内視鏡下手術支援に向けた機構分離型ポータブルデバイスによる
鉗子マニピュレータのローカル操作マスタスレーブ制御小林 広幸^{*1}, 河合 俊和^{*2}, 西澤 祐吏^{*3}, 西川 敦^{*4}, 岩本 憲泰^{*5}, 堀瀬 友貴^{*6}, 正宗 賢^{*6}Locally operated master-slave control system with mechanically separable portable device and
forceps manipulator for endoscopic surgeryHiroyuki KOBAYASHI^{*1}, Toshikazu KAWAI^{*2}, Yuji NISHIZAWA^{*3}, Atsushi NISHIKAWA^{*4},
Noriyasu IWAMOTO^{*5}, Yuki HORISE^{*6} and Ken MASAMUNE^{*6}^{*1} Graduate School of Engineering, Osaka Institute of Technology

1-45 Chayamachi, Kita-ku, Osaka 530-8568, Japan

^{*2} Faculty of Robotics & Design, Osaka Institute of Technology

1-45 Chayamachi, Kita-ku, Osaka 530-8568, Japan

^{*3} Department of Colorectal Surgery, National Cancer Center Hospital East

6-5-1 Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba 277-8577, Japan

^{*4, *5} Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University

3-15-1 Tokida, Ueda-shi, Nagano 386-8567, Japan

^{*6} Institute of Advanced Biomedical Engineering and Science, Tokyo Women's Medical University

8-1 Kawada-cho, Shinjuku-ku, Tokyo 162-8666, Japan

Received: 22 March 2018; Revised: 6 June 2018; Accepted: 29 November 2018

Abstract

A new locally operated unilateral master-slave manipulator for endoscopic surgery performed by a surgeon in a sterilized area was developed. The manipulator system consists of a portable master device and a forceps slave manipulator (revised parallel-linkage mobile LODEM) as the third arm. We propose the mechanically separable portable device which can be set anywhere beside the operating table. The master device consists of a portable mechanical part that can be autoclave sterilized and an encoder sensor part connected to driving wires covered with a coiled steel flexible cable tube. The five-DOFs master devices use a magnetic ball joint and gimbals for the pitch and yaw axes, a linear guide for the insertion axis, a circular dial for the roll axis, and a handle for the grasp axis. The dimensions of the mechanical component are 130 mm × 130 mm × 350 mm, and its mass is 1.0 kg. The operating ranges for these axes are $\pm 70^\circ$, $\pm 70^\circ$, 100 mm, $\pm 180^\circ$, and 40° , respectively. The mechanical backlash is 0.8° to 4.9° for the pitch and yaw axes, and 0.6 mm to 2.6 mm for the insertion axis. The modified mobile LODEM, which is used as the slave manipulator, is unilateral master-slave controlled by the master device. The master-slave manipulator was confirmed for the pitch, the yaw, the insertion, and the roll axes when the velocities are 15 °/s, 15 °/s, 50 mm/s, and 1080 °/s, respectively. Simulated laparoscopic cholecystectomy was performed on a surgically realistic model in a training box by an endoscope specialist. The forceps slave manipulator was driven under the surgeon's master-slave control using the portable master device. The experimental results indicate that 5 mm backlash at the handle of master device is not large for the master-slave manipulator as the assistant. The results of the present study suggest that the proposed system could be used for robotically assisted laparoscopic surgery by a surgeon working near the patient.

Keywords : Surgical robot, Third arm, Master-slave control, Locally operated, Laparoscopic surgery

No.18-00152 [DOI:10.1299/transjsme.18-00152], J-STAGE Advance Publication date : 6 December, 2018

^{*1} 学生員, 大阪工業大学 大学院工学研究科 (〒530-8568 大阪府大阪市北区茶屋町 1-45)^{*2} 正員, 大阪工業大学 ロボティクス&デザイン工学部^{*3} 国立がん研究センター東病院 大腸外科 (〒277-8577 千葉県柏市柏の葉 6-5-1)^{*4} 信州大学 繊維学部 (〒386-8567 長野県上田市常田 3-15-1)^{*5} 正員, 信州大学 繊維学部^{*6} 正員, 東京女子医科大学 先端生命医科学研究所 (〒162-8666 東京都新宿区河田町 8-1)

E-mail of corresponding author: toshikazu.kawai@oit.ac.jp

1. 緒 言

外科手術では、低侵襲であること、拡大視効果による高精度な手技が可能なことから、内視鏡下手術が普及している。本手術では、腹部を対象とする場合、外径 5 mm ~ 10 mm 程度で長軸形状の術具をガイドするトロカーを腹壁に刺入し、このトロカーを介して拡大視野を取得する内視鏡、鉗子やエネルギーデバイスなど専用術具を腹腔内へ挿入し、内視鏡映像を見ながら手技を行う。患者にとっては開腹手術に比べて創痕が小さく整容性に優れる。一方で、執刀医は術具をトロカーの孔に通して手術を行うため、自由度の少ない術具を直感的でないピポット操作で扱い、手の振戦を抑える必要がある。さらに、内視鏡や鉗子を操る助手らと協調する必要があるため、執刀医に高度な技術が要求される。これらの課題を解決すべく、執刀医が非滅菌領域からリモート操作するマスタスレーブ制御の手術支援ロボットが開発された。臨床利用されている da Vinci (Guthart and Salisbury, 2000) は、多自由度の専用術具を備える複数本のマニピュレータを異構造マスタスレーブで制御し、手ブレ補正やモーションスケールと合わせて、前立腺摘出など狭小空間での微細作業が可能となった。その他、臨床で用いられていた ZEUS (Ghodoussi et al., 2002)、臨床利用に近い IBIS (Tadano and Kawashima, 2009) や MIRO (Hagn et al., 2008) がある。

一方、これらの手術支援ロボットは執刀医が患者から離れた場所で操作する遠隔操作型であり、患者の容態変化や患部周辺の状況を的確に把握して手技を進めることに課題がある。そこで、執刀医が患者の傍の滅菌領域からローカル操作する近接操作型の手術支援ロボットである、多自由度術具、振戦防止の手台、内視鏡ロボット、鉗子ロボットを補助的に用いることで、状況を把握しやすく緊急時対応できるロボット支援手術を実現できると考える。これまでに、多自由度術具の Radius (Bermudez et al., 2009)、振戦防止手台の iArmS (Goto et al., 2013)、内視鏡ロボットの Viki (Gumbs et al., 2007) などが開発されている。微細な手術を行なうためには、2 本の鉗子で臓器など組織を把持・牽引して視野を展開し、3 本目のエネルギーデバイスなどで剥離や切離を進める手技が重要である。すなわち、執刀医が一人で手技を進める場合には第 3 の手となる鉗子ロボットが必要となる。しかし、鉗子ロボットは、臓器を把持・牽引するための作用力、執刀医と共存協調して作業空間をつくるための動作範囲および自由度構成、これらを備える小型な機構が難しいことから、これまでに実現されていない。そこで、患者傍で医師と共存協調する鉗子ロボット LODEM (Locally Operated Detachable End-effector Manipulator) の開発を進めている (河合他, 2012) (Kawai et al., 2015) (Kawai et al., 2017)。

