

力覚フィードバック機能を有する単孔式腹腔鏡下手術支援用ロボット“HASROSS”の操作性の評価

OIWA, Katsuaki / 大岩, 克耀

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

67

(発行年 / Year)

2016-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2016-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2015 年度 法政大学

修 士 論 文

力覚フィードバック機能を有する単孔式腹腔鏡下
手術支援用ロボット “HASROSS” の操作性の評価

EVALUATION OF MANEUVERABILITY OF THE HAPTIC
SURGICAL ROBOT FOR SINGLE-PORT SURGERY “HASROSS”

所属：理工学研究科 機械工学専攻

研究室名：医療・福祉ロボティクス研究室

学籍番号 14R1104

ふりがな おおいわ かつあき

氏名 大岩 克耀

指導教授 石井 千春 教授

目次

第 1 章 緒言	5
1-1 研究背景	5
1-2 問題提議	8
1-3 研究目的	9
第 2 章 マスタ・スレイブ制御	10
2-1 マスタデバイス	11
2-2 スレイブデバイス	12
2-3 ソフトウェア	14
第 3 章 運動学	15
3-1 ヤコビ行列	17
3-2 逆運動学	18
第 4 章 位置制御	19
4-1 ニュートン法	19
4-2 モデルとプログラム	21
第 5 章 動作範囲確認実験	25
5-1 実験方法	25
5-2 実験結果	26
第 6 章 ブロック把持移動実験	27
6-1 実験方法	27
6-2 t 検定	28
6-3 実験結果	30
第 7 章 結紮操作実験及びブドウの皮むき実験	32
7-1 結紮操作実験方法	32
7-2 結紮操作実験結果	33
7-3 ブドウの皮むき実験	33
第 8 章 力覚フィードバック機能評価実験	34
8-1 実験方法	34
8-2 実験結果	36
第 9 章 考察	38
第 10 章 結言	39
謝辞	40
参考文献	41
付録 A : ソースコード	43
付録 B : 使用機器仕様	51

モータ	51
センサ	52
付録 C : Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2016)投稿論文	53
付録 D : International Conference on Biomedical Engineering and Technology (ICBET 2016)投稿論文	54

Abstract

In this study, the maneuverability of a haptic surgical robot for single-port surgery (SPS), termed HASROSS, developed in our laboratory is evaluated. The kinematics of the surgical robot was analyzed and a position control method on the basis of inverse kinematics was proposed to control the surgical robot intuitively.

The surgical robot operates under master–slave control implemented by the haptic interface Omega 7 and a force feedback is provided to the operator. We assigned five tasks to the surgical robot and compared its performance against manual operation using commercially available forceps. The first task is block transfer in which the robot grips and moves the block. The robot also performs the Task1 Peg transfer. The second task is a ligating operation using a surgical suture, and the third task is a peeling of grape. The fourth and fifth tasks are contact detection of a soft tennis ball and obstacle avoidance, respectively. These tasks are experimentally performed in manual and robot operations. The maneuverability of the surgical robot is evaluated by comparing these results. The results verified the effectiveness of the HASROSS.

第 1 章 緒言

1-1 研究背景

近年，国内外において，患者の負担が少ない低侵襲手術を行う病院が増えてきている．内視鏡下で行われる低侵襲手術では，限定された空間・視野内で繊細な手術操作を達成することが求められる．このため，手術を行う医師には高度な技術が必要とされる．

腹部を対象として行う一般的な内視鏡手術を，多孔式腹腔鏡下手術と呼ぶ．この手術では，体表面に複数の孔を開け鉗子・腹腔鏡を挿入する．これに対し，臍上に一箇所だけ孔を開け，手術器具をまとめて挿入して行う手術を単孔式腹腔鏡下手術 (Single Port Surgery : SPS)と呼ぶ．現在では，SPS の術式や具体的な症例などについて，報告が急速に増加している．河内らは泌尿器科領域について SPS の術式および手術成績を示している．SPS は傷口が少なくなることから，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，切開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．しかし，SPS のデメリットとして腹腔内で 2 本の鉗子が交差するため，術者の手元の鉗子と腹腔鏡を介して見た鉗子先端の左右が入れ替わり，手術の難度を高める一因になっていることが挙げられる．下に，SPS の図を示す．

