

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	屈曲に弾性体を用いた空気圧駆動多自由度鉗子マニピュレータ
Title(English)	Pneumatically driven multi-degree-of-freedom forceps manipulator using an elastic body to bend
著者(和文)	滝川恭平, 菅野貴皓, 遠藤玄, 川嶋健嗣
Authors(English)	Kyouhei Takikawa, Takahiro Kanno, Gen Endo, Kenji Kawashima
出典(和文)	ロボティクス・メカトロニクス講演会2015講演論文集, , , 1A1-E05
Citation(English)	Proceedings of the 2015 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, , , 1A1-E05
発行日 / Pub. date	2015, 5

屈曲に弾性体を用いた空気圧駆動多自由度鉗子マニピュレータ

Pneumatically driven multi-degree-of-freedom forceps manipulator using an elastic body to bend

○滝川 恭平 (医科歯科大) 菅野 貴皓 (医科歯科大)
遠藤 玄 (医科歯科大) 川嶋 健嗣 (医科歯科大)

Kyouhei TAKIKAWA, Tokyo Medical and Dental University, kyo.student@gmail.com
Takahiro KANNO, Tokyo Medical and Dental University
Gen ENDO, Tokyo Medical and Dental University
Kenji KAWASHIMA, Tokyo Medical and Dental University

In this study we developed a pneumatically-driven manipulator of the master-slave-type surgical robot. The manipulator has dual flexible joints and be capable of grasping and bending the tip in two degrees of freedom by two pneumatic cylinders. Considering the interoperability in real surgery, we proposed a mechanism so that the clean forceps part can be easily attached to and detached from the filthy drive unit. To verify the tracking performance, we actually conducted an experiment of the master-slave-system with the proposed manipulator.

Key Words: Robot, Manipulation, Endoscopic surgery, Pneumatic actuator, Wire drive

1. はじめに

最近開腹手術の代わりに本来傷つける必要のない正常な組織への侵襲を最低限に留め、治療対象となる部位への治療を行う腹腔鏡手術と呼ばれる低侵襲手術が増加している。この手術は患者の肉体的負担の軽減や入院期間の短縮、術後の傷跡が小さく美容的観点において優れているといったメリットがあるが、手術は極端に視野が狭いため治療部位の状況判断が困難、鉗子などの手術器具が低自由度であることから操作性が悪い、手術器具の先端作業部と操作部が離れているため力覚が伝わりにくいといった問題も存在する。この様な問題により腹腔鏡手術は、従来の開腹手術に比べ思うように手術を行う事が難しく、手術者に技術的な負担をかけている。

そこで、医師の技術的負担を軽減することを目的として、多自由度の鉗子先端を持つロボットの研究が盛んに行われている[1][2]。製品化された da Vinci[3]は、遠隔操縦型の手術支援ロボット有名である。しかし、操作者は視覚情報のみを頼っており、スレーブ側の接触力が操作者には伝わらない。この課題に対して、著者らは空気圧駆動のバックドライバビリティを活用し、接触力を推定可能な鉗子マニピュレータの開発を行っている[4]。しかし、拮抗駆動を用いることから2自由度の実現に4本の空気圧シリンダが必要である。また、不潔部である駆動部と清潔部の鉗子がワイヤで結合されていることから、着脱に手間を要する。

これらの課題を解決することを目的として、本研究ではマスター・スレーブによる直観的な動作を実現するためのスレーブ側マニピュレータとして、空気圧シリンダ2本で鉗子部先端の屈曲2自由度動作を行い、把持が可能かつ着脱が容易な手術用の鉗子マニピュレータを提案試作した。

2. 空気圧駆動鉗子マニピュレータ

2.1 設計指針

柔軟関節を有した先端屈曲2自由度、把持可能な空気圧駆動マニピュレータを試作した。

試作する空気圧駆動鉗子マニピュレータの先端直径は現在一般に使用されている5[mm]を目標とした。細径化を行うには、従来の剛体リンク機構では部品点数が多く関節が大きくなるため細径化が難しい。そこで、本研究では柔軟関節を使用することにより構造をシンプルにし、部品点数を減らすことで細径化し、目標とする先端直径5[mm]を実現する。