執刀医が患者の傍で従来手技を進めながら、近接操作型の手術支援ロボットを簡易にローカル操作できることは重要である。内視鏡ロボットは刺入点まわりの旋回 2 軸と挿入 1 軸の 3 自由度を備えており、操作インターフェースは ON/OFF 制御方式が簡便であることから、ヘッドコントロール、ボイスコントロール、フットペダル、ツールマウントスイッチ (西川, 2004) が実用化されている。鉗子ロボットの Mobile LODEM (Kawai et al., 2015) は、装着する鉗子の回転と開閉の 2 軸と、刺入点まわりの旋回 2 軸と挿入 1 軸の 5 自由度を備えており、これまでに手元スイッチ (小林他, 2016) や足動作パターン (Kawai et al., 2014) の操作デバイスを開発した。一方、近接操作型の手術支援ロボットを直感的にローカル操作することは微細な手術を進める上で重要であり、マスタスレーブ制御を適用した、非滅菌領域の医師が操作する内視鏡ロボット (Sekimoto et al., 2009) や、滅菌領域の医師が滅菌ドレープで覆ったデバイスを操作する脳神経外科手術支援ロボット (Arata et al., 2011) が研究されている。

執刀医が直感的に LODEM をマスタスレーブ制御で操作するとき、マスタデバイス操作中のドレープ破損など滅菌性の維持を考慮すると、オートクレープ滅菌できるデバイスが望ましい。また、患者の手術台周りには様々な手術機器が配置されることから、マスタデバイスは小型かつ執刀医が望む場所に配置できることが必要である。すなわち、滅菌可能な操作機構部と滅菌ドレープで覆うセンサ部を分離して任意に配置できる伝達機構が求められる。機構部と分離配置したモータ部を繋ぐ伝達機構として、ワイヤ・プーリが広く利用されている。ワイヤ経路を直線ガイドする構造では、分離した機構部とセンサ部を繋ぐ経路が自由に変えられず、両者を任意に配置できない。そこで、ワイヤ経路をフレキシブルにガイドできる構造として、ケーブルチューブ内にワイヤを通す蛇管ワイヤの適用を考えた。蛇管ワイヤは経路が自由に変えられる利点を有し、古くからロボットハンドなどに適用されている (菅野他, 1985)。しかし、主に伝達経路の摩擦により発生するたるみや伸びによる経路長変化と張力変化が課題となることから、等価バックラッシュを考慮した力制御などが報告されている (金子, 1991)。さら

には、ワイヤの疲労や磨耗による破断といった課題をも解決すべく、ワイヤに代わりロッドを用いた蛇管ロッドを有するマスタスレーブ制御の手術支援ロボットが開発されている (岸他, 2009)。

蛇管ワイヤをマスタデバイスのフレキシブル経路として適用し、操作機構部の動作をセンサへ伝える本提案方式を適用したユニラテラルマスタスレーブ手術支援マニピュレータであれば、マスタデバイスの操作機構部を執刀医が望む場所に配置でき、また、蛇管ワイヤを使い捨てのディスポーザブルにすることで破断前に交換することができる。しかし、ワイヤ駆動に伴いケーブルチューブとの摩擦、チューブの形状変化、ワイヤ経路の短縮、により発生するバックラッシュが操作感に影響を与えられと考えることから、マスタデバイスとスレーブアームの機構特性およびマスタスレーブ制御特性を把握して、医師による操作性を確認する必要がある。本研究の目的は、滅菌可能な操作機構部とセンサ部を分離してケーブルチューブ挿入ワイヤすなわち蛇管ワイヤで駆動する機構分離型 5 自由度ポータブルデバイスを開発し、スレーブアームとしての Mobile LODEM をマスタスレーブ制御するシステムを構築して、医師の操作実験を通じた評価を行うことである。

これまでに、本システムの要素である機構分離型マスタデバイス (小林他, 2017a) と LODEM のマスタスレーブ制御システム (小林他, 2017b) の概要を示した。本論文ではトータルシステムとして詳細に、機構分離型マスタデバイスのコンセプトを示して設計試作し、本マスタデバイスとスレーブアーム Mobile LODEM の機構学モデルを表して、マスタスレーブ制御システムを構築する。次に、開発したマスタデバイスの可動範囲やバックラッシュ量の機構特性、マスタスレーブ制御システムの演算結果と時間遅れ特性、スレーブアーム Mobile LODEM の位置決め精度、これらを統合するマスタスレーブ手術支援マニピュレータの動作軌跡を計測し、内視鏡外科医による臓器モデルを用いた模擬手術実験を行って、有用性と課題点を明らかにする。

2. 方 法

2・1 コンセプト

滅菌領域の執刀医がローカル操作するマスタスレーブ手術支援マニピュレータのコンセプトを図 1 に示す。内視鏡下手術において執刀医は、利き手に関係なく左手で鉗子を持ち臓器の牽引や圧排を行い、右手で電気メスなどエネルギーデバイスを持ちかえて剥離や切開を行い、手技を進める。本研究で開発するマスタデバイスは、エネルギーデバイスを持ちかえる際に操作できるように、術者の右側に設置する。スレーブアームとしての鉗子ロボット Mobile LODEM は、手術台に直交する四方向のいずれかに設置し、術野の展開時にモータ非励磁状態のマニュアル操作で臓器を把持・牽引した後、モータ励磁状態の制御で臓器の牽引を維持して術野を確保する。執刀医は従来の術具で手術を行いながら、必要に応じてマスタデバイスを操作する。非操作時の誤作動防止のために、従来手技を進める間はマスタデバイスを縮めた状態で姿勢を保持し、操作する際に任意の姿勢へ戻して、フットスイッチを踏んでいるときのみ制御を可能とする。緊急時は電源を切りスレーブアーム Mobile LODEM は状態を保持しつつ、マニュアル操作で術野外へ退避する。

本マスタデバイスの構成要素について、操作機構部は機構部品のみで構成してオートクレーブ滅菌可能とし、エンコーダなどセンサ部は機構部と分離配置して滅菌ドレープで覆う。操作機構部とセンサ部を接続するフレキ

Fig. 1 Concept of master-slave surgery support manipulator controlled by a surgeon in clean area.