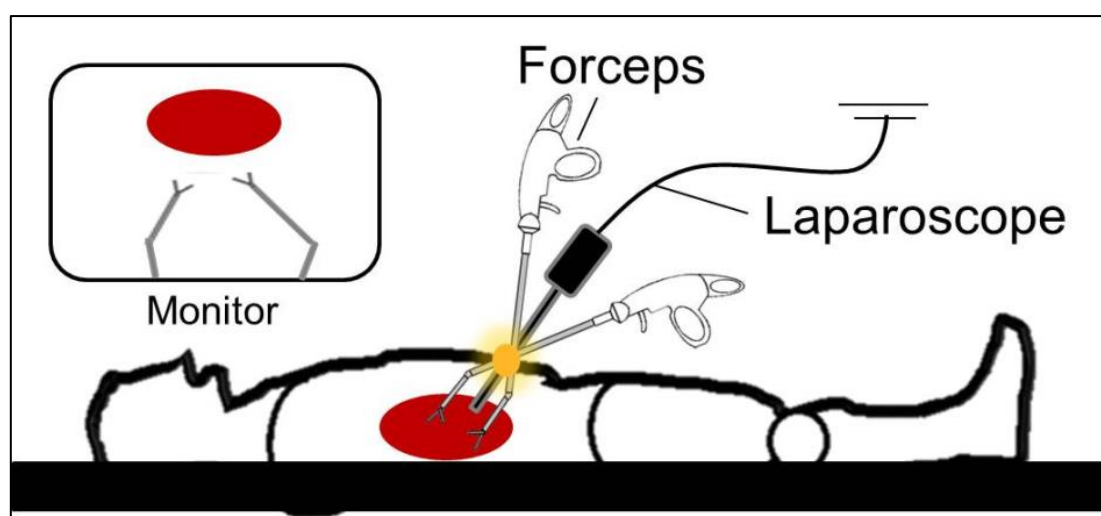


図 1-1 単孔式腹腔鏡下手術

Fig.1-1 Single Port Surgery

一方，低侵襲手術の安全性・操作性の向上のため，術者の操作によってロボットが手術を行うマスタ・スレイブ型手術支援ロボットの開発やその有効性が報告されている．多孔式腹腔鏡下手術においては，手術支援ロボット da Vinci が臨床に使用されている．SPS に対しても様々な SPS 支援用ロボットの開発が行われている．da Vinci は SPS 用鉗子の FDA(アメリカ食品医薬品局)の承認を取得している．

図 1-2 に単孔式腹腔鏡下手術ロボットの da Vinci system を示す. 図 1-3 は Titan Medical 社が開発した単孔式腹腔鏡下手術ロボットの SPORT™ Surgical System である. 関口らはフレキシブルシャフトを採用した SPS 支援用マニピュレータを開発し, その屈曲動作における応答性の評価をした[3]. さらに Jienan Ding らは, 独自の機構を提案し運動学, 力学解析および評価実験により SPS 支援用ロボットの有用性が報告している[4]. また伴野らは SPS における術中の視点・視野の操作機能を有する内視鏡マニピュレータを開発し, 動作検証を行った[5]. ロボットシステムを用いた低侵襲手術では, 視覚情報のみを用いて手術を行わなければならない. したがって, 低侵襲外科手術の安全性・操作性の向上のため, 術者に力覚をフィードバックできるロボット鉗子の開発が急務となっている. 一方, 著者らは独自に開発した力覚フィードバック可能な SPS 支援用ロボット HASROSS(Haptic Surgical Robot for Single-port Surgery)に対して, SPS 支援ロボットの操作性向上のため, 術者が直観的に操作できるマスタ・スレイブ方式の位置追従制御系を提案している.



図 1-2 da Vinci Sp Single Port Robotic Surgical System (Intuitive Surgical Inc.)
Fig.1-2 da Vinci Sp Single Port Robotic Surgical System (Intuitive Surgical Inc.)



☒ 1-3 SPORT™ Surgical System (Titan Medical Inc.)
 Fig.1-3 SPORT™ Surgical System (Titan Medical Inc.)

1-2 問題提議

腹腔鏡下手術において、術者は腹腔鏡で撮影された鉗子先端を注視しながら手術を行う。この際、SPS においては術者の手元と腹腔鏡を介して見た鉗子先端の左右が入れ替わるため、鉗子の操作が困難である。この欠点を補うために、先行研究では左側の支援用ロボットの鉗子先端を右手側の遠隔操作用マスタデバイスの操作に追従させ、右側の支援用ロボットの鉗子先端を左手側の遠隔操作用マスタデバイスの操作に追従させた。これにより、従来の多孔式腹腔鏡下手術のように左右の操作の対応が等しくなるので、鉗子の直観的な操作が可能となり、ロボットの操作性向上が期待できる。

さらに支援用ロボットは、鉗子根本部に穴の開いた 6 軸力覚センサが装着されており、そのセンサにより軸にかかる負荷が検出可能である。また検出した力覚情報を操作者にフィードバックするシステムも構築している。このシステムを本論文では力覚フィードバック(Feed Back : FB)機能とよぶ。

しかし、独自に開発した SPS 支援用ロボット HASROSS は操作性及び力覚 FB 機能の有用性の評価が行われていない。そこで本研究では SPS 支援用ロボット HASROSS の実用化に向けて、より実践に近いタスクを行い、SPS 支援用ロボット HASROSS について有用性の評価を行う。

1-3 研究目的

本研究では、開発した SPS 支援用ロボット HASROSS の有用性の評価を目的とする。SPS 支援用ロボット HASROSS の有用性を評価するため、支援用ロボットと市販されている SPS 用鉗子の可動範囲をそれぞれ比較したのち、5 つのタスクを行った。1 つ目のタスク内容は、Vassiliou らや Derossis らの Task1 Peg transfer に基づき、ブロックを把持してから移動させるタスクである。2 つ目のタスクは手術用の縫合糸を用いた結紮作業であり、3 つ目はブドウの皮むき作業である。さらに、4 つ目と 5 つ目は力覚 FB を伴う環境下で行う、鉗子先端の接触判定と障害物回避である。

これらのタスクを手動による鉗子操作と、開発した SPS 支援用ロボット HASROSS を用いて著者が提案した位置追従制御系により操作する実験を行い、これらを比較することにより SPS 支援用ロボット HASROSS の操作性、ならびに力覚 FB 機能の有用性の評価を行う。

第2章 マスタ・スレイブ制御

先行研究では独自に開発された SPS 支援用ロボット HASROSS を対象とし, 逆運動学解析を用いて, Omega.7 の操作方向に鉗子先端の位置を追従させるマスタ・スレイブ制御を実現した. マスタスレイブシステムとは, マスター(Master: 主人)とスレイブ(Slave: 奴隷)が語源となっており, マスターの動きと同じようにスレイブが動くという遠隔操作のことである. 本研究では Omega7 から得た情報をコンピュータに通し, SPS 支援用ロボット HASROSS を操縦する.