鉗子マニピュレータにおいて運用上清潔部と不潔部の切り離しの容易さが求められる。清潔な鉗子部と不潔な駆動部に分け、この2つを容易に着脱可能にすることでこの問題の解決を考えた。鉗子部については、従来は4本の駆動ワイヤをそれぞれ独立に空気圧シリンダで駆動していた[4]のに対し、本研究では、4本のワイヤを弾性体で束ねることで最低2本のシリンダでの駆動を可能とする。駆動部については、鉗子の屈曲2自由度と先端の把持1自由度の合計3自由度とし、鉗子の並進およびロール軸方向の4自由度についてはFig.1に示す従来のホルダロボット[5]によって行う。

先端の柔軟関節の目標可動範囲は市販の鉗子を参考にしてピッチ方向、ヨー方向に $\pm 60[\text{deg}]$ とした。



Fig.1 Holder



Fig.1 Manipulator using dual elastic body

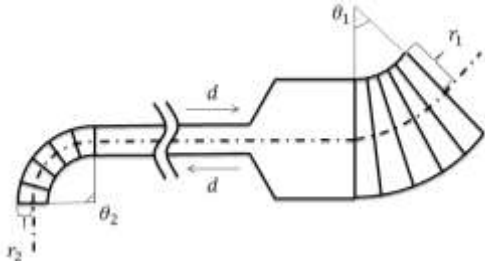


Fig.2 Displacement magnification mechanism

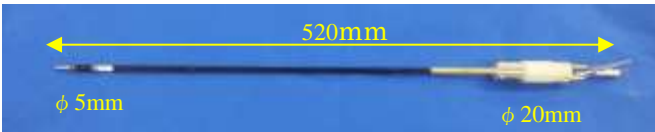


Fig.3 Forceps unit

2.2 柔軟関節を使用した鉗子部

Fig. 1 に示すように、マニピュレータの伝達部は、剛体ステンレスの中空パイプの両端に柔軟関節を固定し、両者を動力伝達用の4本のワイヤで締結した構造を用いた。Fig. 2 に示すように、マニピュレータ伝達部の後端の柔軟関節を曲げることにより、両端の柔軟関節に締結されたワイヤが引っ張られることで先端柔軟関節が先端2自由度屈曲する仕組みになっている。

使用した動力伝達用のワイヤには、柔軟性が高く屈曲の際の抵抗が小さい材質 SUS304、ワイヤ径 0.54[mm]のステンレスワイヤを使用した。ワイヤの端末処理については、先端をはんだ付けで処理し、後端は中空の黄銅パイプを万力により加圧接合することで処理した。後端を処理する際ワイヤに適切なプリテンションを均等に掛ける必要があり、困難を伴う作業となる。そこで、本論文ではスプリングピンを後端柔軟関節とワイヤの間に挟むことでテンションの調節を行った。Fig. 2 に示すように後端と先端の弾性体のワイヤの配置直径を r_1 、 r_2 とし、後端と先端の屈曲角度を θ_1 、 θ_2 とすると以下の式が成り立つ。

$$\frac{\theta_2}{\theta_1} = \frac{r_1}{r_2} = k_m \quad (1)$$

したがって k_m の値を適切に選択することで変位拡大を行い、駆動部の可動範囲が小さくても先端を十分に屈曲させることが可能である。本研究では目標とする先端屈曲角度は $\pm 60[\text{deg}]$ であり、後述する駆動部の可動範囲は $-20[\text{deg}] \leq \theta_1 \leq 20[\text{deg}]$ であることから、 $k_m \geq 3$ とすれば目標とする屈曲角度を満たすことができる。試作した鉗子部では、後端のワイヤ配置直径を $r_1 = 15.6[\text{mm}]$ 後端のワイヤ配置直径を $r_2 = 4.0[\text{mm}]$ にすることで $k_m = 3.9$ とした。把持機構については把持用ワイヤに駆動部と締結するための金属部品を締結し、駆動部と締結する事で把持用の小型シリンダの押し引きにより、鉗子先端部のリンク溝が掘られた2枚刃が開閉する事で把持をする仕組みになっている。試作した鉗子部の寸法は全長 520[mm]、後端直径 20[mm]、先端直径 5[mm]、重量 50[g]となっている。Fig. 3 に試作した鉗子部を示す。