シブル伝達経路を構成する蛇管ワイヤとしてのケーブルチューブおよび駆動ワイヤは、滅菌を施した使い捨てのディスポーザブルとする。操作機構部は可動できる設置台の上に固定し、センサ部は手術台にぶら下げ固定する。本マスタデバイスの操作可能軸は、実際の鉗子と同じ自由度配置で Pitch, Yaw, Insertion, Roll, Grasp の 5 軸とする。各軸の必要な可動範囲は、内視鏡下手術において鉗子がよく使われる角度が、手術台上面から鉛直基準に $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ であることから (光石他, 2008), Pitch 軸と Yaw 軸が鉛直上向きを 0° として $\pm 70^{\circ}$ とする。Insertion 軸は、長さ 300 mm の鉗子をトロカーに挿入すること、およびトロカーヘッド上に設けるスペースを考慮して、可動範囲 100 mm とする。また、Roll 軸は $\pm 180^{\circ}$ 、Grasp 軸は従来鉗子を参考に 40° とする。分解能は 0.1 mm とする。

マスタデバイスとスレーブアーム Mobile LODEM は Remote Center of Motion (RCM) を備え、Pitch 軸と Yaw 軸および Insertion 軸が複合する異構造の機構である。マスタデバイスとスレーブアームの鉗子ハンドルの位置を制御することで姿勢を追従する方針とする。また、執刀医は自ら操作する鉗子で臓器を触ることができるので、力覚を還さないユニラテラル異構造マスタスレーブ制御かつ Point to Point (PTP) 制御を構築する。動作速度は、執刀医の手としてスムーズな手術を行うには 100 mm/s 必要とされるが、第 3 の手としての補助的な用途であることから 50 mm/s を目標とする。

2・2 機構分離型マスタデバイス

マスタデバイスの機構設計として、前節に示した各軸の可動範囲を実現する、Insertion 軸、Roll 軸、Grasp 軸を備える上部機構を図 2 (a) に、Pitch 軸と Yaw 軸を備える基部機構を図 2 (b) に示す。また、試作したマスタデバイスの操作機構部を図 3 (a) に、センサ部を図 3 (b) に、試作デバイスを手術台の傍に設置した状況を図 3 (c) に示す。本マスタデバイスは、実際の鉗子と同じ自由度配置でピボット操作機構を実現し、上部に Insertion 軸、Roll 軸、Grasp 軸の機構を設けて自重を補償し、簡易に伸縮できる状態とする。そこで、Pitch 軸と Yaw 軸はピボット点をボールジョイント磁石 (吸着力 150N, KD-625, マグナ) として上部の Insertion 軸が縮んだ状態の機構重量とモーメントを磁力で保持することとし、ジョイントに取り付けたシャフトを両側から挟みこむ円環ガイドを直交配置して、球面駆動により 2 軸を同時入力可能とする。直交 2 軸の先端には外径 20 mm のプーリを取り付ける。床面からピボット点までの距離は 40 mm、ピボット点から長手方向に設置する持ち手までの距離は Grasp 軸が閉じた状態で 310 mm、開いた状態で 350 mm とする。Insertion 軸はリニアガイド (SRS9XM, THK) を用い、機構上下部の回転プーリと直動スライダにワイヤ (外径 0.72 mm, SUS304, エスコ) を取り付けることで、直線運動を回転運動に変換する。下部にあるプーリは、可動範囲の 100 mm を円周一巻のワイヤ長さで実現できるよう外径 32 mm とする。Roll 軸は外径 20 mm のプーリの上面にダイヤルを取り付け、示指で操作できるようにする。

Fig. 2 Master device mechanism; (a) the upper part for insertion, roll, and grasp axes. (b) the base part using a magnetic ball joint and gimbal for pitch and yaw axes.

Fig. 3 The master device prototype consists of a separable mechanical handle part that can be autoclave sterilized and an encoder sensor part connected to driving wires covered with a flexible cable tube. The dimensions of the mechanical part are 130 mm × 130 mm × 350 mm, and its mass is 1.0 kg. The operating ranges for these axes are $\pm 70^\circ$, $\pm 70^\circ$, 100 mm, $\pm 180^\circ$, and 40° , respectively; (a) mechanical handle part, (b) sensor part, (c) the mechanically separable portable device which can be set anywhere beside the operating table.

Grasp 軸は鉗子の形状を模した持ち手の回転軸に外径 20 mm のプーリを取り付ける。操作機構部の全体寸法は Grasp 軸が閉じた状態で 130 mm × 130 mm × 350 mm, 全体の質量は 1.0 kg となった。

操作機構部の各軸のプーリにワイヤを接続し, PTFE チューブ (内径 1.0 mm, 外径 1.5 mm) を組み込んだケーブルチューブ (内径 1.6 mm, 外径 4.2 mm, SIS-SP41 OUTER CASING, SHIMANO) 内にワイヤを通して, センサ部のプーリに接続する。ケーブルチューブの長さは 1500 mm とし, 図 3(c) に示す状態にケーブルチューブを配置して, 挿通するワイヤに十分な張力を掛けて両者を接続する。

試作したセンサ部について, 駆動ワイヤを接続するプーリを, エンコーダにカップリングを介して取り付ける。操作 5 軸のワイヤとプーリは組立時に張力を掛けやすくするため, Pitch 軸, Yaw 軸, Insertion 軸の 3 軸と, Roll 軸, Grasp 軸の 2 軸の接続方向を同方向かつオフセット配置する。センサ部のプーリは, Insertion 軸が可動範囲の 100 mm を円周一巻のワイヤ長さで実現できるよう外径 40 mm, その他の軸は外径 20 mm とする。本操作デバイスの先端で Mobile LODEM を制御するときの分解能は 0.1 mm 必要であるから, Pitch 軸と Yaw 軸の回転角度に換算して 0.016° となる。そこで, 各軸エンコーダのパルス数は Pitch 軸, Yaw 軸, Insertion 軸が 80000 (MES-30-5000PST16, MTL), Roll 軸と Grasp 軸が 3600 (MES-20-3600P, MTL) とする。これにより, ピボット点での分解能は, Pitch 軸と Yaw 軸が 0.0045° , Insertion 軸が 0.0015 mm, Roll 軸が 0.1° , Grasp 軸が 0.1° となる。センサ部の寸法は 160 mm × 90 mm × 200 mm, 質量はエンコーダを含め 1.4 kg となった。

