

単孔式腹腔鏡下手術（SPS）支援ロボットの 位置制御

内田, 拓真 / UCHIDA, Takuma

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

55

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

8

(発行年 / Year)

2014-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00010279>

単孔式腹腔鏡下手術(SPS)支援ロボットの位置制御

POSITION CONTROL OF SURGICAL SUPPORT ROBOT FOR SINGLE PORT SURGERY

内田拓真

Takuma Uchida

指導教員 石井千春

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

Recently, master-slave type surgical support robot for laparoscopic surgery such as da Vinci system has been clinically used. However, surgical support robot for single port surgery (SPS) has not been clinically used yet. The goal of this study is to construct a control system of surgical support robot for SPS. To do this, kinematics of the surgical support robot for SPS are derived. Then, a numerical solution of inverse kinematics problem is given using Jacobian. On the basis of the inverse kinematics, the tip of the surgical support robot is controlled so as to follow the operated direction of an input device. Experimental works were carried out to demonstrate the proposed control method. In addition, left hand side of surgical support robot for SPS was built.

Key Words : *Single port surgery (SPS), Surgical support robot, Homogeneous transformation matrix, Inverse kinematics*

1. 緒論

内視鏡下で手術が行われる低侵襲外科分野では、限られた空間内で繊細な手術作業を実現することが要求される。術者の操作により、マスタースレイブ制御方式で駆動するロボットが手術作業を行う手術支援ロボットが種々提案[1], [2]され、現在、手術支援ロボット da Vinci[3]による腹腔鏡下手術が実用化されている。しかしながら、単孔式腹腔鏡下手術 (Single Port Surgery: SPS) 用のマスタースレイブ型手術支援ロボットはまだ実用化されていない。

そこで、本研究では SPS 手術支援ロボットの開発を目標としている。先行研究[4], [5]では、SPS 用マスタースレイブ型手術支援用ロボットアーム及び鉗子マニピュレータを製作し、それぞれをマスター側デバイスである Force Dimension 社製の力覚フィードバック装置 Omega.7 を用いて別々に制御を行っていた。本研究では、SPS 用マスタースレイブ型手術支援ロボットとして、ロボットアーム及び鉗子マニピュレータを Omega.7 により統括して操作するためのプログラムを構築し、ロボットの位置制御を行うことを目的とする。

SPS 手術における問題点として、単孔式にすることにより腹腔内で左右の鉗子が交差し、内視鏡により映し出されたモニター画面から見た鉗子の動作と操作側の鉗子の動作が左右逆転してしまう。これにより手術の難易度

が上がってしまう。そこで本研究では、モニター画面から見た左右の鉗子の動作と Omega.7 の左右の操作を同じにするために、SPS 手術支援ロボットのアーム部分の動作を左右逆転させて制御を行う。このため、同次変換行列を用いて SPS 手術支援ロボットの運動学を導出し、さらに逆運動学に基づいて鉗子マニピュレータ先端の位置制御を行う。なお、本研究では右手用 SPS 手術支援ロボットの制御に焦点をあてる。しかし、右手用 SPS 手術支援ロボットだけでは手術を行うことができないので、左手用 SPS 手術支援ロボットの製作も行った。左手用 SPS 手術支援ロボットの制御は、右手用 SPS 手術支援ロボットの制御方法を左右逆転させて行えばよい。

2. 使用機器の概要

(1) 単孔式腹腔鏡下手術(SPS)

Fig.1 に単孔式腹腔鏡下手術(SPS)の概要を示す。SPS とは、近年急速に広まった腹腔鏡手術である。従来の腹腔鏡手術とは違い、臍上に一か所だけ孔を開け、そこから 1 本の内視鏡と 2 本の鉗子と呼ばれる手術器具を挿入して行う手術である。これにより、傷口が減るため、術後の癒着による合併症が少なくなると考えられている。また、傷跡は臍の中に引き込まれて見えにくくなるため、美容的なメリットも大きい。

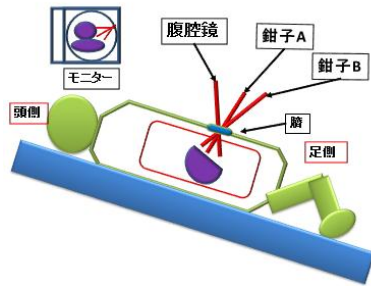


Fig.1 Single Port Surgery (SPS)