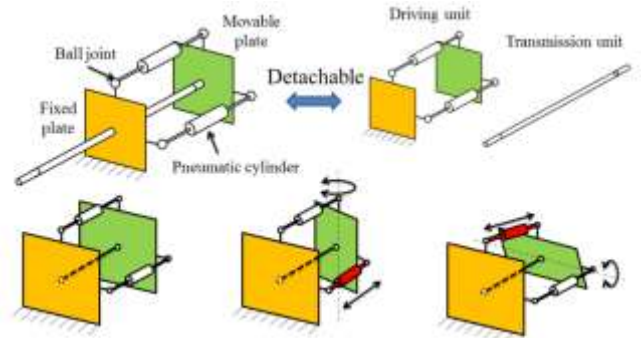


Fig.4 Mechanism of the drive unit

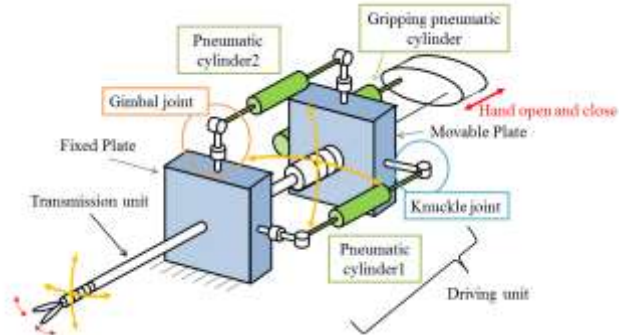


Fig.5 Overview of the proposed manipulator

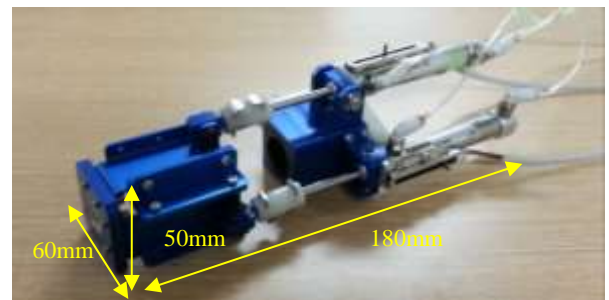


Fig.6 Proposed driving unit

2.3 空気圧シリンダ 2 本を用いた駆動部

従来の研究[4]では、2自由度の屈曲を実現するために、4本の空気圧シリンダを用いて4本のワイヤを直接駆動していた。本研究ではFig. 4 に示すように鉗子部のシャフトに駆動部固定板、後端柔軟関節に駆動部屈曲板を締結し、駆動部の固定板と屈曲板を2本の空気圧シリンダで繋ぎ、その伸縮により屈曲板がヨー・ピッチを行う。これにより後端の柔軟関節が屈曲し、先端の柔軟関節が屈曲2自由度を行う。

しかし、単純にボールジョイントでシリンダを接続すると、屈曲時に屈曲板が軸を中心として意図せずロールしてしまう問題が生じる。

2つの直動アクチュエータを用いた屈曲機構としては瓦礫内探索を目的として開発された連結クローラ-走行車の蒼龍1号機[6]の連結部が挙げられる。蒼龍は本研究の鉗子と同様に屈曲部のロール運動が生じるという課題があり、ロール運動を拘束するリンク機構を追加する事で対処しているが、このリンクの導入により部品点数が増加している。本研究では、Fig. 5 のようにジンバルジョイント3つ、ナックルジョイント1つを組み合わせたリンク機構により、屈曲板がシャフトを中心としてローリングしないように拘束した。

次に、空気圧シリンダの選定について述べる。ジンバルジョイントが最大傾斜角度 20[deg]になった際のシリンダの変位を計算したところ、ストロークは 18[mm]必要なことが分かった。本研究では内径 10[mm]、ストローク 30[mm]の低速駆動対応シリンダ (SMC 社製 : CJ2XM10-30Z) を選定した。空気圧シリンダの変位はストローク 32[mm]のリニアタイプのポテンシオメータ (アルプス電気 RDC10-320RB) で検出し、空気圧シリンダの両室の圧力は圧力センサ (SMC 社製 : PSE-510) を用いて検出している。駆動部の寸法は奥行 180[mm]、横幅 60[mm]、高さ 50[mm]、重量 250[g]となっている。試作した駆動部を Fig. 6 に示す。

