パラレルリンク機構を用いた 5 自由度 HEM² の開発 *

松 永 卓 也** 兪 浩 洋*** 大 西 公 平†

Development of Five DoF HEM² Using Parallel Link Mechanism

Takuya MATSUNAGA, Koyo YU and Kouhei OHNISHI

In this paper, Haptic End-effector for Medicine and Manufacturing (HEM²) with five degree of freedom (DoF) motion is developed for safer and more intuitive robotic surgery. In recent years, multi DoF forceps robots have been studied and developed to support surgeons. However, conventional multi DoF forceps robots cannot transmit force sensation to surgeons adequately. Force sensation is important for safe and accurate teleoperation. In this paper, a master-slave five DoF HEM² is developed as a haptic forceps robot. Five DoF motion corresponds with the motion of human hand which can realize complex tasks. By implementing acceleration based bilateral control, force sensation can be transmitted. Spherical joint driven by parallel link mechanism realizes the bending motion of the end-effector. The coaxial driving power transmission mechanism is used to decrease the weight of movable part and improve backdrivability. Besides, the mechanism is composed of rigid parts. The performance of the five DoF HEM² is validated by experiments.

Key words: robotic surgery, multi degree of freedom, haptic forceps robot, bilateral control, parallel link mechanism

1. 序 論

近年、外科手術において医師を支援する手術支援システムの研究、開発が進められている¹⁾²⁾。手術支援システムを構成する多自由度鉗子ロボットは、マスタロボット（マスタ）とスレーブロボット（スレーブ）で構成されるマスタ・スレーブシステムを応用した遠隔操作ロボットである。鉗子は臓器や血管の把持、移動、縫合等に用いられる手術器具であり、多自由度鉗子ロボットのスレーブは、鉗子と同様の形状のグリップを有する先端部をアクチュエータで駆動する。医師はマスタを用いてスレーブを遠隔操作し、患者に対して治療をおこなう。また、遠隔操作ロボットを用いることで、作業における手ぶれ除去や、遠隔手術による病院間の移動時間短縮等の支援が可能となる。しかし、遠隔操作において操作者に対する視覚、聴覚情報の伝達は容易であるが、高精度な力覚情報の伝達は難易度が高く、従来の多自由度鉗子ロボットは高精度な位置制御に重点が置かれている。力覚情報伝達が不十分な状況における治療では、過度な把持力や意図しない接触等によって、患者の臓器や血管の損傷、縫合糸の破断等を招く可能性が増大する³⁾⁴⁾。

マスタ・スレーブシステムを用いた遠隔操作において、力覚情報伝達を実現する一手法がバイラテラル制御である。これまでに、マスタとスレーブの間で伝達される力覚情報の精度向上を目的としてバイラテラル制御の研究がおこなわれてきた。Hannaford は、マスタおよびスレーブの位置と力の関係性をハイブリッド行列で表現し、バイラテラル制御系の理想条件を定式化した⁵⁾。Lawrence は、バイラテラル制御系の理想条件に透明性の概念を導入した⁶⁾。飯田らは、透明性を操作性と再現

性の 2 つの指標で表現し、加速度制御に基づいたバイラテラル制御による高精度な力覚情報伝達を実現した⁷⁾。しかし、加速度制御に基づくバイラテラル制御を実装した遠隔操作ロボットの力覚情報伝達性能は、実際には力覚情報を取得するマスタおよびスレーブの機構に依存する。患者の体外に配置したアクチュエータから動力伝達機構を介して先端部に駆動力を伝達する多自由度鉗子ロボットでは、アクチュエータの駆動力を高精度にエンドエフェクタまで伝達し、かつ物体への接触時に発生する反力の情報を正確に取得する必要がある。スレーブ先端部にセンサを配置することで力覚情報の取得が可能であるが⁸⁾⁹⁾、一自由度のみの力覚情報を対象としている。各自由度の力覚情報を得るためには、アクチュエータと同様に動力伝達機構を介し、センサを患者の体外に配置する必要がある。

多自由度鉗子ロボットの動力伝達方法として、多くの機構が提案されている。従来の多自由度鉗子ロボットでは動力伝達にワイヤを用いるが^{10)~12)}、ワイヤは剛性が小さく、伸縮性等によって力覚情報の精度が低下する。ワイヤに代わる動力伝達方法として、空気圧駆動や水圧駆動の多自由度鉗子ロボットが開発された¹³⁾¹⁴⁾。しかし、空気が有する圧縮性は位置および力の両方の高精度な制御において障害となり、水圧アクチュエータはシリンダにおける水漏れや摩擦を考慮した設計や、複雑なキャリブレーションが必要である。一方、高剛性の動力伝達部品で構成されるパラレルリンク機構を応用した多自由度鉗子ロボットの研究が進められている。4 本のロッドで構成したパラレルリンク機構による屈曲機構が開発されたが¹⁵⁾、2 自由度の屈曲に対して各ロッドを駆動するためアクチュエータ数が増加する。送りネジと自在継手をリンクとして応用した屈曲機構が提案されたが¹⁶⁾、送りネジを用いた動力伝達機構はバックドライバビリティが低く、力覚情報の取得が難しい。板ばねで構成された屈曲機構も提案されたが¹⁷⁾、ばねの弾性が力覚情報に影響する。バイラテラル制御による力覚情報伝達を目的として、4 自由度の動作を有する鉗子ロボットが開発されたが¹⁸⁾、刺入等の作業に必要なロール動作を含まず、動作に制限が生じる。