(2) 本研究で使用する手術支援ロボット

本研究では、上述の SPS を支援するロボットシステムの開発が目的である。そこで、医師が操作する入力装置として Fig.2 に示す Forece Dimesion 社製の力覚フィードバック装置 Omega.7 を使用する。Omega.7 は、7 自由度の位置制御と 4 自由度の力覚提示が可能であり、医療業界においての利用が期待されている。また、使用する SPS 手術支援ロボットを Fig.3 に示す。SPS 手術支援ロボットはロボットアームと鉗子マニピュレータから構成される。



Fig.2 Omega.7



Fig.3 SPS Support Robot

(3) ロボットアームの仕様

ロボットアームの仕様を以下に示す。

1. 鉗子部のピッチ動作が可能($\pi/9 \sim \pi/4$ (rad))
2. 鉗子部のヨー動作が可能($-\pi/6 \sim \pi/6$ (rad))
3. 鉗子部の並進移動が可能($0 \sim 75$ (mm))
4. 鉗子挿入時、挿入孔が広がらないためにピボットポイントが設定されている
5. ロボットアーム同士が干渉せず、患者にも干渉しない。

これらの仕様を表現する概略図を Fig.4 に示す。

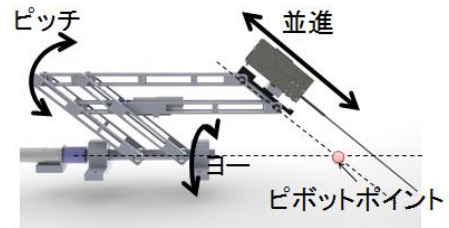


Fig.4 Specification of right robot arm

(4) 鉗子マニピュレータの仕様

鉗子マニピュレータの仕様を以下に示す。

1. 把持動作のモーター制御が可能($0 \sim \pi/3$ (rad))
 2. 把持屈曲部回転動作のモーター制御が可能($0 \sim \pi/2$ (rad))
 3. 把持屈曲動作の手動操作が可能($0 \sim \pi/3$ (rad))
- これらの仕様を表現する概略図を Fig.5 に示す。

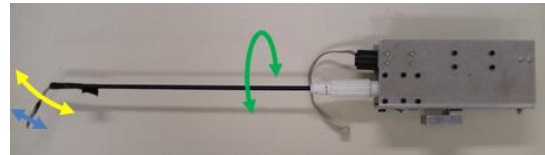


Fig.5 Specification of robot forceps

Fig.5 において青色の矢印は把持開閉動作，黄色の動作は把持屈曲動作，緑色の矢印は把持屈曲部回転動作を表す。

3. 左手用 SPS 手術支援ロボットアームの製作

先行研究では、右手用 SPS 手術支援ロボットだけが製作されており、両手の手術動作を可能にするため、まず左手用 SPS 手術支援ロボットの製作を行う。基本的には右手用と同じロボットを製作するが、1 か所設計変更を行った。

(1) 左手用ロボットアームの設計変更点

左手用ロボットアームの製作時の変更点として、ピッチ動作を行うためのモーターを取り付ける台のねじの取り付け方向を上下反転させた。先行研究で製作した SPS 手術支援ロボットでは、下からねじ止めていたが、本研究で製作した左手用 SPS 手術支援ロボットは上からねじ止めることでモーターの取り付け、取り外しが容易になり、組立・分解性が向上した。変更する前の部分とした後の部分を次の Fig.6 に示す。



Before After

Fig.6 Modification of the robot arm

なお, Fig.6 は左側が改良前であり, 右側が改良後である。

(2) SPS 手術支援ロボット

製作を行った右側の SPS 手術支援ロボットと先行研究で製作した SPS 手術支援ロボットを Fig.7 に示す。

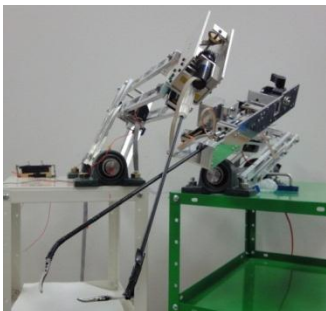


Fig.7 SPS support robots

Fig.7 におけるロボットアームは白い台が左手用であり、緑の台が右手用のロボットアームである。それぞれの SPS 手術支援ロボットと Omega.7 の暫定的な配置を Fig.8 に示す。