2・3 鉗子ロボット

スレーブアームには 5 自由度を有する Mobile LODEM (雨森他, 2016) を用いる。図 4 に示す Mobile LODEM の可動範囲は, Pitch 軸と Yaw 軸が $\pm 70^\circ$, Insertion 軸が 200 mm, Roll 軸が $\pm 90^\circ$, Grasp 軸は取り付ける市販鉗子と同じくする。Pitch 軸は, モータでクランクアーム全体を直接回転する。クランクアーム上に配置する Yaw 軸は, モータ回転をボールねじで直動に変換するスライダクランク機構とし, さらに腹壁刺入点まわりの空間を確保するよう平行リンク機構を構成する。Insertion 軸は, 外部設置のモータを介して直動スライダをワイヤで駆動する。Roll 軸と Grasp 軸も Insertion 軸と同様, 外部設置のモータを介してワイヤ駆動する。

各軸はステッピングモータで駆動し, Pitch 軸のハーモニックギア付きモータ (基本ステップ角度 0.0144° , 励磁最大静止トルク 3.5 Nm, 回転速度 30 rpm, CSK543BP-H50, Oriental motor), Yaw 軸と Grasp 軸のモータ (基本ステップ角度 0.36° , 250 分割可能, 励磁最大静止トルク 0.24 Nm, 回転速度 300 rpm, CRK544PMBPB, Oriental

Fig. 4 Mobile LODEM prototype. The dimensions are 800 mm × 80 mm × 480 mm, and its mass is 5.8 kg.

motor), Insertion 軸と Roll 軸のモータ (基本ステップ角度 0.72°, 250 分割可能, 励磁最大静止トルク 0.24 Nm, 回転速度 100 rpm, CRK545BPB, Oriental motor) を備える. 全体寸法は 800 mm × 480 mm × 80 mm, 全体の質量は 5.8 kg である.

2・4 機構学モデル

マスタデバイスの機構学モデルを図 5 に示す. ピボット点を原点 O とし, Pitch 軸と Yaw 軸の回転角度を θ_1, θ_2 , Insertion 軸の直線変位を l_m として, 鉗子ハンドルの座標 (x_m, y_m, z_m) は, Pitch 軸と Yaw 軸の単位ベクトル $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ の外積より式 (1) と表す.

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} = \frac{l_m}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2}} \begin{bmatrix} \sin \theta_1 \cos \theta_2 \\ -\cos \theta_1 \sin \theta_2 \\ \cos \theta_1 \cos \theta_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

スレーブアームとしての Mobile LODEM の機構学モデルを図 6 に示す. ピボット点を原点 O とし, Pitch 軸と Yaw 軸の回転角度は鉛直上向きを基準の 0° として各々を α と β , Insertion 軸の直線変位は l_s とする. また, マスタデバイスに対する LODEM の設置角度を γ とする. 全体座標系を Σ_0 として, Σ_0 を γ 回転させた座標系を Σ_1 , Σ_1 を α 回転させた座標系を Σ_2 , Σ_2 を β 回転させた座標系を Σ_3 , Σ_3 を l_s 平行移動させた座標系を Σ_s とする. 鉗子ハンドルの座標 (x_s, y_s, z_s) は, 同次変換行列 ${}^0T_s = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_s$ より式 (2) と表す.

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s \sin \alpha \cos \beta \cos \gamma + l_s \sin \beta \sin \gamma \\ l_s \sin \alpha \cos \beta \sin \gamma - l_s \sin \beta \cos \gamma \\ l_s \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Fig. 5 Coordinates of the master device.

Fig. 6 Coordinates of the mobile LODEM.

2・5 マスタスレーブ制御システム

まず、スレーブアームとしての Mobile LODEM の設置角度 γ を設定する。LODEM は手術台に対して直交する四方向の設置を考えるため、設置角度は 90° の間隔である。初期状態は、マスタデバイスと LODEM のどちらも鉗子ハンドルが鉛直状態かつ直線変位は同じくし、Pitch 軸と Yaw 軸および Insertion 軸のスケールは 1 倍とする。次に、フットスイッチが ON の状態のとき、マスタデバイスからエンコーダ信号を取得し、式 (1) を用いてマスタデバイスの鉗子ハンドル座標 (x_m, y_m, z_m) を算出する。算出したマスタデバイスの座標を式 (2) のスレーブアームの鉗子ハンドル座標 (x_s, y_s, z_s) として逆運動学計算を行い、Mobile LODEM の Pitch 軸と Yaw 軸の回転角度 α と β 、Insertion 軸の直線変位 l_s を得る。このとき、 $\tan^{-1}$ の 2 解の絞り込みは α, β の範囲が $\pm 70^\circ$ であることから、 $\pm 90^\circ$ の範囲とする。また、Roll 軸はマスタスレーブ間で回転角度が一致する制御とする。Grasp 軸は開閉操作のみが必要となるためマスタデバイスの閾値を 30° とする ON/OFF 制御にする。

Mobile LODEM の Yaw 軸は Pitch 軸より速度が遅いため、最大回転速度を Yaw 軸に合わせて $15^\circ/\text{s}$ とする。Insertion 軸に装着した鉗子が腹腔内に 200 mm 挿入されているとき、鉗子先端の接線速度は 52 mm/s となる。その他の 3 軸については、Insertion 軸が 50 mm/s 、Roll 軸が $1080^\circ/\text{s}$ 、Grasp 軸が $360^\circ/\text{s}$ と設定する。マスタデバイス操作時の速度は、これら最大速度以下となるよう注意する。制御システムは、モーションコントロールボード (SMC-4DF-PCI, CONTEC) を備える制御 PC に対して、フットスイッチ (OFL-V-M4, 大阪自動電機) の ON/OFF 信号とマスタデバイスのエンコーダ信号を入力し、演算した結果を LODEM のステッピングモータに駆動信号として出力する構成とする。このユニラテラルマスタスレーブ制御システムに、マスタデバイスおよびスレーブアームとしての Mobile LODEM を接続して統合し、マスタスレーブ手術支援マニピュレータを構成する。