* 原稿受付 平成 29 年 2 月 22 日

掲載決定 平成 29 年 5 月 1 日

** 学生会員 慶應義塾大学大学院（神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1）

*** 慶應義塾大学大学院（現、（株）キーエンス；大阪市東淀川区東中島 1-3-14）

† 正 会 員 慶應義塾大学（神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1）

Table1 Description of parameters

Parameter	Description
M_n	Nominal mass
J_n	Nominal inertia
K_{tn}	Nominal thrust constant
K_p	Position gain
K_v	Velocity gain
K_f	Force gain
g^{dis}	Cut-off frequency of disturbance observer
g^{rfob}	Cut-off frequency of reaction force observer
g^{pse}	Cut-off frequency of pseudo differential

Table2 Description of superscription and subscription

Superscription and subscription	Description
M	Master
S	Slave
G	Grasping motion
L	Z-direction translation
R	Roll motion
P	Pitch motion
Y	Yaw motion
joint	Joint space
motor	Motor space
cmd	Command
res	Response
ref	Reference

本論文では、加速度制御に基づくバイラテラル制御により力覚情報伝達を可能とする 5 自由度 HEM² (Haptic End-effector for Medicine and Manufacturing) を開発する。HEM² は医療分野および産業分野において人間が遠隔操作でおこなう作業を支援するマスタ・スレーブシステムであり、スレーブにおいて人間の動作を再現するための自由度および構造を有する。5 自由度 HEM² は複雑な作業を実現可能な人間の手、手首、腕の動作に対応した把持動作、直動動作、ロール動作、ピッチ動作、ヨー動作をおこなう。人間の手首と同様に一点を中心とした回転運動をおこなうために、先端部に球体関節を配置し、高剛性の部品で構成したパラレルリンク機構で駆動する。また、ロボットの多自由度化における慣性の増加は力覚情報伝達性能が低下する原因となるが、並列駆動機構¹⁹⁾により低減が可能である。したがって、同軸駆動力伝達機構を構成して並列駆動をおこなう。これにより、バックドライバビリティが高く、高剛性の部品で構成した動力伝達機構を有する 5 自由度の HEM² において、加速度制御に基づくバイラテラル制御による力覚情報伝達を実現する。5 自由度 HEM² の性能は、力センサを用いた力情報の推定精度の検証と、バイラテラル制御による力覚情報伝達の実験により評価する。

本論文の構成は下記の通りである。第 2 章において、5 自由度 HEM² の機構について説明する。そして、第 3 章で運動学について、第 4 章で力制御およびバイラテラル制御について、第 5 章で実験について述べる。最後に、第 6 章で、本論文の結論を述べる。本論文で用いる変数および添字の説明を表 1、表 2 に示す。

(a) Master

(b) Slave

Fig.1 Five DoF HEM²

Table3 Range of motion

Motion	Range of motion
Grasping	open/close
Translation	about 50 mm
Roll	about $\pm \pi$ rad
Pitch	about $\pm \pi/6$ rad
Yaw	about $\pm \pi/6$ rad

2. 5 自由度 HEM²

マスタ・スレーブシステムを用いた遠隔操作において、位置情報と力情報で構成される力覚情報の高精度な伝達をおこなうためには、マスタおよびスレーブが周辺環境から高精度に力覚情報を取得する必要がある。多自由度鉗子ロボットは体内に挿入される先端部にアクチュエータやセンサを配置することが困難であり、体外の駆動部から動力伝達機構を介してエンドエフェクタに駆動力を伝達するため、力覚情報取得の精度はロボットの機構に依存する。低剛性な動力伝達部品はアクチュエータからの駆動力や周辺環境からの反力が加わることで変形し、実際の値より小さな剛性値が操作者に伝達される。そして、固定部と可動部の間に生じる摩擦は、自由動作では物体からの反力に起因しない操作力となる。物体の剛性を鮮明に伝達するためには、高いバックドライバビリティが必要である。また、アクチュエータの小型化やバックドライバビリティの向上のために、ロボットの可動部の質量を低減する必要がある。

図 1 に示す 5 自由度 HEM² は高剛性の動力伝達部品で構成されたマスタ・スレーブ型の多自由度ハプティック鉗子ロボットである。把持動作、直動動作、ロール動作、ピッチ動作、ヨー動作で構成される 5 自由度の動作は、複雑な作業を実現可能な人間の手、手首、腕の動作に対応する。より直感的な操作のために、先端部にパラレルリンク機構を配置し、ロール回転軸上の一点を中心としてピッチ回転、ヨー回転をおこなうことで人間の手首を模擬する。そして、同軸駆動力伝達機構を用いた並列駆動によってロール動作を含む 5 自由度の動作をおこない、