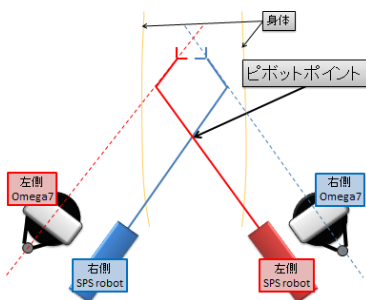


Fig.8 Position of SPS support robots and Omega.7s

Fig.8 に示されるように、SPS では配置されたロボットアームの位置と鉗子先端の位置が左右逆転する。そこで本研究では、SPS 手術支援ロボットの操作において、右手用 SPS 手術支援ロボットの鉗子先端の位置を右手用 Omega.7 の動く方向に追従させ、左手用 SPS 手術支援ロボットの鉗子先端の位置を左手用 Omega.7 の動く方向に追従させる。すなわち、SPS 手術支援ロボットと Omega.7 の左右の位置を入れ替えて制御を行う。

これを実現するために、手術支援ロボットの運動学を導出し、さらに逆運動学に基づいて制御を行う。なお、右手用の解析を行えば、左手用は左右逆転すればよいので、以降では右手用 SPS 手術支援ロボットと右手用 Omega.7 に注目する。

4. 同次変換行列による順運動学問題

同次変換行列を使用して右手用 SPS 手術支援ロボットの順運動学を求める。同次変換行列は、回転変換や並進移動変換を示す 4×4 の行列で、一般的にロボットアームの位置姿勢を表すために使用される。同次変換行列を求めた後に、導出した順運動学の正当性を確認するため、様々な数値を与え確認実験を行う。

(1) 求める同次変換と基準位置

同次変換行列を求める際に、まず右手用 SPS 手術支援ロボットの基準位置を Fig.9 に示すように以下の手順で定める。

1. 基準座標 X-Y の原点 O から SPS 手術支援ロボットの重心 G を X 軸方向に -250 mm 並進移動する。
2. 重心 G を中心に時計回りに SPS 手術支援ロボットを $\pi/6$ rad 回転させる。

この姿勢を右手用 SPS 手術支援ロボットの基準位置とする。このとき、Y 軸と鉗子の交点 P (ピボットポイント) と重心 G との距離は 500 mm となる。

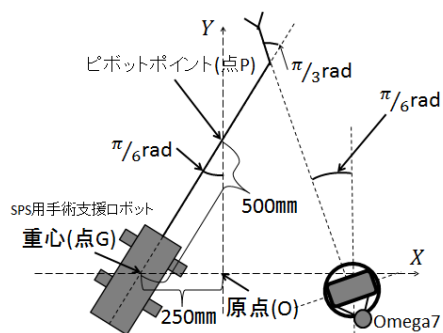


Fig.9 Reference coordinates and reference position

(2) 同次変換の計算

Fig.9 で示した基準位置から鉗子先端部を示すための同次変換による計算を行う。まず、 0T_1 として、原点 O から重心 G を X 方向に -250 mm 平行移動させる。このとき、同次変換行列 0T_1 は次式となる。

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -250 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

また、このときの G における座標系を (x_1, y_1, z_1) とする。

1T_2 として z_1 軸を中心として時計回りに $\pi/6$ (rad) 回転させる。このとき、同次変換行列 1T_2 は次式となる。

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

また、このときの座標系を (x_2, y_2, z_2) とする。

2T_3 として y_2 方向に 500 (mm) 平行移動させる。このとき、同次変換行列 2T_3 は次式となる。

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 500 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

また、このときの座標系を (x_3, y_3, z_3) とする。

3T_4 として x_3 軸を中心に時計回りに θ_4 回転させる。

このとき、同次変換行列 3T_4 は次式となる。

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_1 & -S_1 & 0 \\ 0 & S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

また、このときの座標系を (x_4, y_4, z_4) とする。なお、 θ_1 はピッチの動作を表す。

4T_5 として y_4 軸を中心に時計回りに θ_2 回転させる。このとき、同次変換行列 4T_5 は次式となる。

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} C_2 & 0 & S_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S_2 & 0 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

また、このときの座標系を (x_5, y_5, z_5) とする。なお、 θ_2 はヨーの動作を表す。

5T_6 として $-z_5$ 方向に70(mm)平行移動させる。このとき、同次変換行列 5T_6 は次式となる。

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -70 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

また、このときの座標系を (x_6, y_6, z_6) とする。

6T_7 として y_6 方向に $l + \Delta l$ 平行移動させる。このとき、同次変換行列 6T_7 は次式となる。

$${}^6T_7 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l + \Delta l \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

また、このときの座標系を (x_7, y_7, z_7) とする。

なお、この動作は並進移動を表す。

7T_8 として y_7 軸を中心に時計回りに θ_3 回転させる。このとき、同次変換行列 7T_8 は次式となる。

$${}^7T_8 = \begin{bmatrix} C_3 & 0 & S_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S_3 & 0 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