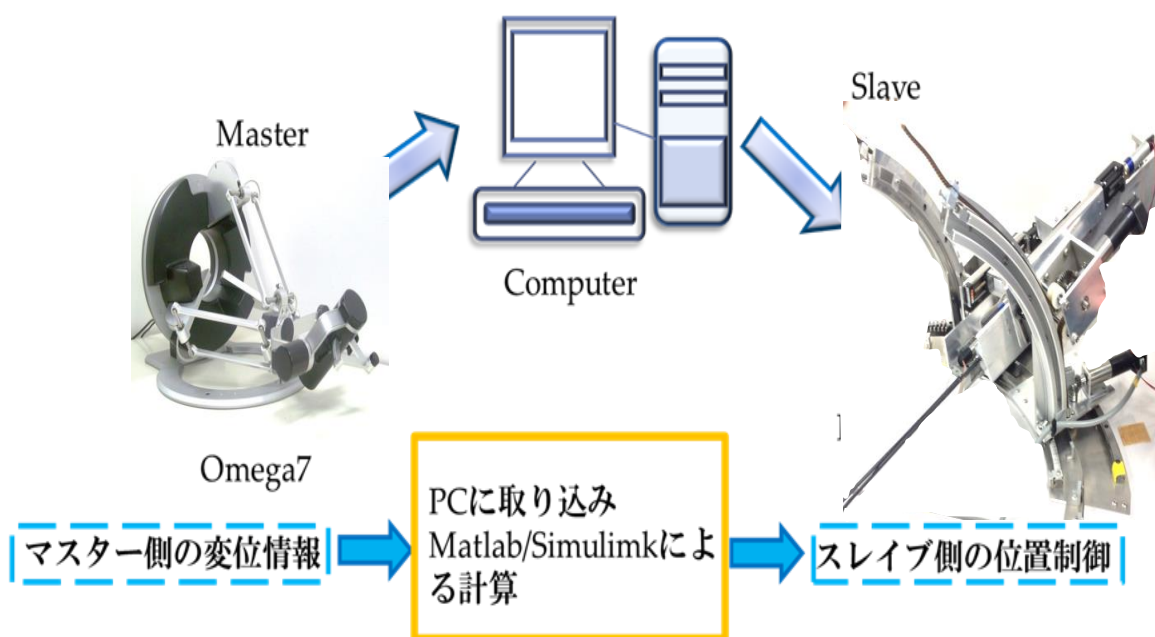


図 2-1 マスタ・スレイブ制御

Fig.2-1 Master-slave

2-1 マスタデバイス

図 2-2 に Force Dimension 社製の力覚フィードバックデバイスである Omega.7 とその操作可能な方向を示す。Omega.7 は、並進 3 自由度と 3 軸回転、1 軸把持の合計 7 自由度の操作ができ、そのうち並進 3 自由度と 1 軸把持の力覚提示が可能である。優れた方向検出、位置精度や微妙な力覚提示が可能なることから、精密な動きが必要とされる手術支援用ロボットなどのマスタデバイスとして用いられている。