Fig.2 Design of tip mechanism

Fig.3 Design of coaxial driving power transmission mechanism

可動部の質量を低減する。力情報は反力オブザーバ (RFOB : Reaction Force Observer) を用いて推定する。反力オブザーバを用いることで、ロボットの設計において力センサの配置による機構の複雑化を避け、また、コストの削減が可能となる。設計における各動作の可動域を表 3 に示す。5 自由度 HEM² のマスタ、スレーブは、先端部と駆動部で構成される。

2.1 先端部

パラレルリンク機構を含む先端部を図 2 に示す。先端部はシャフト 1 によって駆動部に接続されており、シャフト 1 の軸方向への移動、シャフト 1 の軸中心の回転がエンドエフェクタの直動動作、ロール動作となる。エンドエフェクタが把持動作、ピッチ動作、ヨー動作をおこなうための駆動力は、シャフト 1 内のロッド 1, 2, 3 が伝達する。先端部ではロール動作の回転軸上に配置された球体関節を中心として、エンドエフェクタがピッチ動作、ヨー動作をおこなう。これらの回転動作に用いる駆動力は、パラレルリンク機構により伝達する。ロッド 2 はリンク 1 を介して直動関節 1 に動力を伝達し、さらにリンク 2 を駆動する。ロッド 3 はロッド 2 と同様に、リンク 3, 直動関節 2, リンク 4 に駆動力を伝達する。リンク 2 とリンク 4 から伝達される駆動力により、エンドエフェクタはピッチ動作、ヨー動作をおこなう。把持動作をおこなうための駆動力は、ロッド 1 から球体関節内部の屈曲可能なスラストワイヤを介してエンドエフェクタに伝達する。一方向のみに動力を伝達する従来の駆動用ワイヤと異なり、スラストワイヤはロッドと同様に押し引き双方向の動力を伝達可能である²⁰⁾。エンドエフェクタの形状はマスタ、スレーブで異なり、マスタは直動動作をおこなうハンドルであるが、スレーブは 2 組のスライダクランク機構により回転動作をおこなうグリップである。

2.2 駆動部

駆動部はアクチュエータが発生した力を先端部に供給し、また、周辺環境から加えられた外力をアクチュエータに伝達する。ロール動作のみに回転モータ (Maxon, RE-40) を使用し、その他の動作にはリニアモータ (GHC, S160Q) を使用する。リニアモータと減速器が無い回転モータは高いバックドライバビリティを有する。また、回転モータには光学式回転エンコーダ (Canon, R-ISL), リニアモータには光学式リニアエンコーダ (Renishaw, RGH24Y) を取り付け、位置および角度情報を得る。

直動動作を除く 4 自由度の動作には、図 3 に示す同軸駆動力伝達機構を用いる。同心円状に配置したパイプ 1, パイプ 2, パイプ 3 はそれぞれシャフト 1, ロッド 2, ロッド 3 と連結する。ノーバックラッシュギアはパイプ 1 に固定されており、ロール動作の回転駆動力を伝達する。シャフト 1 およびパイプ 1 はベアリングを介して同軸駆動力伝達機構の固定部と接続する。また、並進運動をおこなう保持部 1, 2 はベアリングを介してパイプ 2, 3 と連結する。ロッド 1 はベアリングを介して把持動作に用いるリニアモータに接続する。したがって、並進運動をおこなう把持動作、ピッチ動作、ヨー動作の動力伝達経路と、回転運動をおこなうロール動作は並列駆動となる。

直動動作に用いるリニアモータの固定部は 5 自由度 HEM² の基部にあり、可動部には同軸駆動力伝達機構と把持動作に用いるリニアモータがある。一方、ロール動作の駆動力は、基部の回転モータから直動動作に応じて回転軸上を移動するギアを介して供給する。ピッチ動作、ヨー動作の駆動力は、柔軟に屈曲可能なスラストワイヤを含む基部に固定されたフレキシブルアクチュエータから保持部 1, 2 を介して供給する。したがって、2 台のアクチュエータを直列に配置して駆動する直動動作、把持動作と、ロール動作、ピッチ動作、ヨー動作も並列駆動方式となる。これにより、直列駆動のみを採用した多自由度ロボットと比較して可動部の質量が低減される。

3. 運動学

本章では、5 自由度 HEM² の駆動部と先端部の運動の関係性を示す運動学について述べる。まず、各部の幾何学的関係から、駆動部のモータ空間と先端部の関節空間の間において座標変換をおこなう。次に、ロボットの可操作性と特異点について述べる。

3.1 座標変換

駆動部におけるアクチュエータの運動を表すモータ空間の位置変数および力変数は、式 (1), (2) となる。

$$\mathbf{x}_{\text{motor}} = \begin{bmatrix} x_{mG} & x_{mL} & q_{mR} & x_{mP} & x_{mY} \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

$$\mathbf{f}_{\text{motor}} = \begin{bmatrix} f_{mG} & f_{mL} & \tau_{mR} & f_{mP} & f_{mY} \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