Fig. 7 に示すように屈曲板が傾いていない時の空気圧シリンダのロッドの長さを l_0 、屈曲板が傾いた時の空気圧シリンダ 1 の変位 d_1 、空気圧シリンダ 2 の変位を d_2 、リンク機構の寸法を y_0 、 z_0 とした時、屈曲板の傾き角度 α 、 β と空気圧シリンダの変位 d_1 、 d_2 との間には平面幾何学から以下のような関係式が成り立つ。

$$d_1 = \sqrt{2y_0^2 - 2y_0^2 \cos \alpha + l_0^2} + 2l_0 \cos \frac{\alpha}{2} \sqrt{2y_0^2 - 2y_0^2 \cos \alpha} + \text{sgn}(\alpha)l_0 \quad (2)$$

$$d_2 = \sqrt{l_0^2 + 2\text{sgn}(\beta)l_0z_0 \cos \alpha \sin \beta + 2z_0^2(1 - \cos \beta)} - l_0 \quad (3)$$

ここで $\text{sgn}(\ast)$ は符号関数である。

以上の関係式より屈曲板の角度 α 、 β を代入することで、各空気圧シリンダに要求されるストロークが分かる。また、式(2)において α を空気圧シリンダの変位との関係式をプロットしてグラフにした結果を Fig. 8 に、式(3)において α 、 β と空気圧シリンダ変位との関係をプロットした結果を Fig. 9 に示す。これらの結果より、空気圧シリンダの変位によってほぼ線形に角度が変化することから、変位によって制御性が大きく異なることがないことが分かる。試作した鉗子マニピュレータを Fig. 10 に示す。

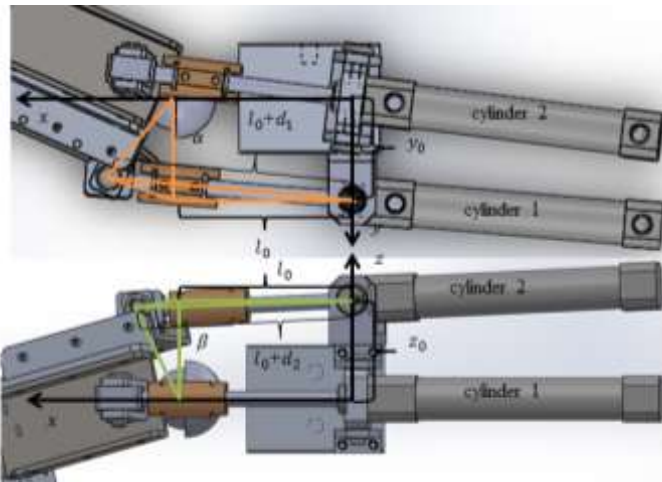


Fig.7 Relationship between the angle of the position

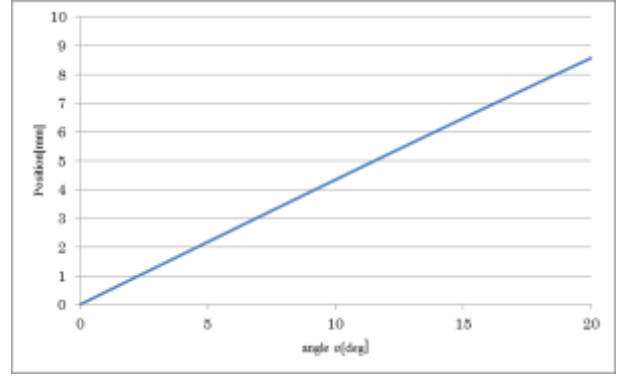


Fig.8 Relationship between the joint angle and cylinder1

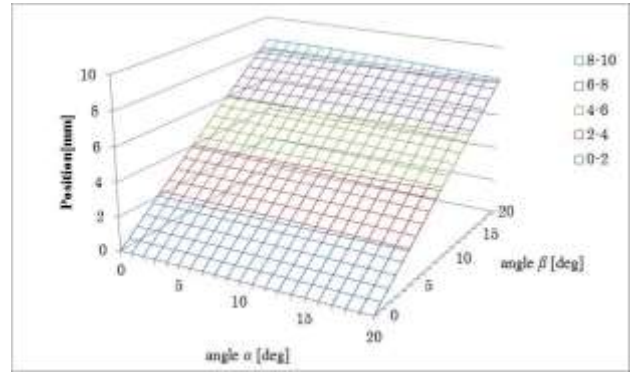


Fig. 9 Relationship between the joint angle and cylinder2



Fig. 10 Transmission unit

3. マスター・スレーブの制御実験

3.1 システム構成

試作した鉗子マニピュレータをスレーブ、市販のハプティック位置入力デバイスにマスターとしてマスター・スレーブシステムを構築した。システム全体の構成を Fig. 9 に示す。操作者がマスターを操作すると、その位置指令値が、スレーブ側の制御コンピュータに送信される。スレーブにおいて、このマスターからの指令値に対して位置制御を行う。制御コンピュータにはポテンシオメータと圧力センサの信号を読み取る AD コンバータおよび、サーボバルブに制御信号を出すための DA コンバータが搭載されている。