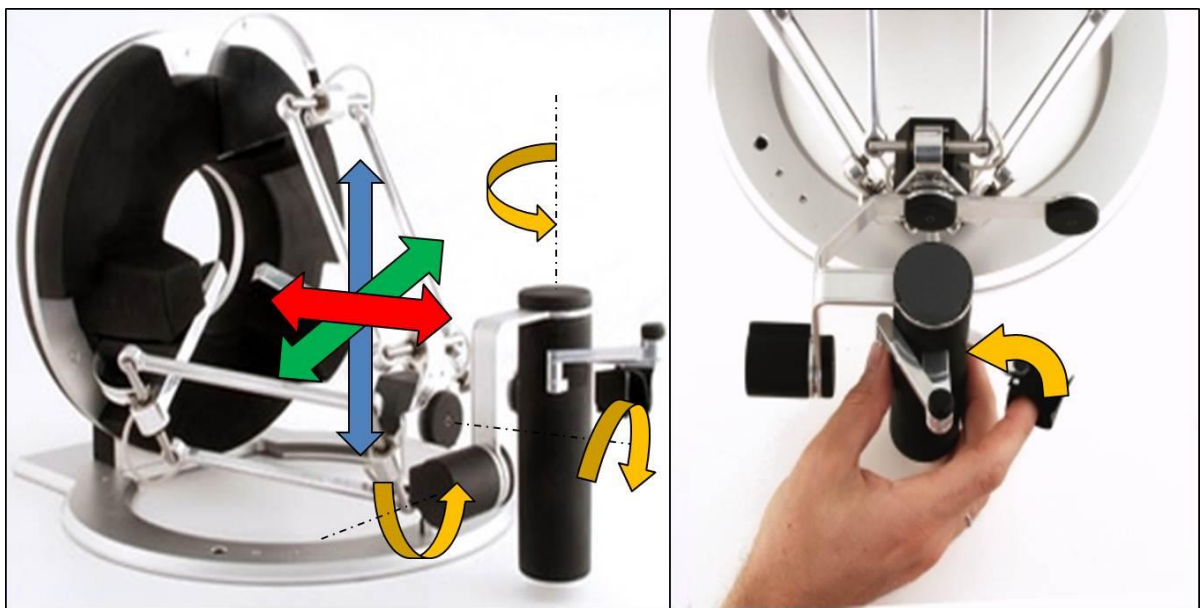


図 2-2 Omega.7 と操作方向
Fig.2-2 Overview of Omega.7

2-2 スレイブデバイス

本研究において使用する SPS 支援用ロボット HASROSS は，モータ駆動により，水平面内で旋回運動するヨー動作と，上下方向に旋回運動するピッチ動作，侵襲方向へ直進運動するトランスレーション動作の 3 自由度の運動機構を持つ．ヨー動作及びピッチ動作は曲線ガイドレール上を鉗子マニピュレータが移動する機構であり，レールに並行した曲面上にタイミングベルトを固定し，駆動部側の歯付きプーリを回転させることでレール上の移動を行う．トランスレーション動作には，ボールねじによって回転運動を直線運動に変換する直動アクチュエータを用いた．曲線ガイド及び直動アクチュエータには，THK 社製 LM ガイドシリーズを用いている．使用したモータは FAULHABER 社製の DC マイクロモータである．スペックについては参考文献[6]に示す．

図 2-3 に SPS 支援用ロボット HASROSS の全体図を示す．

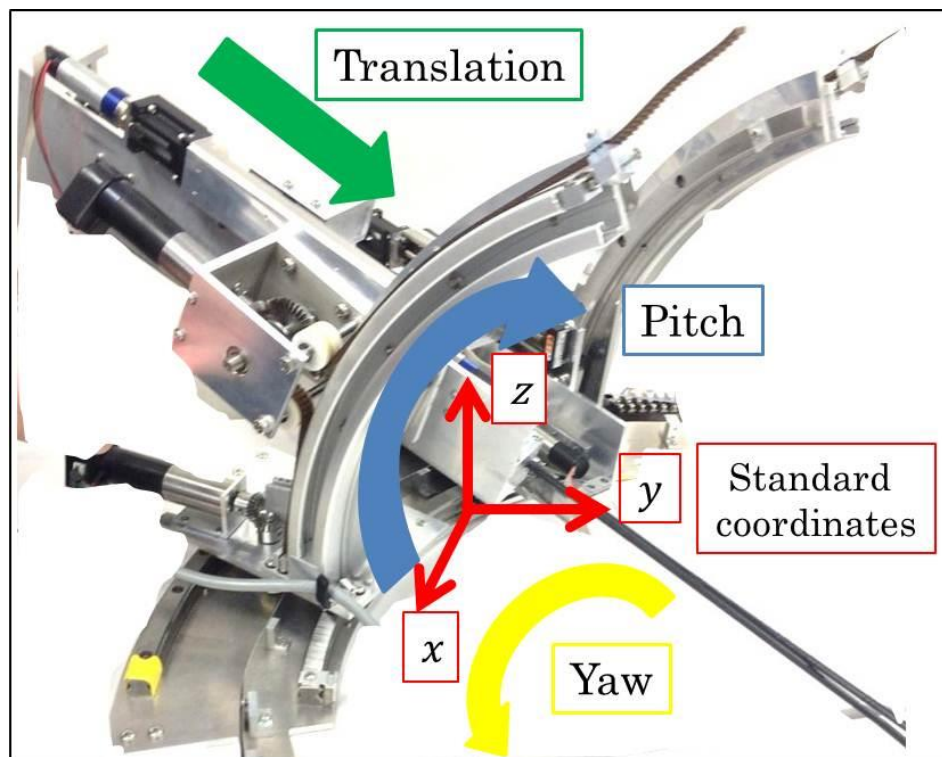


図 2-3 SPS 用支援ロボット

Fig.2-3 Overview of the SPS surgical robot HASROSS

さらに、本研究において使用する SPS 支援用ロボット HASROSS は、力覚 FB 機能を有している。図 2-4 に示すように支援用ロボットの鉗子マニピュレータ根本部に 6 軸力覚センサを装着することによって、鉗子の軸にかかる負荷を検出することが可能である。本研究では検出したセンサの値を基に、マスタデバイスである Omega.7 を介して操作者に力覚提示を行う。