先端部におけるエンドエフェクタの運動を表す関節空間の位置変数および力変数は、式 (3), 式 (4) となる。

$$\mathbf{x}_{\text{joint}} = \begin{bmatrix} x_G & x_L & \phi_R & \theta_P & \psi_Y \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

$$\mathbf{f}_{\text{joint}} = \begin{bmatrix} f_G & f_L & \tau_R & \tau_P & \tau_Y \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

スレーブの先端部は把持動作のためにスライダクランク機構で構成されたグリップを有するが、本論文ではスライダクランク機構を駆動するロッド 1 の位置および力を関節空間変数 x_G , f_G とする。したがって、把持動作、直動動作、ロール動作の

(b) Mechanism for pitch motion
Fig.4 Schematic drawing of tip mechanism

関節空間変数の値は、モータ空間変数の値と一致する。一方、ピッチ動作、ヨー動作では、パラレルリンク機構の運動学を考慮して制御をおこなう。

先端部の機構概略図を図 4 に示す。ピッチ動作、およびヨー動作後の点 D を原点とする座標系 Σ_D から基準座標系 Σ_R への座標変換行列 T は式 (5)、式 (6)、式 (7) となる。

$$T = \begin{bmatrix} R & x_D \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta_P & -\sin \theta_P \sin \psi_Y & \sin \theta_P \cos \psi_Y \\ 0 & \cos \psi_Y & \sin \psi_Y \\ \sin \theta_P & \cos \theta_P \sin \psi_Y & \cos \theta_P \cos \psi_Y \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$x_D = \begin{bmatrix} x_D & y_D & z_D \end{bmatrix}^T \\ = \begin{bmatrix} -L_{CD} \sin \theta_P \cos \psi_Y \\ -L_{CD} \sin \psi_Y \\ L_{CD} \cos \theta_P \cos \psi_Y + L_{OC} \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで、 L は図中のリンク長さ、あるいは 2 点間の距離であり、下添え字が両端の 2 点を表す。また、下添え字 X, Y, Z は X 方向成分、 Y 方向成分、 Z 方向成分を表す。 L_{P0} は初期姿勢における L_{GH} の Z 方向成分を表す。各部の寸法を表 4 に示す。座標系 Σ_D において、 X 軸上の点 B と Y 軸上の点 F の基準座標系 Σ_R における位置は式 (8)、式 (9) となる。

$$x_B = \begin{bmatrix} x_B & y_B & z_B \end{bmatrix}^T \\ = x_D + R \begin{bmatrix} L_{BD} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

$$x_F = \begin{bmatrix} x_F & y_F & z_F \end{bmatrix}^T \\ = x_D + R \begin{bmatrix} 0 & L_{FD} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

Table4 Dimension of links

Link	Master	Slave
L	41.1 mm	35.8 mm
L_{AB}, L_{EF}	37.6 mm	34.6 mm
L_{BC}, L_{FC}	13.4 mm	13.2 mm
L_{BD}, L_{FD}	8.8 mm	8.8 mm
L_{CD}	10.1 mm	9.8 mm
L_{OC}	9.2 mm	12.7 mm
L_{GH}, L_{IJ}	51.0 mm	48.6 mm
L_{XAG}, L_{YEI}	1.7 mm	1.7 mm
L_{XOH}, L_{YOJ}	8.0 mm	8.0 mm
L_{P0}, L_{Y0}	37.3 mm	38.6 mm

したがって、基準座標系 Σ_R において X 軸上を移動する点 A と原点 O の間の距離 L_{OA} 、 Y 軸上を移動する点 E と原点 O の間の距離 L_{OE} は式 (10)、式 (11) となる。

$$L_{OA} = x_B + \sqrt{L_{AB}^2 - y_B^2 - z_B^2} \quad (10)$$

$$L_{OE} = y_F + \sqrt{L_{EF}^2 - x_F^2 - z_F^2} \quad (11)$$

一方、リンク機構により直動関節 1 の動作はロッド 2、直動関節 2 の動作はロッド 3 にそれぞれ伝達される。ロッド 2 とロッド 3 の位置は式 (12)、式 (13) となる。

$$x_{mP} = -\sqrt{L_{GH}^2 - (L_{OA} - L_{XOH} + L_{XAG})^2} + L_{P0} \quad (12)$$

$$x_{mY} = -\sqrt{L_{IJ}^2 - (L_{OE} - L_{YOJ} + L_{YEI})^2} + L_{Y0} \quad (13)$$