3. 評価実験

3・1 マスタデバイスの機構特性

試作したマスタデバイスの機構特性として Pitch 軸、Yaw 軸、Insertion 軸の可動範囲と、ワイヤ駆動に伴い発生するバックラッシュ量を確認するため、操作機構部の動作軌跡を計測する。バックラッシュ量は、操作機構部を動作させてからセンサ部のプーリが回転を始めるまでの最大値とする。軌跡の計測には、光学式 3 次元位置計測装置 OPTOTRAK (certus, 水平 2 軸の精度 0.1 mm 、奥行 1 軸の精度 0.15 mm 、サンプリング周波数設定 100 Hz 、NDI) を使用する。計測装置に対して、マスタデバイスの Pitch 軸と Yaw 軸は水平面に、Insertion 軸は水平面に対して鉛直方向に固定する。計測時の鉗子ハンドルの初期状態は、3 軸とも動作範囲の最大可動域へ動かした状態とする。最大可動域で駆動方向が変更する箇所を 5 回以上計測し、その最小値と最大値を取得する。両者を繋ぐ蛇管ワイヤは、図 3 (c) の状態に配置し、途中経路は固定しないこととする。

計測結果の一例を図 7 に示す。可動範囲は Pitch 軸が $\pm 70^\circ$ 、Yaw 軸が $\pm 70.5^\circ$ 、Insertion 軸が 100.4 mm であった。バックラッシュ量は、Pitch 軸と Yaw 軸が $0.8^\circ \sim 4.9^\circ$ 、Insertion 軸が $0.6\text{ mm} \sim 2.6\text{ mm}$ であった。試作機の Pitch 軸と Yaw 軸におけるバックラッシュ量は、プーリ外径を考慮してワイヤ駆動量で $0.14\text{ mm} \sim 0.85\text{ mm}$ 、ハンドル操作部の Grasp 軸が開いた状態ではピボット点からの距離が 350 mm となるためマスタデバイス先端で $4.9\text{ mm} \sim 30\text{ mm}$ となった。

3・2 マスタスレーブ制御システムの特性

構築したマスタスレーブ制御システムの特性として、演算結果と時間遅れを確認するため、マスタ信号とスレーブ信号の応答を計測する。マスタデバイスのセンサ部にある Pitch 軸、Yaw 軸、Insertion 軸のエンコーダを人がマニュアルで回転してマスタ信号とし、生成したスレーブアームのモータへ送る駆動信号から Pitch 軸と Yaw 軸の回転角度、Insertion 軸の直線変位を算出する。つぎに、マスタ信号とスレーブ信号の立ち上がり時間の差から、時間遅れを確認する。エンコーダの初期位置を決めるのは難しいことから、マスタ信号パルスとスレーブ信号パルスの立ち上がり時間の差異を対象として、連続 5 パルス分の平均とする。本計測には、データロガー (サンプリング周波数 10 kHz , NIcDAQ-9172, NI) を使用する。

計測結果の一例を図 8 に示す。マスタ信号とスレーブ信号が最終的に一致する応答を得たことから、PTP 制御を確認できた。また、平均の時間遅れは 12 ± 6 ms であった。

3・3 スレーブアーム Mobile LODEM の位置決め精度

スレーブアームとしての Mobile LODEM の位置決め精度を確認するため、マスタ信号で動作するスレーブアームの動作軌跡を計測する。プログラムで生成した Pitch 軸, Yaw 軸, Insertion 軸の最大速度をマスタ信号とし、スレーブアーム Mobile LODEM の操作ハンドル各軸の動作軌跡を計測する。動作軌跡の計測には、3.1 節と同じ光学式 3 次元位置計測装置を使用する。可動範囲は、Pitch 軸と Yaw 軸が $\pm 60^\circ$ 、Insertion 軸が ± 50 mm とし、最大可動域に到達したら速度の符号を反転する。

計測結果の一例を図 9 に示す。最大速度のマスタ信号に追従するスレーブアームの動作軌跡を得た。最大可動域の値は、Pitch 軸が $+62.2^\circ$ と -63.6° 、Yaw 軸が $+60.3^\circ$ と -60.4° 、Insertion 軸が $+51.0$ mm と -48.3 mm となった。位置決め精度は、スレーブアームの初期位置を補正すると、Pitch 軸が 2.9° 、Yaw 軸が 0.4° 、Insertion 軸が 0.4 mm であった。また、時間遅れは、Pitch 軸が 30 ms、Yaw 軸が 10 ms、Insertion 軸が 20 ms であり、3.2 節の結果とほぼ同等であった。

3・4 マスタスレーブ手術支援マニピュレータの動作軌跡

試作したマスタデバイスとスレーブアーム Mobile LODEM、および構築したマスタスレーブ制御システムを統合するマスタスレーブ手術支援マニピュレータの動作を確認するため、その動作軌跡を計測する。マスタデバイスの操作ハンドルの Pitch 軸, Yaw 軸, Insertion 軸を人がマニュアルで操作する動作軌跡と、スレーブアーム Mobile LODEM 各軸の動作軌跡を計測する。動作軌跡の計測には、3.1 節と同じ光学式 3 次元位置計測装置を使用する。

計測結果の一例を図 10 に示す。マニュアル操作のマスタデバイスに追従するスレーブアームの軌跡を得た。最大可動域におけるマスタデバイスとスレーブアームの回転角度の最大差異は、Pitch 軸が 1.1° 、Yaw 軸が 3.4° 、Insertion 軸が 1.3 mm であった。マスタデバイス先端での位置決め精度は、Pitch 軸で 6.7 mm、Yaw 軸で 21 mm となった。

3・5 医師による臓器モデルを用いた実験

医師によるマスタスレーブ手術支援マニピュレータの操作性を確認するため、ドライ環境での腹腔鏡下胆嚢摘出の模擬手術を行う。実験状況を図 11 に示す。手術台 (MOT-1700, MIZUHO) に置いた腹腔鏡手術トレーニングボックス (Endowork-pro II, KARL STOLZ) の中に胆嚢モデル (50128, Limbs & Things) を配置し、内視鏡 (tricam 3D, KARL STOLZ) で映像を得る。配置は足側に執刀医 (腹腔鏡技術認定医) と内視鏡、執刀医から見て左側に Mobile LODEM、右側にマスタデバイスとする。マスタデバイスの操作機構部は設置台に固定し、センサ部はベッドレールに固定する。マスタデバイスの操作機構部とセンサ部を繋ぐ蛇管ワイヤは途中経路を固定せず図 11 の状態に配置し、執刀医が任意の位置に調整して設置する。トレーニングボックスのポートから、内視鏡、執刀医用の術具、Mobile LODEM に装着した鉗子を挿入する。使用術具は外径 5 mm とし、Mobile LODEM に装着する把持鉗子、執刀医の右手に剪刀鉗子、左手に把持鉗子とする。

模擬手術の結果、マスタデバイスで Mobile LODEM を操作することで胆嚢モデルに張力をかけ、術野を確保することができた。執刀医は剪刀鉗子で胆嚢周囲の剥離を進め、本マスタスレーブ手術支援マニピュレータは医師との協調作業が可能であった。執刀医からは、バックラッシュ量は小さくないが、助手としてのロボット操作であれば許容範囲と判断されるとの評価を得た。

Fig. 7 Measured trajectory of the master device. The mechanical backlash is 0.8° to 4.9° for the pitch and yaw axes, and 0.6 mm to 2.6 mm for the insertion axis.