また、このときの座標系を (x_8, y_8, z_8) とする。なお、 θ_3 は把持先端部回転を示している。

8T_9 として x_8 軸を中心に時計回りに θ_4 回転させる。このとき、同次変換行列 8T_9 は次式となる。

$${}^8T_9 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_4 & -S_4 & 0 \\ 0 & S_4 & C_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

また、このときの座標系を (x_9, y_9, z_9) とする。なお、 θ_4 は把持屈曲の動作を示している。

${}^9T_{10}$ として y_9 方向に30(mm)平行移動させるこのとき、同次変換行列 ${}^9T_{10}$ は次式となる。

$${}^9T_{10} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 30 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

(1)~(10)式より、基準座標系からみた鉗子先端の位置 (X, Y, Z) は次のようにして算出される。

$${}^0P = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 {}^6T_7 {}^7T_8 {}^8T_9 {}^9T_{10} {}^{10}P = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

ここで、 0P は基準座標系における鉗子先端位置を表すベクトル、 ${}^{10}P$ は (x_{10}, y_{10}, z_{10}) 座標系における鉗子先端位置を表すベクトルである。また、 (X, Y, Z) は次のように求まる。

$$X = \left[C_1 C_4 + S_4 \left\{ S_3 (\sqrt{3} C_2 + S_1 S_2) + C_3 (\sqrt{3} S_2 - C_1 C_2) \right\} \right] + \frac{1}{2} (l + \Delta l) C_1 - 35 (\sqrt{3} S_2 - S_1 S_2) \quad (12)$$

$$Y = 15 \left[\sqrt{3} C_1 C_4 + S_4 \left\{ S_3 (C_2 - S_1 S_2) - C_3 (\sqrt{3} S_2 - C_1 C_2) \right\} \right] + \frac{\sqrt{3}}{2} (l + \Delta l) C_1 + 35 (S_2 + \sqrt{3} S_1 S_2) + 250 \sqrt{3} \quad (13)$$

$$Z = 30 \{ S_1 C_4 + S_4 C_1 (S_2 S_3 + C_2 C_3) \} + (l + \Delta l) S_1 - 70 C_1 C_2 \quad (14)$$

ここで、 C_i は $\cos \theta_i$ 、 S_i は $\sin \theta_i$ を表す。

(3) 順運動学による実験

求めた同時変換の式から様々な角度の値を与え、その式が正しいかの実験を行う。今回の実験条件を以下に示す。

1. $l + \Delta l = 250$ (mm)
2. $\theta_4 = \pi/3$ (rad)
3. $7\pi/18 \geq \theta_1 \geq \pi/9$ (rad)
4. $\pi/6 \geq \theta_2 \geq -\pi/6$ (rad)
5. $2\pi \geq \theta_2 \geq 0$ (rad)

動作範囲を示す概略図を Fig.11, Fig.12 に示す.

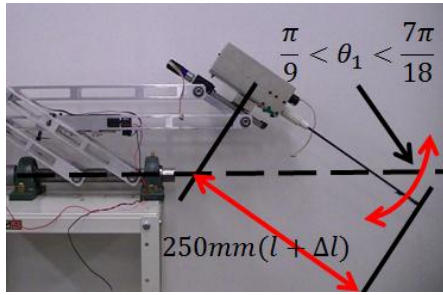


Fig.11 Operating range(Side view)

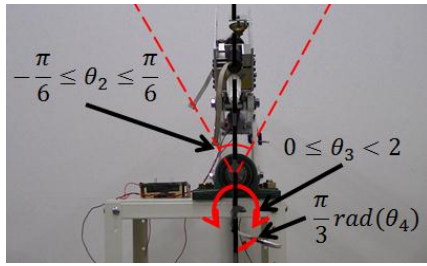


Fig.12 Operating range(Front view)

(4) 実験結果及び考察

実験結果の Table 1 を以下に示す.

Table 1 Experimental result

| 実験回数 | | 実験角度(rad) | | Matlabによる計算(mm) | 実測値(mm) | 誤差(mm) |
|------|-------|-----------|---|-----------------|---------|--------|
| 1回目 | ピッチ | $\pi/9$ | X | 201 | 199 | 2 |
| | ヨー | 0 | Y | 608 | 613 | 5 |
| | 把持部回転 | 0 | Z | 32.2 | 35 | 2.8 |
| 2回目 | ピッチ | $\pi/6$ | X | 193.1 | 190 | 3.1 |
| | ヨー | 0 | Y | 594.3 | 597 | 2.7 |
| | 把持部回転 | 0 | Z | 69.4 | 70 | 0.6 |
| 3回目 | ピッチ | $5\pi/36$ | X | 198.9 | 200 | 1.1 |
| | ヨー | $-\pi/6$ | Y | 592.9 | 590 | 2.9 |
| | 把持部回転 | $\pi/9$ | Z | 56.3 | 55 | 1.3 |

ここで Matlab による計算値として小数第 2 位以下の値

はきわめて微小な誤差と判断したため四捨五入した. 実験結果としては, Matlab による計算値と実測値の値がおおむね一致という結果になったが多少のずれが生じている. これはある角度に変更した時に機械的なずれが生じてしまったためと思われる.