ロッド 2 とロッド 3 は同軸駆動力伝達機構を介してフレキシブルアクチュエータのスラストワイヤに接続される。

モータ空間と関節空間における速度変数の関係は、ヤコビ行列により式 (14)、式 (15) となる。

$$\dot{x}_{motor} = J_v \dot{x}_{joint} \quad (14)$$

$$J_v = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_P \frac{\partial L_{OA}}{\partial \theta_P} & J_P \frac{\partial L_{OA}}{\partial \psi_Y} \\ 0 & 0 & 0 & J_Y \frac{\partial L_{OE}}{\partial \theta_P} & J_Y \frac{\partial L_{OE}}{\partial \psi_Y} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式 (10)、式 (11) から得られるヤコビ行列の各要素は式 (16) から式 (19) となる。

$$\frac{\partial L_{OA}}{\partial \theta_P} = -L_{BC2} \cos \theta_{P2} + \frac{z_B L_{BC2} \cos \theta_{P3}}{\sqrt{L_{EF}^2 - x_F^2 - z_F^2}} \quad (16)$$

$$\frac{\partial L_{OA}}{\partial \psi_Y} = L_{CD} \sin \theta_P \sin \psi_Y + \frac{L_{CD}^2 \sin \psi_Y \cos \psi_Y}{\sqrt{L_{EF}^2 - x_F^2 - z_F^2}} \\ + \frac{(L_{CD} \sin \psi_Y (L_{OC} + L_{BC2} \sin \theta_{P3}) \sin \theta_P)}{\sqrt{L_{EF}^2 - x_F^2 - z_F^2}} \quad (17)$$

$$\frac{\partial L_{OE}}{\partial \theta_P} = \frac{L_{OC} L_{FC} \sin \theta_P \cos \psi_{Y2}}{\sqrt{L_{EF}^2 - x_F^2 - z_F^2}} \quad (18)$$

$$\frac{\partial L_{OE}}{\partial \psi_Y} = -L_{FC} \cos \psi_{Y2} \\ + \frac{L_{FC} \sin \psi_{Y2} (L_{FC} \sin \psi_{Y2} + L_{OC} \cos \theta_P)}{\sqrt{L_{EF}^2 - x_F^2 - z_F^2}} \quad (19)$$

ここで、 L_{BC2} 、 θ_{P2} 、 θ_{P3} 、 ψ_{Y2} はそれぞれ式 (20) から式 (23)

 Fig.7 Block diagram of four-channel bilateral control system for the five DoF HEM²

力参照値 $F_{\text{motor}}^{\text{ref}}$ は式 (33), 式 (34) となる.

$$F_{\text{motor}}^{\text{ref}} = (J_v^T)^{-1} K_f (F_{\text{joint}}^{\text{cmd}} - \hat{F}_{\text{joint}}^{\text{rfob}}) \quad (33)$$

$$K_f = \text{diag} [K_{fG} \ K_{fL} \ K_{fR} \ K_{fP} \ K_{fY}] \quad (34)$$

各モータに与える電流は, トルク定数と慣性の公称値を用いて力参照値 $F_{\text{motor}}^{\text{ref}}$ から導出する.

4.2 4ch バイラテラル制御

4ch バイラテラル制御を用いた遠隔操作では, 位置情報と力情報で構成される力覚情報を, マスタ, スレーブ間で双方向かつリアルタイムに送信する. そして, 式 (35), 式 (36) に示す制御目標を, 高精度な位置制御と力制御により達成することで, 鮮明な力覚情報伝達を実現する.

$$x_{\text{jointM}} - x_{\text{jointS}} = 0 \quad (35)$$

$$f_{\text{jointM}} + f_{\text{jointS}} = 0 \quad (36)$$

式 (35) は位置の制御目標であり, 関節空間におけるマスタの位置 x_{jointM} とスレーブの位置 x_{jointS} の一致を表す. 式 (36) は力の制御目標であり, マスタが物体に与える力 f_{jointM} とスレーブが物体に与える力 f_{jointS} において, 作用反作用の法則の成立を表す. 位置制御と力制御を個々に扱うことは困難であるが, 外乱オブザーバを用いた高精度な加速度制御により, 位置の制御目標と力の制御目標を同時に達成することが可能となる.

5 自由度 HEM² に実装する 4ch バイラテラル制御のブロック線図を図 7 に示す. ここで, 位置ゲイン行列 K_p , 速度ゲイン行列 K_v , 慣性行列 M_n は式 (37), 式 (38), 式 (39) で表される.

$$K_p = \text{diag} [K_{pG} \ K_{pL} \ K_{pR} \ K_{pP} \ K_{pY}] \quad (37)$$

$$K_v = \text{diag} [K_{vG} \ K_{vL} \ K_{vR} \ K_{vP} \ K_{vY}] \quad (38)$$

$$M_n = \text{diag} [M_{nG} \ M_{nL} \ J_{nR} \ M_{nP} \ M_{nY}] \quad (39)$$

マスタ, スレーブの各モータに与える力参照値 $F_{\text{motor}}^{\text{ref}}$,

Table5 Parameters of linear motors

Parameter	Grasping	Translation	Pitch & Yaw
M_n	0.3 kg	2.4 kg	0.6 kg
K_{tn}	33 N/A	33 N/A	33 N/A
K_p	1600.0 1/s ²	400.0 1/s ²	3600.0 1/s ²
K_v	80.0 1/s	40.0 1/s	120.0 1/s
K_f	0.8	0.8	0.2
$g^{\text{dis}}, g^{\text{rfob}}$	450.0 rad/s	450.0 rad/s	450.0 rad/s
g^{pse}	900.0 rad/s	900.0 rad/s	900.0 rad/s
$F_{\text{M}}^{\text{const}}$	0.5 N	0.0 N	1.0 N
$F_{\text{S}}^{\text{const}}$	0.5 N	0.5 N	1.0 N
V_{thresh}	2.0 mm/s	4.0 mm/s	4.0 mm/s