Fig. 8 Calculated trajectory of the master-slave signals.

Fig. 9 Measured trajectory of the slave arm when the master signal is maximum velocity.

Fig. 10 Measured trajectory of the slave arm when the master device is generated by the manually controlled. The unilateral master-slave control was confirmed for the pitch, the yaw, and the insertion axes when the maximum velocities are $15^{\circ}/s$, $15^{\circ}/s$, and $50\text{ mm}/s$ respectively.

Fig. 11 Simulated laparoscopic cholecystectomy performed on a surgically realistic gall bladder model in a training box. The experimental results indicate that the influence of the backlash is not large for the master device used as the assistant.

4. 考 察

執刀医が直感的に鉗子ロボット LODEM をマスタスレーブ制御で操作するため、希望する場所に配置できる小型でオートクレーブ滅菌可能な操作デバイスの実現に向けて、滅菌可能な操作機構部と滅菌ドレープで覆うセンサ部を分離して任意に配置できる伝達機構が求められることから、両者を繋ぐワイヤ経路をフレキシブルに設置できるケーブルチューブすなわち蛇管ワイヤを備えた機構分離型マスタデバイスを開発した。

マスタデバイスの機構特性について、3.1 節の実験結果より、試作した操作機構部の可動範囲は設計値を満たしていることを確認した。バックラッシュ量については、Insertion 軸は組立に伴う機構のエアギャップなどを原因に含むため、蛇管ワイヤのみの特徴を捉えることができる Pitch 軸と Yaw 軸を考察する。ケーブルチューブはワイヤ経路の設置場所を変更できるフレキシブルな構造として途中経路を固定せずに用いる場合、そのバックラッシュ量はワイヤとケーブルチューブの材質や寸法およびワイヤ初期張力などにより変化するが (金子, 1991), 本実験の状況ではワイヤ駆動量で 1 mm 以上, マスタデバイス先端で 5 mm 以上となることが分かった。

マスタデバイスとスレーブアーム Mobile LODEM のマスタスレーブ制御システムについて、同次変換行列などから両者の鉗子ハンドル位置を求め、マスタ信号に基づいてスレーブ信号を生成する、ユニラテラル異構造マスタスレーブ PTP 制御システムが構築できたことを、3.2 節の実験結果から確認した。また、制御システムにおける時間遅れは約 12 ms であった。これは、プログラム内部関数の並列処理で解決できると考える。

スレーブアーム Mobile LODEM の位置決め精度については、3.3 節の実験結果から確認した。これは、駆動方向が反転する際に生じる機構のたわみ、エアギャップやバックラッシュなど機構特性が原因である。

試作したマスタデバイスでスレーブアーム Mobile LODEM を制御するマスタスレーブ手術支援マニピュレータの動作を 3.4 節の実験結果から確認した。3.1 節と 3.3 節で示した機構特性、および 3.2 節で示した制御特性を含んだ計測結果であるが、マスタデバイス先端で 7 mm 以上の位置決め精度となった。

医師が試作マスタデバイスを希望する場所に配置してスレーブアーム Mobile LODEM をマスタスレーブ制御し、臓器モデルをハンドリングできることを、3.5 節の模擬手術より確認した。主にマスタデバイスのバックラッシュによりスレーブアーム Mobile LODEM の動作開始までに遅延時間が生じたが、助手としてのマスタスレーブ手術支援マニピュレータであれば、操作性への影響が小さいことを確認した。したがって、ケーブルチューブによるフレキシブルなワイヤ経路を蛇管ワイヤとしてマスタデバイスに適用できることが明らかになった。しかし、機構のバックラッシュやシステムの信号処理に起因する時間遅れは少ない方が望ましいと考える。

実際の手術での使用に向けて、マスタデバイスの機構について考察する。フレキシブル経路を構成する蛇管ワイヤであるチューブとワイヤの接続を医療スタッフが行うことには、現段階の機構では煩雑となることから、簡易な接続方法を実現する機構が必要と考える。また、センサ部をベッドレールに装着した場合、ケーブルチュー

ブへ重量物が落下すると操作機構部が誤動作を起こす可能性があることから、設置および装着場所は考慮する必要がある。ピボット点を構成するボールジョイント磁石は、操作機構部の組立や評価実験を通じて数時間の使用でボール表面の被膜が剥がれたこと、また、未使用時の Insertion 軸は縮めた状態でよいと考え自重補償の装置は設けていないことについて、一時的に手を離しても状態を保持する新たな構造が必要と考える。今後は、Insertion 軸の状態維持のためのロック機構の追加、Pitch 軸と Yaw 軸のモーメントを補償する手法の検討、ボールジョイント以外のピボット点構成、の改良を進める。

本研究では、PTP 制御に基づくユニラテラル異構造マスタスレーブ制御を構築したが、今後は Continuous Path (CP) 制御の導入、本マスタデバイスと Mobile LODEM や Compact LODEM (Kawai et al., 2017) など複数の鉗子ロボットのミドルウェアを介したマルチ接続、を実施する予定である。

5. 結 言

患者傍で執刀医が従来手技を進めながら、任意の位置に配置できる小型でオートクレーブ滅菌可能なポータブルデバイスを用いて、補助的に近接操作型の手術支援ロボットである鉗子マニピュレータ LODEM をマスタスレーブ制御で直感的にローカル操作することを目指している。