5. ヤコビ行列による逆運動学問題

5 章では同次変換行列を用いて順運動学を求めた. そこで本章では求めた順運動学を用いてヤコビ行列による逆運動学を求める. 手順としてはヤコビ行列の速度と角速度の関係である

$\dot{\mathbf{r}}$ は速度, $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ は角速度である. このことから

$$\dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}^{-1}\dot{\mathbf{r}} \quad (15)$$

となり, ここで表される \mathbf{J} は

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} \quad (16)$$

となるので

5.2 節で求めた順運動学を(17)式に当てはめると

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial \theta_1} & \frac{\partial X}{\partial \theta_2} & \frac{\partial X}{\partial \Delta l} & \frac{\partial X}{\partial \theta_3} & \frac{\partial X}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial Y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Y}{\partial \Delta l} & \frac{\partial Y}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Y}{\partial \theta_4} \\ \frac{\partial Z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Z}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Z}{\partial \Delta l} & \frac{\partial Z}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Z}{\partial \theta_4} \end{bmatrix} \quad (17)$$

となる.

以上よりヤコビ行列を求めるとそれぞれの値は

$$\frac{\partial X}{\partial \theta_1} = 35C_1S_2 - \frac{15}{2}S_1 + \frac{15\sqrt{3}}{2}(S_1C_2 + C_1S_2S_3) - \frac{1}{2}S_1(215 + \Delta l) \quad (18)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial \theta_1} = \frac{15\sqrt{3}}{2}(S_1C_2 - C_1S_2S_3) - \frac{15}{2}S_1 - \frac{\sqrt{3}}{2}S_1(215 + \Delta l) + 35\sqrt{3}C_1S_2 \quad (19)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \theta_1} = 15C_1 + C_1(215 + \Delta l) + 70S_1C_2 - 15\sqrt{3}S_1(C_2C_3 + S_2S_3) \quad (20)$$

$$\frac{\partial X}{\partial \theta_2} = \frac{1}{2} \left[15\sqrt{3} \{ C_1 S_2 + S_3 (S_1 C_2 - \sqrt{3} S_2) + \sqrt{3} C_2 C_3 \} \right. \\ \left. + 35 C_2 (S_1 - \sqrt{3}) \right] \quad (21)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial \theta_2} = 35 C_2 (\sqrt{3} S_1 + 1) \\ - \frac{1}{2} \left[15\sqrt{3} \{ S_3 (S_2 + S_1 C_2) - C_1 S_2 + C_2 C_3 \} \right] \quad (22)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \theta_2} = 70 C_1 S_2 + 15\sqrt{3} C_1 (C_2 S_3 - S_2 C_3) \quad (23)$$

$$\frac{\partial X}{\partial \Delta l} = \frac{1}{2} C_1 \quad (24)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial \Delta l} = \frac{\sqrt{3}}{2} C_1 \quad (25)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \Delta l} = \frac{1}{2} S_1 \quad (26)$$

$$\frac{\partial X}{\partial \theta_3} = \frac{1}{2} \left[15\sqrt{3} \{ C_3 (S_1 S_2 + \sqrt{3} C_2) \} - \sqrt{3} S_2 S_3 \right] \quad (27)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial \theta_3} = \frac{15\sqrt{3}}{2} \{ C_3 (C_2 - S_1 S_2) + S_2 S_3 \} \quad (28)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \theta_3} = -15\sqrt{3} C_1 (C_2 S_3 - S_2 C_3) \quad (29)$$

$$\frac{\partial X}{\partial \theta_4} = 15 C_2 S_4 + 15 C_4 (C_1 C_2 C_3 + \sqrt{3} S_1 - S_1 S_2 S_3 - \sqrt{3} C_1) \quad (30)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial \theta_4} = 15 C_3 C_4 (S_1 - \sqrt{3} C_1 S_2) \\ + \frac{1}{2} S_3 (C_1 + \sqrt{3} S_1 S_2) - 15\sqrt{3} C_2 S_4 \quad (31)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \theta_4} = -30 S_2 S_4 - 30 C_4 (S_1 C_2 S_3 - C_1 C_2 C_3) \quad (32)$$