$F_{\text{motorS}}^{\text{ref}}$ は式 (40), 式 (41), 式 (42), 式 (43) となる.

$$F_{\text{motorM}}^{\text{ref}} = -M_{nM} J_{vM} C_p (X_{\text{jointM}}^{\text{res}} - X_{\text{jointS}}^{\text{res}}) - (J_{vM}^T)^{-1} C_f (F_{\text{jointM}}^{\text{res}} + F_{\text{jointS}}^{\text{res}}) \quad (40)$$

$$F_{\text{motorS}}^{\text{ref}} = M_{nS} J_{vS} C_p (X_{\text{jointM}}^{\text{res}} - X_{\text{jointS}}^{\text{res}}) - (J_{vS}^T)^{-1} C_f (F_{\text{jointM}}^{\text{res}} + F_{\text{jointS}}^{\text{res}}) \quad (41)$$

$$C_p = K_p + G K_v \quad (42)$$

$$C_f = K_f \quad (43)$$

5. 実験

5 自由度 HEM² を用いて, カセンサによる力情報の推定精度の検証と, 自由動作および接触動作における力覚情報伝達をおこなった. 式 (44) に示す機構の伝達効率 e_f の値は, 反力オブザーバにおいて伝達効率を考慮しない力制御系を用いた場合の力測定値と力推定値の比較により導出した.

$$e_f = \text{diag} [0.897 \ 1.0 \ 1.0 \ 0.697 \ 0.747] \quad (44)$$

また, 実験に用いた制御パラメータを表 5, 表 6 に示す. ゲインおよび摩擦補償値は実験的に決定した.

5.1 反力推定性能の検証実験

反力オブザーバによる力情報の推定精度をカセンサを用いて検証した. 力情報はロードセル (LUR-A-200NSA1, 共和電業)

Table6 Parameters of rotary motor

Parameter	Roll
J_n	83.7 mgm ²
K_{tn}	60.3 mNm/A
K_p	1600.0 1/s ²
K_v	100.0 1/s
K_f	0.2
g^{dis}, g^{rfob}	400.0 rad/s
g^{pse}	800.0 rad/s
F^{const}	6.0 mNm
V_{thresh}	0.15 rad/s

Fig.8 Experimental Setup

および増幅器 (DPM-711B M10, 共和電業) で測定し, 16 bit の AD 変換機器 (PCI-3135, インターフェイス) で読み取りをおこなった. 外乱オブザーバを用いた加速度制御に基づく力制御系において, 5 自由度 HEM² のスレーブの各自由度にステップ入力を与えた. 把持動作, 直動動作におけるステップ入力は 4 N, ロール動作, ピッチ動作, ヨー動作におけるステップ入力は 0.04 Nm とした. そして, スレーブの先端部を力センサの受感部に接触させ, 力の測定値を得た. スレーブの把持機構はスライダクランク機構であるため, 運動学によりモータの出力をグリップの先端に生じる力に変換し, 比較をおこなった. また, ロール動作, ピッチ動作, ヨー動作についても, 回転中心からの距離を用いて力測定値をトルクに変換した値を使用した. 各動作について 3 回の測定をおこない, 誤差の平均値を導出した.

ステップ入力を与えた 1 秒後から 5 秒間における力測定値の平均値と力推定値の平均値の誤差を表 7 に示す. ダイレクトドライブのリニアモータを用いる直動動作は摩擦が小さく, 力情報を高精度に推定したことが確認できる. 一方, アクチュエータからエンドエフェクタまでに機構を介した把持動作, ロール動作, ピッチ動作, ヨー動作では平均で 5.3 % から 7.5 % の誤差が生じた. 5 自由度 HEM² の駆動部にある同軸駆動力伝達機構は, ロール動作とその他の動作における並列駆動を実現するが, ギアによる動力伝達に起因した摩擦力が発生する. そして, 同軸駆動力伝達機構を構成する各部品の回転中心軸の位置には, 部品の加工精度および組み立て精度によって誤差が生じ, 摩擦力が増加する原因となる. さらに, ピッチ動作, ヨー動作ではフレキシブルアクチュエータに組み込まれたスラストワイヤにおける精度の低下が挙げられる. また, 鉗子先端部のスライダクランク機構の可動部にはベアリング等を用いておらず, 摩擦力が発生する原因となる.

5.2 4ch バイラテラル制御による力覚情報伝達

4ch バイラテラル制御を実装した 5 自由度 HEM² を用いて, 自由動作と接触動作における力覚情報伝達をおこなった. スレーブが物体に非接触状態でおこなわれる自由動作において, マスタ・スレーブ間には摩擦等の影響によって操作力が発生する. 自由動作では, 物体に接触していない状態の操作において, 把持動作, 直動動作, ロール動作, ピッチ動作, ヨー動作の順番でマスタを操作し, マスタ, スレーブ間に発生する操作力を検証した. 接触動作ではスレーブのエンドエフェクタを物体に接触させ, マスタ, スレーブ間で伝達された力覚情報の比較をおこなった. 図 8 に接触動作におけるスレーブおよび接触対象の擬似生体である小腸モデル (小腸縫合モデル 2 層チューブ, ASONE) を示す. スレーブのエンドエフェクタが小腸モデルを把持した状態で直動動作, ロール動作, ピッチ動作, ヨー動作の順番でマスタを操作した.