滅菌可能な操作機構部とセンサ部を分離して両者を繋ぐ駆動ワイヤ経路をフレキシブルに設置できるケーブルチューブすなわち蛇管ワイヤを備えた機構分離型マスタデバイスを開発し、ユニラテラル異構造マスタスレーブ制御システムを構築して、Mobile LODEM をスレーブアームとしてマスタスレーブ手術支援マニピュレータを構成し、医師による模擬手術を行った。開発したマスタデバイスは可動範囲と分解能の仕様を満たすこと、マスタスレーブ制御システムは LODEM が仕様の動作速度で追従することを確認した。また、本実験の状況で、マスタデバイスのバックラッシュ量は操作部にて 5 mm 以上、マスタスレーブ手術支援マニピュレータの位置決め精度は 7 mm 以上となること、医師が試作マスタデバイスを希望する場所に配置してスレーブアーム Mobile LODEM をマスタスレーブ制御し臓器モデルをハンドリングできることを確認した。これらのことから、助手としてのマスタスレーブ手術支援マニピュレータを構成するマスタデバイスについて、ケーブルチューブによるフレキシブルなワイヤ経路を蛇管ワイヤとして適用できること、5 mm 以上のバックラッシュ量を許容できることを明らかにした。

謝 辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP15K05917, JP16H01859 の助成を受けた。

文 献

- 雨森弘記, 河合俊和, 西川敦, 西澤祐吏, 中村達雄, ラチェット機構式の作用力リミッタを有する鉗子マニピュレータ, 第 28 回ロボティクス・メカトロニクス講演会 (2016), Paper No. 1A1-01b7.
- Arata, J., Tada, Y., Kozuka, H., Wada, T., Saito, Y., Ikeda, N., Hayashi, Y., Fujii, M., Kajita, Y., Mizuno, M., Wakabayashi, T., Yoshida, J. and Fujimoto, H., Neurosurgical robotic system for brain tumor removal, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, Vol. 6 (2011), pp.375–385.
- Bermudez, J. R. T., Buess, G., Waseda, M., Gacek, I., Garcia, F. B., Manukyan, G. A. and Inaky, N., Laparoscopic intracorporeal colorectal sutured anastomosis using the Radius Surgical System in a phantom model, Journal of Surgical Endoscopy, Vol. 23, No. 7 (2009), pp.1624–1632.
- Ghodoussi, M., Butner, S. E. and Wang, Y., Robotic surgery – the transatlantic case, International Conference on Robotics and Automation (2002), pp.1882–1888.
- Goto, T., Hongo, K., Yako, T., Hara, Y., Okamoto, J., Toyoda, K., Fujie, M. G. and Iseki, H., The concept and feasibility of EXPERT: intelligent armrest using robotics technology, Journal of Neurosurgery, Vol. 72, No. 1 (2013), pp.39–42.
- Gumbs, A. A., Crovari F., Vidal, C., Henri, P. and Gayet, B., Modified robotic lightweight endoscope (ViKY) validation in vivo in a porcine model, Surgical Innovation, Vol. 17, No. 7 (2007), pp.261–264.
- Guthart, G. S. and Salisbury, J. K., The intuitive telesurgery system: overview and application, International Conference on

- Robotics and Automation, Vol. 1 (2000), pp.618–621.
- Hagn, U., Nickl, M., Jörg, S., Passig, G., Bahls, T., Nothhelfer, A., Hacker, F., Le-Tien, L., Albu-Schäffer, A., Konietzschke, R., Grebenstein, M., Warpup, R., Haslinger, R., Frommberger, M. and Hirzinger, G., The DLR MIRO: a versatile lightweight robot for surgical applications, *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 35, No. 4 (2008), pp.324–336.
- 金子真, 蛇管機構とその力制御, *日本ロボット学会誌*, Vol. 9, No. 4 (1991), pp.512–515.
- 岸宏亮, 藤江正克, 橋爪誠, 佐久間一郎, 土肥健純, ロッド駆動型多関節術具とこれを用いた MRI 環境対応小型マスタスレーブマニピュレータ, *日本ロボット学会誌*, Vol. 27, No. 6 (2009), pp.652–660.
- 河合俊和, 橋田淳, 申明奎, 西澤祐吏, 中村達雄, 森田直也, 室谷友哉, 望月修一, 内視鏡下手術支援ローカル操作型着脱式術具マニピュレータ, *日本コンピュータ外科学*, Vol. 14, No. 1 (2012), pp.5–14.
- Kawai, T., Fukunishi, M., Nishizawa, Y., Horise, Y., Nishikawa, A. and Nakamura, T., Hands-free interface for surgical procedures based on foot movement patterns, *International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (2014), pp.345–348.
- Kawai, T., Shin, M., Nishizawa, Y., Horise, Y., Nishikawa, A. and Nakamura, T., Mobile locally operated detachable end-effector manipulator for endoscopic surgery, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, Vol. 10, No. 2 (2015), pp. 161–169.
- Kawai, T., Hayashi, H., Nishizawa, Y., Nishikawa, A., Nakamura, R., Kawahira, H., Ito, M. and Nakamura, T., Compact forceps manipulator with a spherical-coordinate linear and circular telescopic rail mechanism for endoscopic surgery, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, Vol. 12, No. 8 (2017), pp.1345–1353.
- 小林広幸, 河合俊和, 西川敦, 西澤祐吏, 中村達雄, 手指の寸法に応じてスイッチ配置可能なオーダーメイド操作インタフェース, 第 28 回ロボティクス・メカトロニクス講演会 (2016), Paper No. 1A2-01b2.
- 小林広幸, 河合俊和, 西川敦, 堀瀬友貴, 正宗賢, 手術支援ロボットののためのオートクレーブ滅菌可能な機構分離型マスタアーム, 第 29 回ロボティクス・メカトロニクス講演会 (2017a), Paper No. 1P1-K05.
- 小林広幸, 河合俊和, 西川敦, 岩本憲泰, 堀瀬友貴, 正宗賢, ローカル操作型マスタアームと内視鏡術具ロボットを選択結合するミドルウェア ORiN を介したマスタスレーブ制御システムの構築, 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (2017b), Paper No. 2B4-01.
- 光石衛, 杉田直彦, 保中志元, 橋爪誠, 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. 26, No. 3 (2008), pp.242–246.
- 西川敦, 腹腔鏡手術の術者インタフェースについて, *日本コンピュータ外科学会誌*, Vol. 6, No. 2 (2004), pp.69–74.
- Sekimoto, M., Nishikawa, A., Taniguchi, K., Takiguchi, S., Miyazaki, F., Doki, Y. and Mori, M., Development of a compact laparoscope manipulator (P-arm), *Surgical Endoscopy*, Vol. 23, No. 11 (2009), pp.2596–2604.
- 菅野重樹, 田中良治, 大岡俊夫, 加藤一郎, 情報処理作業を目的とした自律型ロボットの 4 肢システムの構成, *日本ロボット学会誌*, Vol. 3, No. 4 (1985), pp.339–353.
- Tadano, K. and Kawashima, K., Development of a pneumatically driven forceps manipulator IBIS IV, *ICROS-SICE International Joint Conference* (2009), pp.3815–3818.