となる。

ここで表す式の中に C_i, S_i と示しているが 5.2 節で求めた式と同様の表記であり、 C_i は $\cos \theta_i$ 、 S_i は $\sin \theta_i$ を表す。

しかし、求めたヤコビ行列では 3×5 の行列式となるために逆行列が存在しないために逆運動学を求めることができない。そこで感覚的な動作による制御を行うことで、鉗子先端を Omega7 の X, Y, Z それぞれの操作方向に追

従させるために各操作方向において $\theta_1, \theta_2, \Delta l, \theta_3, \theta_4$ の 5 つの変数のうち関係が深い 3 つまでの変数を実験を通して感覚的に定める。これによりヤコビ行列を 3×3 の行列式にすることで逆行列を算出できるようにする。

6. 感覚的な動作による制御

本章では感覚的な動作による制御を行う。これは、鉗子先端を Omega7 の X, Y, Z それぞれの操作方向に追従させるために各操作方向において $\theta_1, \theta_2, \Delta l, \theta_3, \theta_4$ の 5 つの変数のうち関係が深い 3 つまでの変数を実験を通して感覚的に定め、ヤコビ行列を 3×3 の行列にしてヤコビ行列による逆運動学の解を求めるための準備である。

Fig.13, Fig.14 に Omega7 をどのように動かしていくと鉗子先端がどのように動かしていくかの関係を示す。

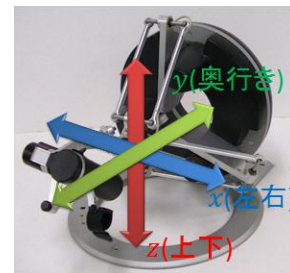


Fig.13 Omega7's motion(x,y,z)

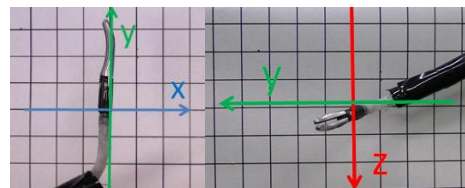


Fig.14 Forceps motion(x,y) and forceps motion(y,z)

(1) 動作方法

鉗子先端を Omega7 の x,y,z それぞれの操作方向に追従させるために各操作方向において $\theta_1, \theta_2, \Delta l, \theta_3, \theta_4$ の 5 つの変数のうち関係が深い 3 つまでの変数を定めるための実験を行うために動作方法を決める。まず、鉗子先端に定めた x 軸の動作についてはピッチ、ヨー、並進の動作を行うことで x 軸の動作を実現させる。y 軸の動作についてはピッチ、ヨー、並進の動作を行うことで y 軸の動作を実現させる。ここで、x 軸との動作との大きな違いは x 軸の動作は y 軸の動作に対しヨーの動作が大きく、y 軸の動作は x 軸の動作に対しピッチの動作が大きいことでそれぞれの動作の違いが出てくる。そして、z 軸の動作についてはピッチと並進の動作を行うことで z 軸の動作を実現させる。Fig.15, Fig.16, Fig.17 にそれぞれの軸に対しロボットアームがどのように動くかと

$\theta_1, \theta_2, \Delta l, \theta_3, \theta_4$ の 5 つの変数の中でどの変数が動くかを示す。

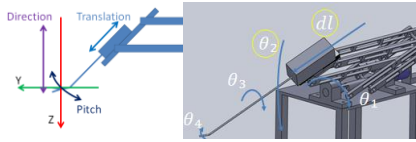


Fig.15 Robot arm motion(up and down)

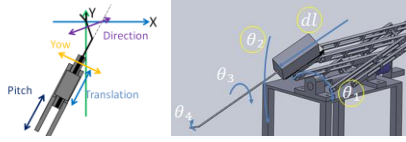


Fig.16 Robot arm motion(left and right)

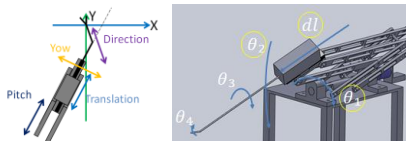


Fig.17 Robot arm motion(front and back)

(2) 動作実験

鉗子先端を Omega7 の x, y, z それぞれの操作方向に追従させるために各操作方向において $\theta_1, \theta_2, \Delta l, \theta_3, \theta_4$ の 5 つの変数のうち関係が深い 3 つまでの制御変数を定めるための実験を行う。なお、ロボットアームの初期姿勢としてはピッチが $\pi/6$ (rad), ヨーが 0 (rad), 並進の位置が 250 (mm) とする。 x, y, z がどのように動くかは 5.1 節で示した動作でロボットアームが動作を行う。