スレーブ側のマニピュレータの関節位置制御は Fig. 10 に示すように、位置制御ループの内側に力制御ループを内包するカスケード制御とした。位置の PD 制御はシリンダの目標となる変位 X_{ref} にポテンシオメータで計測した実際の変位 X をフィードバックし、PD 制御によって駆動力目標値 F_{ref} に変換する。なお、Fig. 10 において K_{pp} は位置制御の比例ゲイン、 K_{pa} は位置制御の微分ゲイン、 q は関節の屈曲角度を表す。目標駆動力 F_{ref} は、圧力センサの計測値から計算される実際の駆動力 F との誤差をフィードバック、Fig. 11 に示すような PID 制御によってサーボバルブを操作することで発生させる Fig. 11 において、 K_{ap} は駆動力制御の比例ゲイン、 K_{ai} は駆動力制御の積分ゲイン、 u はサーボ弁指令電圧、 P は圧力、 A はシリンダ内受圧面積を表す。

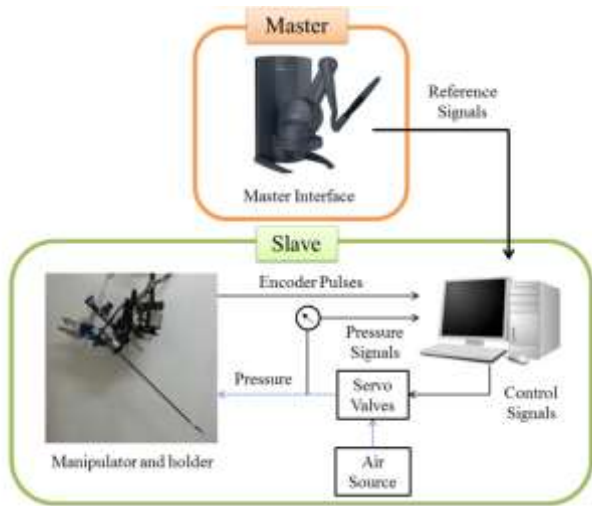


Fig.11 Overview of control system

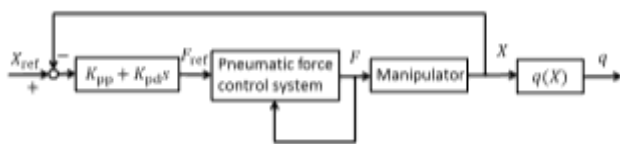


Fig.12 Block diagram of the joint control system

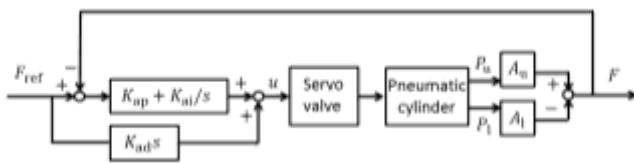


Fig.13 Block diagram of the pneumatic force control system

3.2 実験結果

本システムの追従性を検証するため、マスター・スレーブでシステムを操作する実験を行った。マスターには PHANTOM Desktop (Sensable 社)を用いた。制御系の各々のゲインについては試行錯誤によって Table 1 の通りに設定した。

本実験ではマスターの操作スティックを掴み、手首を時計回りに回した際の動きを指令値として与えている。この際の鉗子マニピュレータの動きから、鉗子先端が上下、左右、斜めのいずれの方向にもスムーズに追従すること、空気圧シリンダ 1 と空気圧シリンダ 2 の 2 本を同時に駆動し、先端を斜めに屈曲させる複合的な動作についても問題なく動くことを確認した。

