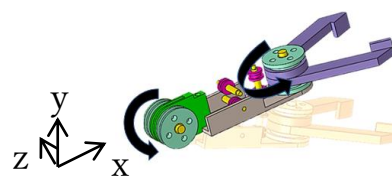


図 9 本研究室の鉗子自由度

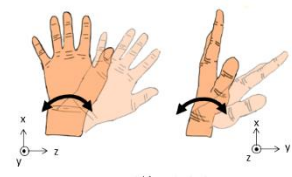


図 10 手首の自由度

以上必要となる。従って、さらに1つ下のオーダーである、0.01[mm]を目標とする。位置決め精度においては、マニピュレータを助手として用いる際には0.5[mm]以下、執刀医の役割を担うには0.1[mm]以下が必要であり、分解能と同じように、さらに1つ下のオーダーである0.01[mm]を目標とする。また、動作範囲と最高速度は、円滑な手術を行うため、表3の値を目標とする。

5. 2 自由度関節の機能試験機

本研究のロボットにおける第1関節は2自由度鉗子である。そこで、先行研究を調査し、関節構造の検討を行った。図9に先行研究の鉗子、図10に手首の自由度を示す。先行研究の鉗子先端の関節は、プーリを2か所に用いた2構造2自由度である。それに対し、ヒトの手首は1構造2自由度である。先行研究においては手首を模擬し、動作範囲を決定しているが、構造自体が異なるため、可能な動作が異なる。そこで、手首と同じような1構造2自由度の動きが可能な関節を作りたいと考えた。1構造2自由度を実現することで、鉗子先端を直感的に動かすことが可能になると考える。

5.1 ボールジョイント磁石を用いた関節構造

1構造で2自由度の動作が可能な機構をボールジョイント磁石の構造を参考に構想した。ボールジョイント磁石とはジョイント本体の中の磁石とヨークの組み合わせにより磁力のみでボール部分を支えている構造を指す。この構造は利点として、動作において機械的な拘束が少なく、要求動作を満たすことが考えられるが、欠点として機械的拘束が少ないため、機構として安定しないことが考えられる。シャフト側のアーム部分にヨークを用いてネオジウム磁石を用いて配置する。アーム部分は磁性のないSUS304を使用する。また、関節のボール部分については磁性のあるSUS430を使用する。磁石の磁力を利用し、関節が外れないように構造維持を行う。手術ロボットの動作はワイヤ駆動が広く普及している。その為、動作に拮抗構造のワイヤ駆動を用いる。ボール軸には線対称に4か所の穴をあけ、中空の球とする。ワイヤはボール軸の穴を通り、球内部の頂点にて固定する。ワイヤの牽引と送る動作にて関節の屈曲/伸展動作を行う。実機では4本のワイヤを4つのモータで制御する。

5.2 機能試験機による動作検証

アクリル樹脂製の簡易機能試験機を製作し提案する関節構造の動作検証を行った。スケールは10倍であり、ボール部/ソケット部/受け軸はアクリル、ワイヤはタコ糸を用いた。関節動作はタコ糸を手で引っ張ることで制御を行った。提案する機構で関節の要求動作が可能か、以下の3つの動作において検証を行った。

- ①関節を伸ばした状態からワイヤ配置方向の屈曲動作
- ②ワイヤ間の方向への屈曲
- ③屈曲角度を保ったままの方向転換

図11には検証動作①～③を示す。

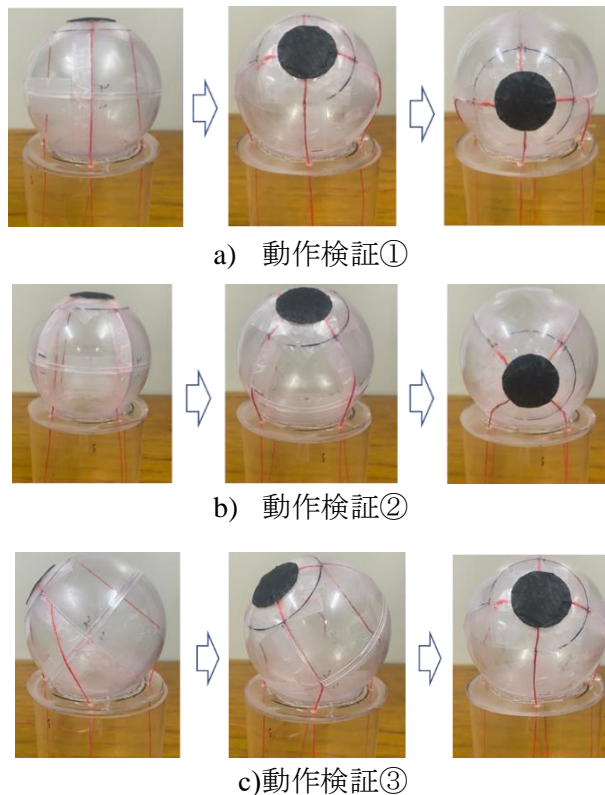


図 11 機能試験機の検証動作

図 15 に示す動作検証の結果、①～③の動作において動作可能であった。動作において不安定な動きがあったが、加工面の粗さやバリが関係していると考え、実機への影響は低いと考える。よって提案する機構での関節動作は可能であることが示唆された。