(3) ヤコビ行列において使用する制御変数

動作実験を行い、結果としては 7.1 節に示した制御方法でロボットの動作を行うことでそれぞれの軸の動作に近い結果となった。この結果からヤコビ行列において使用する制御変数を定める。Table.2 は実験結果からヤコビ行列において使用する変数を定めた表である。

Table 2 The variables in the Jacobian matrix to be used

| | θ_1 | θ_2 | Δl | θ_3 | θ_4 |
|------------|------------|------------|------------|-----------------|---------------|
| 左右の動作 | ○ | ○ | ○ | θ_2 の逆位相 | $\pi/6$ (rad) |
| 奥行き の動作 | ○ | ○ | ○ | θ_2 の逆位相 | $\pi/6$ (rad) |
| 上下の動作 | ○ | × | ○ | × | $\pi/6$ (rad) |

Table 2 より○と書いてある部分の変数 $\theta_1, \theta_2, \Delta l$ をヤコビ行列における制御変数として使用する。

7. 求めた逆運動学による制御

ヤコビ行列を計算し、感覚的な動作による制御から 3 つの影響が強い変数を決定したので逆運動学による位置制御を行う。制御方法としてはマスタースレイブ制御を

行う。マスタースレイブ制御とは、マスター側の変位情報をもとにスレイブ側を位置制御する一般的な制御手法である。Omega7 を操作して鉗子先端の目標位置を与える。この時、Omega7 の微小変位から逆運動学を用いてロボットアームの姿勢角を決める。また、求めた姿勢角度をロボットアームの目標角度として、各軸のモーターにおいて比例制御により追従制御を行う。位置制御を行った時のマスターである Omega7 とスレイブである鉗子先端の動作の各動作は 7 章の Fig.13, Fig.14 と同様である。

(1) 逆運動学を用いた位置制御実験

7 章では感覚的な制御によってヤコビ行列において使用する変数を定めたことで 3×3 の行列式となった。 3×3 となったヤコビ行列 J' は次式である。

$$J' = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial \theta_1} & \frac{\partial X}{\partial \theta_2} & \frac{\partial X}{\partial \Delta l} \\ \frac{\partial Y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Y}{\partial \Delta l} \\ \frac{\partial Z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Z}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Z}{\partial \Delta l} \end{bmatrix} \quad (33)$$

ヤコビ行列を利用したニュートン法による逆運動学は次式により求めることができる。

(17)式を微小変化とみなすと次式となる。

$$\dot{\theta} = \Delta \theta \quad (34)$$

$$\dot{r} = \Delta r \quad (35)$$

(35), (36)式より目標角度と目標位置は次式となる。

$$\theta_{k+1} = \theta_k + \Delta \theta \quad (36)$$

$$r_{k+1} = r_k + \Delta r \quad (38)$$

ここで、 θ_{k+1} は目標角度、 θ_k は現在角度、 r_k は目標位置、

r_{k+1} は現在位置を表す。

(15), (33)~(38)式より目標角度を求める式は次式となる。

$$\theta_{k+1} = \theta_k + J'^{-1}(r_{k+1} - r) \quad (39)$$

ここで

$$\theta_k = [\theta_{1k}, \theta_{2k}, \Delta l_k]^T \quad (40)$$

$$r_k = [x_k, y_k, z_k]^T \quad (41)$$

$$\mathbf{r}_{k+1} = [x_{ref}, y_{ref}, z_{ref}]^T \quad (42)$$

を表し、 \mathbf{x}_{ref} は鉗子先端の \mathbf{x} の目標位置、 \mathbf{y}_{ref} は鉗子先端の \mathbf{y} の目標位置、 \mathbf{z}_{ref} は鉗子先端の \mathbf{z} の目標位置を表す。

(39)式から逆運動学の解を求めプログラムの構築を行う。

構築したプログラムから実験を行う。

実験条件である初期姿勢を以下に示す。

1. $l+\Delta l=250(\text{mm})$
2. $\theta_4=\pi/3(\text{rad})$
3. $7\pi/18 \geq \theta_1 \geq \pi/9 (\text{rad})$
4. $\pi/6 \geq \theta_2 \geq -\pi/6 (\text{rad})$
5. $2\pi \geq \theta_3 \geq 0 (\text{rad})$