Fig. 11 に空気圧シリンダ 1 の変位を示し、Fig. 12 に空気圧シリンダ 2 の変位を示す。Fig. 11、Fig. 12 から空気圧シリンダの速度が低下すると、実測値に段差が発生していることを確認した。この主要な原因としては、屈曲板の質量が重い場合、低速用の空気圧シリンダを使用しているにも拘らず、空気圧シリンダのロッドがシリンダ内でスティックスリップを起こしてしまっていることが原因だと考える。

機械的な問題による誤差の原因としては、駆動部のジンバルジョイントと空気圧シリンダのロッドを締結する部分のガタが存在することや、鉗子部のワイヤを張る際に均等にテンションを掛けられていないこと、また大きなワイヤ張力が掛かった際に鉗子先端のワイヤの末端処理に使用したハンダが柔軟関節に食い込んでしまう等の動特性の変動が挙げられる。しかし、全体としては良好な追従性を確認した。

Table 1 Gain parameters used in the experiment

K_{pp} [N/mm]	5.0
K_{pd} [N · s/mm]	0.03
K_{ap} [V/N]	0.1
K_{ai} [V/(N · s)]	0.05
K_{ad} [V · s/N]	1.2

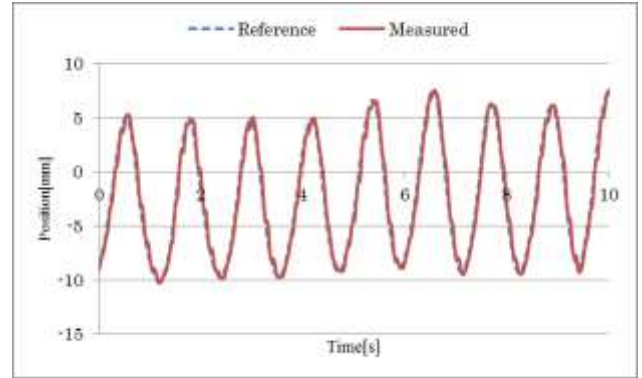


Fig.14 Result of position control of cylinder1

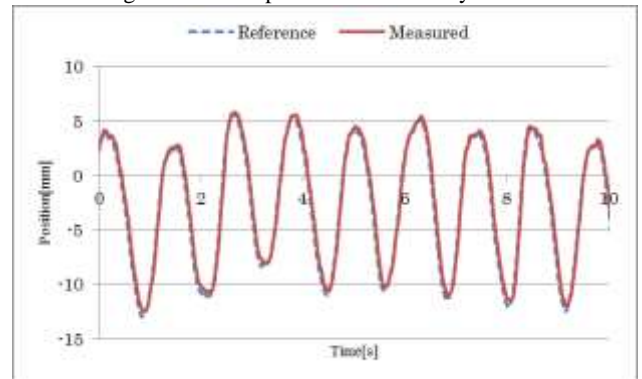


Fig.15 Result of position control of cylinder2

4. おわりに

本研究ではマスター・スレーブ方式の手術支援ロボットにおける、空気圧シリンダ 2 本で鉗子部先端の屈曲 2 自由度動作が可能で、かつ着脱が容易な鉗子マニピュレータの機構を提案し、試作した。また、マスター・スレーブの制御実験を行い、試作した鉗子マニピュレータを実際に動かし、十分な位置追従性があることを確認した。

文献

- [1] 橋爪誠, “手術ロボットの現状と将来”, 日本ロボット学会誌, 22 巻 4 号, pp.423-425, 2004
- [2] Russell H. Taylor and Dan Stioianovici, “Medical Robotics in Computer- : Integrated Surgery”, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol.19, No.5, pp.765-780, 2003
- [3] Intuitive Surgical Inc, <http://www.intuitivesurgical.com/index.aspx>
- [4] 只野耕太郎, 川嶋健嗣, “空気圧サーボを用いた力センシング機能を有する多自由度鉗子システムのバイラテラル制御”, 日本コンピュータ外科学会誌, 7 巻 1 号, pp.25-31, 2005
- [5] Kotaro Tadano, Kenji Kawashima, Kazuyuki Kojima, and Naofumi Tanaka. De- velopment of a pneumatic surgical manipulator ibis iv. Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 22, No. 2, pp. 179–188,2010
- [6] 広瀬茂男, 高山俊男, “瓦礫内推進連結クローラー走行車「蒼龍 I 号機」の開発”, 日本機械学会誌ロボティクス・メカトロニクス講演論文集 98, 1C14-1,1998