6. 構造維持に必要な吸引力と磁力解析

6.1 必要な吸引力

構想するボールジョイント磁石を用いた関節構造が関節の働きを担うことが可能か力学モデルを組み、必要な吸引力を算出する。現在までに静止状態における機構維持についての検証を行った。図 13 に力学モデルを示す。図 13 に示すモデルは、関節に対し最も負荷の掛る状態である。この状態において構造維持が可能であれば静止状態において構造維持が可能である。したがって図 13 の状態の検証を行った。

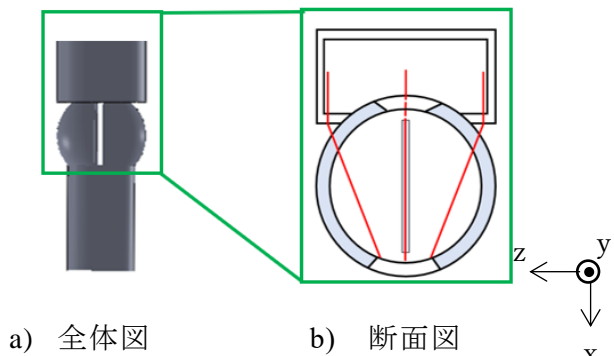


図 12 ワイヤの配置

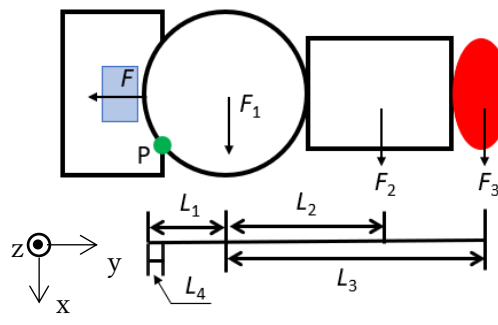


図 13 力学モデル

図 13 に示すモデルは、質点での集中荷重にてモデルを組み、点 P の周りのモーメントのつり合いを考えた。以下に力学モデルの運動方程式を示す。

$$F_1 = M_1g \quad (1) \quad F_2 = M_2g \quad (2) \quad F_3 = M_3g \quad (3)$$

$$F\sqrt{2L_1L_4-L_4^2} = F_1(L_1-L_4) + F_2(L_1-L_4+L_2) + F_3(L_1-L_4+L_3) \quad (4)$$

g : 重力加速度 M_1 : 第 1 関節の質量 M_2 : 先端部の質量 M_3 : 把持対象物の質量
 F : 磁石による磁力

上記の式より、力学モデルにおいて質量と構造の長さが分かれば関節構造保持が可能か考察可能と考えた。そこで、質量/長さを仮定し構造維持に必要な磁力の考察を行った。長さに関して、 L_1 を 4[mm]、 L_2 を 17[mm]、 L_3 を 30[mm]、 L_4 を 1[mm]と仮定した。また、重さに関して、第 1 関節(ボール部分)は直径 8[mm]、厚さ 1[mm]の中空の球と仮定した。先端部分に関しての設計は本研究の対象外となるため、先端部分を直径 8[mm]長さ 26[mm]の円柱と仮定した。密度と体積から質量を導き、磁石による磁力 F [N]を求め、結果として構造維持に関しては 49.7[N]以上必要であることが分かった。

6.2 磁力解析

磁石を用いた関節の設計するにあたり、まず簡易的なモデルを作成する。モデル作成後等価磁気回路を作成する。等価磁気回路の磁路からエアギャップの磁束密度を算出し、吸引力を求める。尚、磁路の設定には漏れ磁束を考慮していない。また、ボール部においての磁束は最短経路を通るものとする。

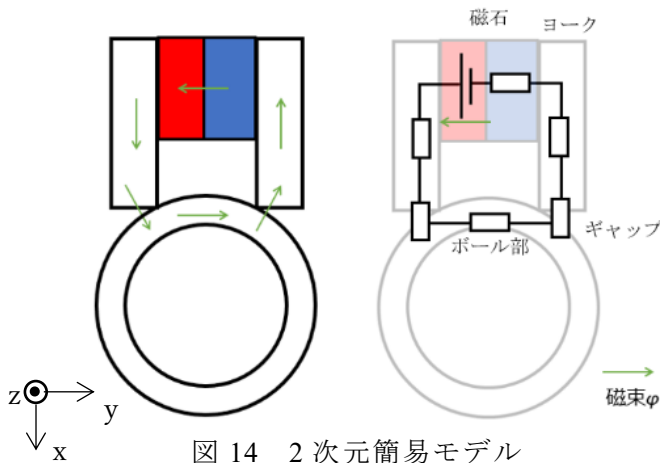


図 14 2次元簡易モデル

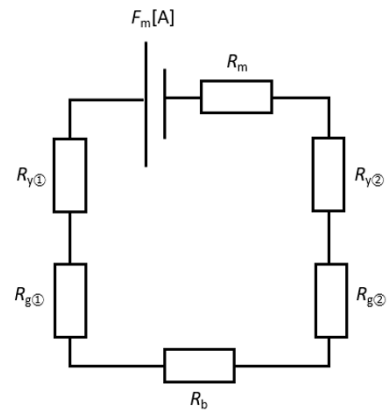


図 15 等価磁気回路

$$F_m = H_d \cdot L_m \quad (5) \quad R_m = L_m / \mu_0 \mu_{rec} S_m \quad (6) \quad R_{y①} = R_{y②} = L_y / \mu_0 \mu_y S_y \quad (7)$$