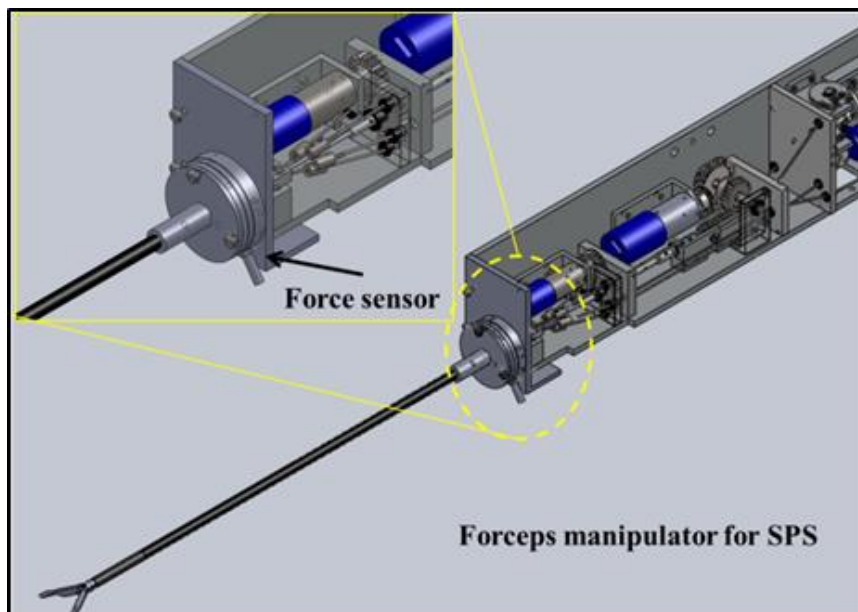


図 2-4 鉗子マニピュレータ

Fig.2-4 Forceps manipulator for SPS with force sensor

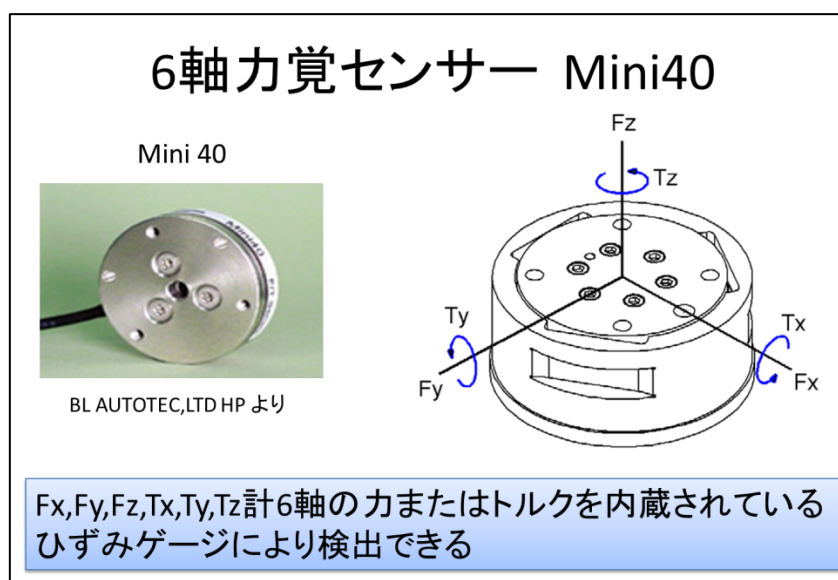


図 2-5 6 軸力覚センサ

Fig.2-5 6-axis force sensor

2-3 ソフトウェア

実験の際には数値計算ソフト MATLAB/Simulink を用いてプログラムを作成した. MATLAB/Simulink は MathWorks 社が開発している数値解析ソフトウェアであり, MATLAB は工学分野や科学分野などの様々なデータ解析, シミュレーションなどにおける行列計算, ベクトル演算, グラフ化などが可能である. Simulink はブロック線図を用いたシステムを構築するソフトウェアであり, Simulink におけるインターフェイスはブロックダイアグラムツールとブロックライブラリから成り, 視覚的にシステムを構築できるため, 熟練したプログラム言語を必要としない. また, 既存のブロックだけでなく, MATLAB で作成したプログラムや C 言語, Fortran, BASIC 言語などで作成したプログラムをブロックとして Simulink のブロック線図に加えることができる.

PC を介して入出力を行うインタフェースボードには INTECO 社製デジタルコントローラ PCIA04 を使用し, モータアンプには QUANSER 社製 VoltPAQ-X4 を用いた.