この初期姿勢を示した概略図を Fig.18, Fig.19 に示す。

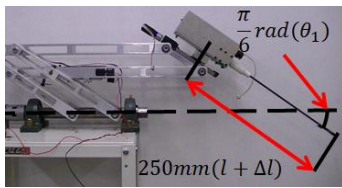


Fig.18 Initial attitude of SPS support robot(side view)

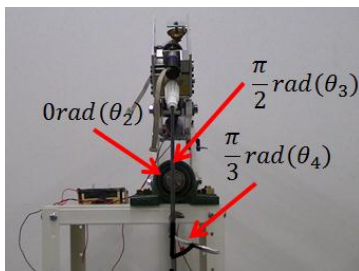


Fig.19 Initial attitude of SPS support robot(Front view)

この初期姿勢から Omega7 を用いて鉗子先端に定めたそれぞれの軸の動作における SPS 支援ロボットの位置制御を行う。実験方法としては初期姿勢から Omega7 を使用して鉗子先端に定めたそれぞれの軸に沿った動作を行い、鉗子先端の位置制御を行う。なお、動作範囲としては鉗子先端の左右の動作は $\pm 30\text{mm}$ 、鉗子先端の奥行き操作は $\pm 15\text{mm}$ 、鉗子先端の上下の操作は $\pm 20\text{mm}$ 動かす。

(2) 実験結果

実験結果を Table 3 に示す。

Table 3 Experimental result2

| Omega.7 による 鉗子先 端の動 作 | 移動 量 (mm) | 実験回数 | | | | | 平均 誤差 (mm) | 誤 差 (%) |
|-----------------------------------|-----------------|----------|--------|--------|--------|--------|------------------|---------------|
| | | 最大誤差(mm) | | | | | | |
| | | 1 回 | 2 回 | 3 回 | 4 回 | 5 回 | | |
| \mathbf{x} | ± 30 | 2 | 1 | 3 | 0 | 1 | 1.4 | 2.3 |
| \mathbf{y} | ± 15 | 3 | 2 | 4 | 2 | 4 | 3 | 10 |
| \mathbf{z} | ± 20 | 3 | 4 | 3 | 2 | 2 | 2.8 | 7 |

実験の結果として、それぞれの動作における位置制御を行った時に最大誤差は 4mm、パーセントとしては 10% ほど誤差が出てしまったが概ね位置制御はうまくいったと言える。特に Omega.7 の各動作における左右の動作、鉗子先端に定めた \mathbf{x} 軸方向に関しては平均誤差が 1.4mm、パーセントとしては 2.3% となり、この動作に関する実験は成功したと言える。また、ロボットアーム及びロボット鉗子の精度を向上させることで誤差を小さくすることができると思われる。

8. 結論

本研究の成果として、1 点目は左手用の SPS 支援ロボットを製作することで両手の操作を可能にした。2 点目は Omega7 を用いてそれぞれの動作における SPS 支援ロボットの位置制御を可能にした。以上 2 点より本研究の目的である SPS 支援ロボットの位置制御を含めた上での試作機の完成することができた。

謝辞：本研究は法政大学大学院工学研究科機械工学専攻、医療・福祉ロボティクス研究室の石井千春教授のご指導のもとで行われた研究である。石井教授には、研究者としての豊富な経験、知識に基づき多くの的確な意見、助言を頂き、あらゆる面で大変お世話になりました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 21 世紀の医療とロボティクス, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.1, pp.1-52 (2000)
- 2) 手術支援ロボット, 日本コンピュータ外科学会誌, Vol.5, No.2, pp.51-64 (2003)
- 3) <http://www.intuitivesurgical.com>
- 4) 柳澤亮, 単孔式腹腔鏡下手術(SPS)用ロボットアームの開発, 2011 年度法政大学理工学部機械工学科卒業論文 (2012)
- 5) 曾我啓史, 単孔式腹腔鏡下手術(SPS)用ロボット鉗子の開発, 2011 年度法政大学理工学部機械工学科卒業論文 (2012)
- 6) H. Kawamura and C. Ishii, Mechacal Analysis of the Formation of Forceps and Scope for Single-port Laparoscopic Surgery, *Surgical Laparoscopy, Endoscopy & Percutaneous Techniques*, Vol.22, No.4, pp.e168-e175 (2012).
- 7) 北中裕 他, 単孔式内視鏡手術のためのマスタースレイブ方式ロボットシステムの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会(2010)
- 8) 早川恭弘, 櫛弘明, 矢野順彦, ロボット工学, コロナ社 (2007)
- 9) 鈴森康一, ロボット機構学, コロナ社 (2004)
- 10) <http://www.forcedimension.com/>