References

- Amemori, H., Kawai, T., Nishikawa, A., Nishizawa, Y. and Nakamura, T., Forceps manipulator with ratchet mechanism for force limiter, *Proceedings of the 28th JSME Conference on Robotics and Mechatronics* (2016), Paper No. 1A1-01b7 (in Japanese).
- Arata, J., Tada, Y., Kozuka, H., Wada, T., Saito, Y., Ikeda, N., Hayashi, Y., Fujii, M., Kajita, Y., Mizuno, M., Wakabayashi, T., Yoshida, J. and Fujimoto, H., Neurosurgical robotic system for brain tumor removal, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, Vol. 6 (2011), pp.375–385.
- Bermudez, J. R. T., Buess, G., Waseda, M., Gacek, I., Garcia, F. B., Manukyan, G. A. and Inaky, N., Laparoscopic intracorporal colorectal sutured anastomosis using the Radius Surgical System in a phantom model, *Journal of Surgical Endoscopy*, Vol. 23, No. 7 (2009), pp.1624–1632.
- Ghodoussi, M., Butner, S. E. and Wang, Y., Robotic surgery – the transatlantic case, *International Conference on Robotics and Automation* (2002), pp.1882–1888.
- Goto, T., Hongo, K., Yako, T., Hara, Y., Okamoto, J., Toyoda, K., Fujie, M. G. and Iseki, H., The concept and feasibility of EXPERT: intelligent armrest using robotics technology, *Journal of Neurosurgery*, Vol. 72, No. 1 (2013), pp.39–42.
- Gumbs, A. A., Crovari F., Vidal, C., Henri, P. and Gayet, B., Modified robotic lightweight endoscope (ViKY) validation in

- vivo in a porcine model, *Surgical Innovation*, Vol. 17, No. 7 (2007), pp.261–264.
- Guthart, G. S. and Salisbury, J. K., The Intuitive telesurgery system: overview and application, *International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1 (2000), pp.618–621.
- Hagn, U., Nickl, M., Jörg, S., Passig, G., Bahls, T., Nothhelfer, A., Hacker, F., Le-Tien, L., Albu-Schäffer, A., Konietzschke, R., Grebenstein, M., Warup, R., Haslinger, R., Frommberger, M. and Hirzinger, G., The DLR MIRO: a versatile lightweight robot for surgical applications, *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 35, No. 4 (2008), pp. 324–336.
- Kaneko, M., Tendon-sheath transmission system and force control issues, *Journal of Robotics Society of Japan*, Vol. 9, No. 4 (1991), pp.512–515 (in Japanese).
- Kishi, K., Fujie, M. G., Hashizume, M., Sakuma, I. and Dohi, T., MR-compatible surgical support manipulator system with rod-driven instruments, *Journal of Robotics Society of Japan*, Vol. 27, No. 64 (2009), pp.652–660 (in Japanese).
- Kawai, T., Hashida, J., Shin, M., Nishizawa, Y., Nakamura, T., Morita, N., Murotani, T. and Mochizuki, S., Locally operated detachable end-effector manipulator for endoscopic surgery, *Journal of Japan Society of Computer Aided Surgery*, Vol. 14, No. 1 (2012), pp. 5–14 (in Japanese).
- Kawai, T., Fukunishi, M., Nishizawa, Y., Horise, Y., Nishikawa, A. and Nakamura, T., Hands-free interface for surgical procedures based on foot movement patterns, *International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (2014), pp.345–348.
- Kawai, T., Shin, M., Nishizawa, Y., Horise, Y., Nishikawa, A. and Nakamura, T., Mobile locally operated detachable end-effector manipulator for endoscopic surgery, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, Vol. 10, No. 2 (2015), pp. 161–169.
- Kawai, T., Hayashi, H., Nishizawa, Y., Nishikawa, A., Nakamura, R., Kawahira, H., Ito, M. and Nakamura, T., Compact forceps manipulator with a spherical-coordinate linear and circular telescopic rail mechanism for endoscopic surgery, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, Vol. 12, No. 8 (2017), pp.1345–1353.
- Kobayashi, H., Kawai, T., Nishikawa, A., Nishizawa, Y. and Nakamura, T., Made-to-order handy interface with adjustable switch position for finger length, *Proceedings of the 28th JSME Conference on Robotics and Mechatronics* (2016), Paper No. 1A2-01b2 (in Japanese).
- Kobayashi, H., Kawai, T., Nishikawa, A., Horise, Y. and Masamune, K., Mechanically separable master arm possible to be autoclave sterilized for surgical support robot, *Proceedings of the 29th JSME Conference on Robotics and Mechatronics* (2017a), Paper No. 1P1-K05 (in Japanese).
- Kobayashi, H., Kawai, T., Nishikawa, A., Iwamoto, N., Horise, Y. and Masamune, K., Construction of master-slave control system using middleware ORiN for connection with locally operated master-slave laparoscopic tool robot, *Proceedings of the 18th SICE Conference on System Integration* (2017b), Paper No. 2B4-01.
- Mitsuishi, M., Sugita, N., Yasunaka, S. and Hashizume, M., Design of a surgical robot for use inside the human body, *Journal of Robotics Society of Japan*, Vol. 26, No. 3 (2008), pp.242–246 (in Japanese).
- Nishikawa, A., The surgeon-robot interface for controlling the position of a laparoscope, *Journal of Japan Society of Computer Aided Surgery*, Vol. 6, No. 2 (2004), pp.69–74 (in Japanese).
- Sekimoto, M., Nishikawa, A., Taniguchi, K., Takiguchi, S., Miyazaki, F., Doki, Y. and Mori, M., Development of a compact laparoscope manipulator (P-arm), *Surgical Endoscopy*, Vol. 23, No. 11 (2009), pp.2596–2604.
- Sugano, S., Tanaka, Y., Ohoka, T. and Kato, I., Autonomic limb control of the information processing robot, *Journal of Robotics Society of Japan*, Vol. 3, No. 4 (1985), pp.339–353 (in Japanese).
- Tadano, K. and Kawashima, K., Development of a pneumatically driven forceps manipulator IBIS IV, *ICROS-SICE International Joint Conference* (2009), pp.3815–3818.