第3章 運動学

本研究における配置モデルと各変数設定を図 3-1 にまとめた。

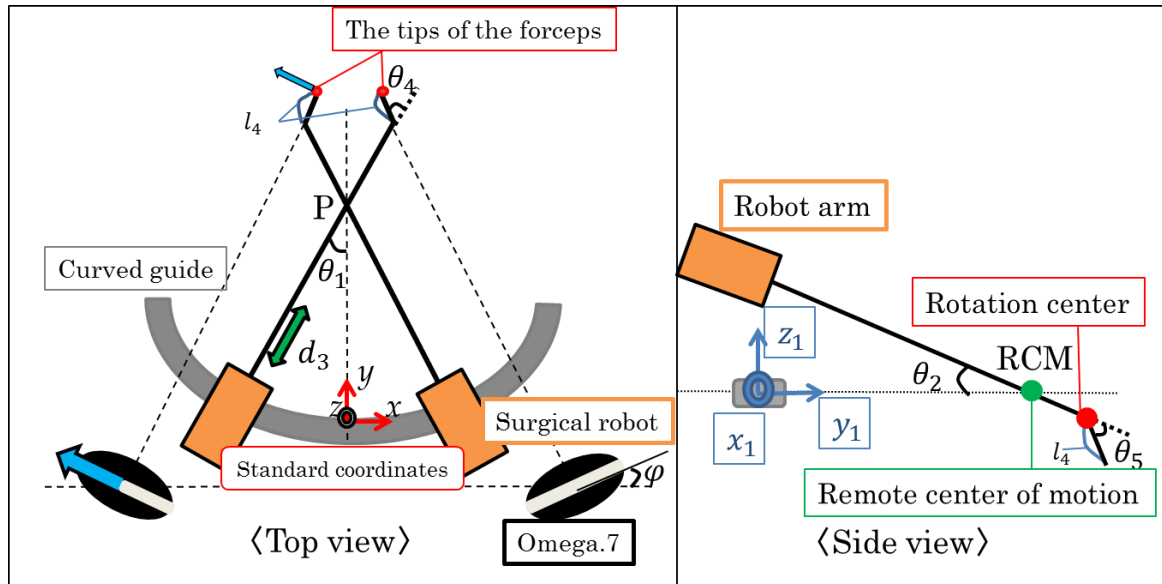


図 3-1 ロボットアームおよび Omega.7 の配置
Fig.3-1 Placement of robot arms and Omega.7s

左図は上から見た図であり、右図は横から見た図である。

写真の青矢印のように、マスタデバイスを左に変位させた時、ロボットアームの鉗子先端も同じように左へ追従することが理想である。左側の支援用ロボットの鉗子先端を右手側の遠隔操作用マスタデバイスの操作に追従させ、右側の支援用ロボットの鉗子先端を左手側の遠隔操作用マスタデバイスの操作に追従させる。これにより、従来の多孔式腹腔鏡下手術のように左右の操作の対応が等しくなるので、鉗子の直観的な操作が可能となり、ロボットの操作性向上が期待できる。

先行研究では直観的に操作できるマスタ・スレイブ方式の位置追従制御系を構築するために、ニュートン法を用いて逆運動学解を求めた。

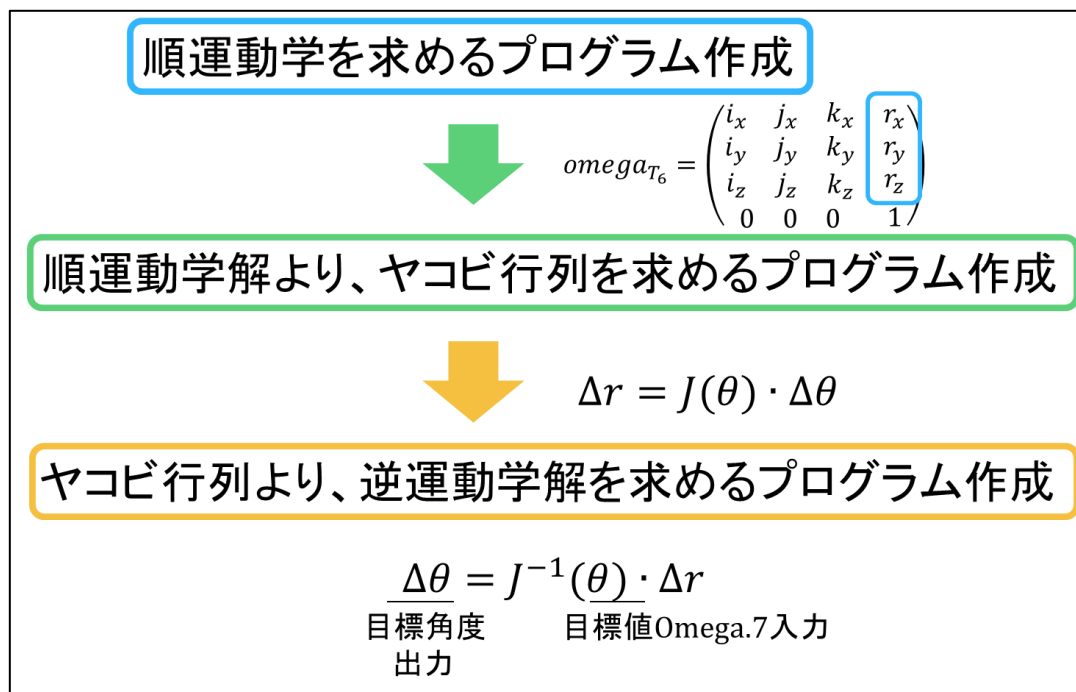


図 3-2 逆運動学
Fig.3-2 Inverse kinematics

また上図のように大きく分けて3つのプロセスを踏んで，逆運動学解を求めた．順運動学など詳細については参考文献[7]に示されている．

3-1 ヤコビ行列

ヤコビ行列とは、各関節角度の角速度と、先端位置の速度の関係を表す行列である。関係式は

$$\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{J} \cdot \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (1)$$

と表せる。本研究では微分項を微小変位と捉え、

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{J} \cdot \Delta \boldsymbol{\theta} \quad (2)$$

と表す。ここで $\Delta \mathbf{r}$ は先端位置の微小変位、 \mathbf{J} はヤコビ行列、 $\Delta \boldsymbol{\theta}$ は回転角度の微小変位である。

また、 \mathbf{J} はヤコビ行列と呼ばれる。本研究で対象としているロボットアームの場合、 θ_1, θ_2, d_3 が変数となり、 θ_4, θ_5 は一定である。したがって、 θ_4, θ_5 は微小時間において変動しないため、次式が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta d_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

このとき、ヤコビ行列は次式で与えられる。

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x}{\partial d_3} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y}{\partial d_3} \\ \frac{\partial z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial z}{\partial \theta_2} & \frac{\partial z}{\partial d_3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

(3)式からヤコビ行列 \mathbf{J} は正方行列であることがわかる。また θ_4, θ_5 は変化しないため、(4)式のヤコビ行列 \mathbf{J} は θ_4, θ_5 による偏微分の成分がない。