実験結果として図 9, 図 10 に自由動作および接触動作における位置, 角度応答と力, トルク応答を示す. 図 9 の (FG), (FL), (FR), (FP), (FY) は, それぞれ把持, 直動, ロール, ピッチ, ヨー自由度による自由動作であり, 水色の背景がマスタを操作した時間帯を表す. 図 10 の (CG), (CL), (CR), (CP), (CY) はそれぞれ把持, 直動, ロール, ピッチ, ヨー自由度による接触動作であり, 把持動作は矢印の区間, 把持以外の動作は灰色の背景がマスタを操作した時間帯を表す. また, マスタ, スレーブ間における位置の最大誤差および反力の最大誤差を表 7 に示す.

図 9(a)–(c) および図 10(a)–(c) に示す各自由度の位置, 角度応答, 表 7 に示す最大位置, 角度誤差より, マスタ, スレーブ間における位置, 角度誤差が小さく, マスタ側の位置, 角度にスレーブの位置, 角度が追従したことが確認できる. 力, トルク応答においても図 9(d)–(f), 図 10(d)–(f), 表 7 より, マスタにおいて推定された力, トルクにスレーブにおける力, トルクが追従しており, スレーブに加えられた力, トルクがマスタ側で再現されていることが確認できる. ただし, 力およびトルクは作用反作用の法則に従うため, マスタとスレーブでは推定値の符号が異なる. したがって, バイラテラル制御の制御目標である式 (35) と式 (36) が達成されており, マスタ・スレーブ間において力覚情報が伝達された.

図 9 に示す自由動作の結果では, (FG) の時間帯において把持動作の位置応答値が変化した, 発生した力推定値は小さいことが確認できる. したがって, 5 自由度 HEM² で把持動作をおこなう際の操作力は小さい. 把持以外の自由度を操作した (FL), (FR), (FP), (FY) の時間帯においても, 各自由度の位置, 角度を変化させた際に生じる操作力は小さかった. 接触動作の実験結果である図 10 では, (CG) の時間帯において小腸モデルには常に把持力が加えられており, 対象物の脱離が無かった. (CL) の時間帯では, 小腸モデルを把持した状態で直動動作をおこなったため, 位置の変化に応じて小腸モデルからの反力が推定された. (CR), (CP), (CY) の時間帯においても, 位置, 角度の変化に応じて大きな反力が推定された. これらの結果より, 物体に接触しない自由動作においては操作力による性能の低下が小さく, 接触動作時にはスレーブが小腸モデルから受ける反力が, 各自由度においてマスタに伝達されたことを確認できる.

Table7 Experimental results

Experiment	Description	Grasping	Translation	Roll	Pitch	Yaw
Validation of RFOB (Force control)	Size of step	4.0 N	4.0 N	40.0 mNm	-50.0 mNm	-50.0 mNm
	Average error	5.5 %	-0.8 %	-7.5 %	7.4 %	5.3 %
Transmission of force sensation (Bilateral control)	Maximum position error	42.0 μ m	14.0 μ m	3.0 mrad	1.0 mrad	2.0 mrad
	Maximum force error	0.526 N	1.330 N	20.0 mNm	24.0 mNm	26.0 mNm

Fig.9 Experimental results (free motion)

Fig.10 Experimental results (contact to pseudo intestine)

6. 結 論

本論文では、力覚情報伝達機能を備えた手術支援システムの実現を目的として、スレーブにおいて人間の動作を再現するための把持動作、直動動作、ロール動作、ピッチ動作、ヨー動作を有する 5 自由度 HEM² を開発した。球体関節を回転中心としたピッチ動作、ヨー動作をおこなうために、先端部にはパラレルリンク機構を使用した。そして、可動部の質量の低減とバックドライバビリティの向上のために、同軸駆動力伝達機構による並列駆動機構を開発した。また、力覚情報伝達の精度向上のため、可動部に生じる摩擦を考慮した上で高剛性の動力伝達部品を使用した機構設計をおこなった。力情報の取得は反力オプザーバによりカセンサレスでおこなわれ、機構の伝達効率を考慮した反力プザーバの推定精度の検証では、平均で 7.5% 程度

の誤差の範囲で力情報を推定した。加速度制御に基づくバイラテラル制御による力覚情報伝達では、位置および力に関する制御目標を達成し、力覚情報がマスタ、スレーブ間で伝達されたことを確認した。5 自由度 HEM² はエンドエフェクタの位置を移動する直動動作が 1 自由度のみであるため、ロボットの作業領域に制約が生じる。したがって、将来研究として力覚情報伝達機能を備えた 6 自由度以上の HEM² の実現が挙げられる。また、自由度の増加にともない、可動部と固定部の接触箇所が増加して摩擦の原因となるため、摩擦の低減を考慮する必要がある。