$$R_{g①} = R_{g②} = L_g / \mu_0 \mu_r S_g \quad (8) \quad R_b = L_b / \mu_0 \mu_b S_b \quad (9)$$

F_m : 永久磁石の起磁力[A], R_m : 永久磁石の磁気抵抗[H⁻¹], $R_{y①}$: ヨーク①の磁気抵抗[H⁻¹]
 $R_{y②}$: ヨーク②の磁気抵抗[H⁻¹], $R_{g①}$: ギャップ①の磁気抵抗[H⁻¹], $R_{g②}$: ギャップ②の磁気抵抗[H⁻¹]
 R_b : ボール部の磁気抵抗[H⁻¹], H_d : 永久磁石の動作点の磁界強度[A/m], L_m : 永久磁石の磁化方向の長さ[m]

μ_0 : 真空の透磁率 $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m], μ_{rec} : ネオジウム磁石のリコイル透磁率 1.05, L_y : ヨーク中の平均磁路長[m]
 S_m : 永久磁石磁化方向の断面積[m²], S_y : ヨークの断面積[m²], μ_y : ヨーク (SUS430) の比透磁率 500
 L_g : エアギャップ中の平均磁路長[m], μ_r : 空気の比透磁率 1, S_g : エアギャップの断面積[m²],
 L_b : ボール部分の平均磁路長[m], μ_b : ボール部 (SUS430) の比透磁率 500, S_b : ボール部の磁路の断面積[m²]

$$\varphi = \frac{F_m}{R_m + R_{y①} + R_{y②} + R_{g①} + R_{g②} + R_b} \quad (10) \quad F_\alpha = \frac{\varphi^2}{S_g} \times \frac{1}{\mu_0} \quad (11)$$

φ : 磁束[Wb] F_α : 吸引力[N]

$$F_\alpha \cos 45^\circ = 76.1 \text{ [N]} \quad (12)$$

ギャップは 2 つあり, ヨーク断面から 45[deg]方向に磁束が通ると仮定し計算を行った。解析の結果, 設定したパラメータにおいて必要な吸引力を満たすことを確認した。

7. 結言

本稿では提案する単孔式手術ロボットのコンセプトや数値目標, 関節の構造について述べ, 機能試験機および力学モデルと磁力解析から検証を行った。機能試験機による動作検証では, 関節構造として動作可能であることが示唆された。また, 力学モデルから必要な吸引力を算出した。磁力解析により, 設定したパラメータから必要な吸引力を満たすことを確認した。

今後の展望として, 必要な吸引力を満たすことを確認したが, 詳細設計は未着手である。そのため, ボール部の溝やヨークとボール部の接触箇所などの詳細設計に着手する。また, 摩擦とワイヤの配置を考慮した力学モデルから, ワイヤの張力の計算及び実機の製作に着手する。

参考文献

- [1] Oleg Dolghi : "Miniature in vivo robot for laparoendoscopic single-site surgery", Surg Endosc 25, pp.3453-3458
- [2] 漆原貴 : "気腹法単独と吊り上げ法併用における気腹圧と腹腔内ガス容量の検討", 日臨外会誌 64 (12), 2975-2979, 2003, pp.23-25
- [3] 新松戸中央総合病院, <https://www.shinmatsudo-hospital.jp/dept/geka/tankoushiki-fukukuukyoushujutsu/>, 2022.7.15
- [4] 東京医科大学病院, <https://hospinfo.tokyo-med.ac.jp/davinci/top/index.html>, 2022.7.15
- [5] 松本俊宣 : "単孔式腹腔鏡下手術支援フレキシブル脊椎型鉗子マニピュレータの開発", No. 14-2 Proceedings of the 2014 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Toyama, Japan, May 25-29, 2014, pp.3A1-A03(1)-3A1-A03(4)
- [6] 光石衛 : "人体を内側から扱うロボットの設計", 日本ロボット学会誌 Vol.26No.3, pp.242~246, 2008, pp.27
- [7] 石井千春 : "DOUBLE-SCREW-DRIVE 機構を用いた低侵襲手術用多自由度ロボット鉗子", 日本機械学会論文集, (c 編) 76 巻 771 号 (20
- [8] 栗城潤也 : "手術支援システムにおけるマスタ・スレーブ一体型ロボット鉗子の先端部駆動の開発"平成 29 年度修士論文, pp.16