3-2 逆運動学

ロボットアーム先端位置からロボットアームの各関節角度を求める問題を逆運動学という。逆運動学を求めるために、以下のアルゴリズムを使用する。(3)式より、次式が成り立つ。

$$\Delta\theta = J^{-1}\Delta r \quad (5)$$

鉗子先端の現在位置，1 ステップ前の位置をそれぞれ r_{new} ， r_{old} と表し，更新角度，現在角度をそれぞれ θ_{new} ， θ_{old} と表す。このとき，(5)式を用いると，ニュートン法より，次式が求まる。

$$\begin{aligned} \theta_{new} &= \theta_{old} + \Delta\theta \\ &= \theta_{old} + J^{-1}\Delta r \\ &= \theta_{old} + J^{-1}(r_{new} - r_{old}) \end{aligned} \quad (6)$$

現在角度 θ_{old} はモータに取り付けたエンコーダ，現在位置および 1 ステップ前の位置 r_{new}, r_{old} は入力デバイスにより検出される。よって，更新角度 θ_{new} ，すなわち逆運動学の解が得られる。このように，ニュートン法を用いた逆運動学解析によってサンプリング時間ごとにロボットアームの関節が達成すべき角度が与えられるので，これを目標角度として関節角度の追従制御を行うことにより，鉗子先端の位置制御を達成することができる。

詳細については参考文献[6]に示されている。

第4章 位置制御

4-1 ニュートン法

改めてニュートン法について述べる。

ニュートン法とは非線形の連立方程式の数値解法の一つである。ニュートン法の他に逐次代入法というものがあるが、より収束が速い方法としてヤコビ行列を利用したニュートン法が知られている。

本研究対象の場合、変位する角度つまり駆動可能方向は Yaw 方向, Pitch 方向, Translation の3つである。そのため(6)式は以下のように示せる。

$$\begin{bmatrix} \theta_1(k+1) \\ \theta_2(k+1) \\ d_3(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1(k) \\ \theta_2(k) \\ d_3(k) \end{bmatrix} + J^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで、括弧内の k は k 番目の繰り返し計算の結果であることを示す。

$[\theta_1(k+1) \ \theta_2(k+1) \ d_3(k+1)]^T$ は k 番目の結果を利用して $k+1$ 番目の値を求める際の修正量と考えれば分かりやすい。

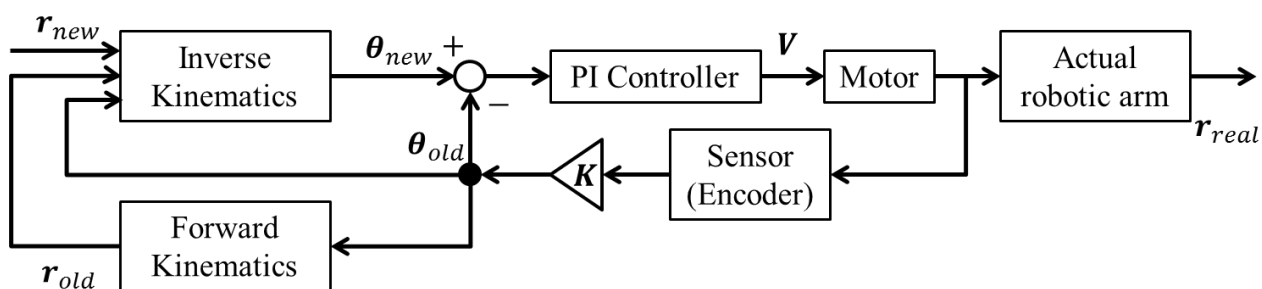
(7)式を左の項から順に説明する。

$[\theta_1(k+1) \ \theta_2(k+1) \ d_3(k+1)]^T$ は、次ステップに達成されるべき更新角度（変位）である。 $\theta_1(k+1)$, $\theta_2(k+1)$ は Yaw 角, Pitch 角に対しての、次ステップに達成されるべき更新角度である。 $d_3(k+1)$ は Translation に対しての、次ステップに達成されるべき更新変位である。Translation は直線運動をするため角度ではなく、変位と表記する。

$[\theta_1(k) \ \theta_2(k) \ d_3(k)]^T$ は、現在角度である。現在角度はエンコーダより算出できるため既知の値となる。また J^{-1} はヤコビ行列の逆行列である。

$[x \ y \ z]^T$ は、マスタデバイスから得られる目標位置である。この目標位置に追従するように角度が更新される。従って、右辺がすべて入力され既知であるために、左辺つまり目標値が求まる。

このように，ニュートン法を用いた逆運動学解析によってサンプリング時間ごとにロボットアームの関節が達成すべき角度が与えられるので，これを目標角度として関節角度の追従制御を行うことにより，鉗子先端の位置制御を達成することができる．また，各モータ軸先の回転角度に対してPI制御を行っている．従って，ブロック線図は以下のようになる．



V : Operating voltage

K : Conversion from motor angle to arm angle

r_{real} : Actual position of the tip of forceps manipulator

図 4-1 位置追従制御系のブロック線図

Fig.4-1 Block diagram of position tracking control

4-2 モデルとプログラム

左右のロボットアームを制御するため作成した Simulink モデリングを下図に示す。
また左右のロボットアームを制御するモデリングは同じであり、ブロック内のパラメータと MATLAB で作成したプログラムが左右で異なっている。