謝 辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金 (課題番号 25220903 基盤研究 (S) 「力触覚技術による医工融合 基盤の革

新」)によって行われたことを記すと共に、関係者各位に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) R. H. Taylor and D. Stoianovici: Medical Robotics in Computer-Integrated Surgery, IEEE Transactions on Robotics and Automation, **19**, 5(2008) 765.
- 2) 佐久間 一郎: 低侵襲手術と精密工学の今後, 精密工学会誌, **74**, 11(2008) 1135.
- 3) M. Tavakoli, R. V. Patel, M. Moallem, and A. Aziminejad: Haptics for Teleoperated Surgical Robotic Systems (2008).
- 4) A. M. Okamura: Methods for haptic feedback in teleoperated robot-assisted surgery, The Industrial Robot, **31**, 6(2004) 499.
- 5) B. Hannaford: A Design Framework for Teleoperators with Kinesthetic Feedback, IEEE Transactions on Robotics and Automation, **5**, 4(1989) 426.
- 6) D. A. Lawrence: Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation: IEEE Transactions on Robotics and Automation, **9**, 5(1993) 624.
- 7) W. Iida and K. Ohnishi: Reproducibility and Operationality in Bilateral Teleoperation, Proceedings of 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control(2004) 217.
- 8) S. McKinley, A. Garg, S. Sen, R. Kapadia, A. Murali, K. Nichols, S. Lim, S. Patil, P. Abbeel, A. M. Okamura, K. Goldberg: A Single-Use Haptic Palpation Probe for Locating Subcutaneous Blood Vessels in Robot-Assisted Minimally Invasive Surgery, Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering(2015) 1151.
- 9) C. H. King, M. O. Culjat, M. L. Franco, C. E. Lewis, E. P. Dutson, W. S. Grundfest, and J. W. Bisley: Tactile Feedback Induces Reduced Grasping Force in Robot-Assisted Surgery, IEEE Transactions on Haptics, **2**, 2(2009) 103.
- 10) G. S. Guthart and J. K. Salisbury Jr.: The IntuitiveTM Telesurgery System: Overview and Application, Proceedings of 17th IEEE International Conference of Robotics and Automation(2000) 618.
- 11) M. Ghodoussi, S. E. Butner, and Y. Wang: Robotic Surgery – The Transatlantic Case, Proceedings of 19th IEEE International Conference of Robotics and Automation(2002) 1882.
- 12) B. Hannaford, J. Rosen, D. W. Friedman, H. King, P. Roan, L. Cheng, D. Glozman, J. Ma, S. N. Kosari, and L. White: Raven-II: An Open Platform for Surgical Robotics Research, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, **60**, 4(2013) 954.
- 13) H. Li, K. Kawashima, K. Tadano, S. Ganguly, and S. Nakano: Achieving Haptic Perception in Forceps' Manipulator Using Pneumatic Artificial Muscle, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, **18**, 1(2013) 74.
- 14) T. Sasaki, K. Kokubo, and H. Sakai: Hydraulically driven joint for a force feedback manipulator, Precision Engineering, **47**(2017) 445.
- 15) K. Ibrahim, A. Ramadan, M. Fanni, Y. Kobayashi, A. A. Ismail, and M. G. Fujie: Screw Theory Based-Design and Tracking Control of an Endoscopic Parallel Manipulator for Laparoscopic Surgery, Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation(2013) 2491.
- 16) C. Ishii, K. Kobayashi, Y. Kamei, and Y. Nishitani: Robotic Forceps Manipulator With a Novel Bending Mechanism, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, **15**, 5(2010) 671.
- 17) J. Arata, T. Saito, and H. Fujimoto: Outer Shell Type 2 DOF Bending Manipulator using Spring-link Mechanism for Medical Applications, Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation(2010) 1041.
- 18) 石井 恵奈, 桂 誠一郎, 西 宏章, 大西 公平: FPGA を用いた多自由度バイラテラル鉗子ロボットシステムの構築, 電気学会論文誌 D, **127**, 5(2007) 508.
- 19) J. Burgner, D. C. Rucker, H. B. Gilbert, P. J. Swaney, P. T. Russell III, K. D. Weaver, and R. J. Webster III: A Telerobotic System for Transnasal Surgery, IEEE Transactions on Mechatronics, **19**, 3(2014) 996.
- 20) S. Hyodo, Y. Soeda, and K. Ohnishi: Verification of Flexible Actuator From Position and Force Transfer Characteristic and Its Application to Bilateral Teleoperation System, IEEE Transactions on Industrial Electronics, **56**, 1(2009) 36.
- 21) 吉川 恒夫: ロボットアームの可操作度, 日本ロボット学会誌, **2**, 1(1984) 63.
- 22) K. Ohnishi, M. Shibata, and T. Murakami: Motion control for advanced mechatronics, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, **1**, 1(1996) 56.
- 23) T. Murakami, F. Yu, and K. Ohnishi: Torque Sensorless Control in Multidegree-of-Freedom Manipulator, IEEE Transactions on Industrial Electronics, **40**, 2(1993) 259.