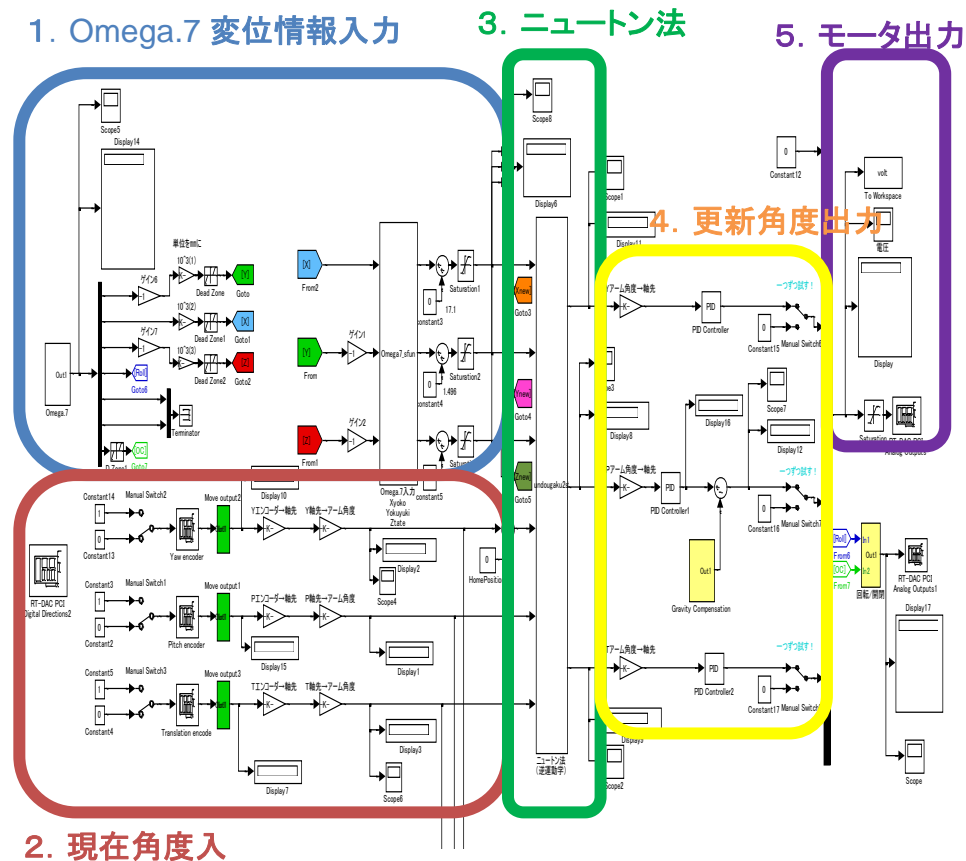


図 4-2 Simulink モデリング
Fig.4-2 Overview of the block diagram

図に示す通り、本研究で使用したプログラムは主に 5 つの部分で構成されている。

1. Omega.7 の変位情報が入力される部分
2. モータからの現在角度が入力される部分
3. ニュートン法で数値解を算出する部分
4. 各モータの更新角度を出力する部分
5. モータへ出力する部分

4-2-1 ニュートン法で数値解を算出するプログラム

ニュートン法で数値解を算出するために，S-function ファイルを用いた．

再度，ニュートン法の(7)式を示す．

$$\begin{bmatrix} \theta_1(k+1) \\ \theta_2(k+1) \\ d_3(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1(k) \\ \theta_2(k) \\ d_3(k) \end{bmatrix} + J^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (7)$$

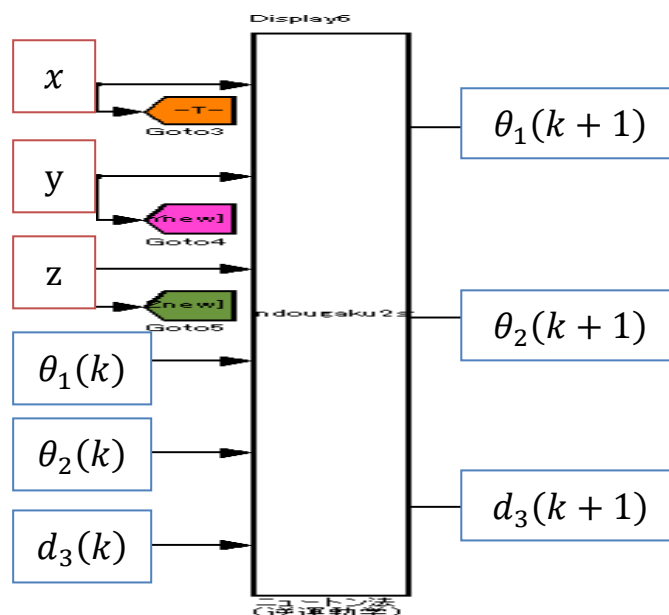


図 4-3 入力部の Simulink モデリング

Fig.4-3 Detection part of the input

マスタデバイスから入力される x ， y ， z の目標値と，スレイブロボットのエンコーダから算出されるアーム現在角度 $\theta_1(k)$ ， $\theta_2(k)$ ， $d_3(k)$ が入力値である．

(プログラムを付録にまとめた)

4-2-2 各モータの更新角度を出力するプログラム

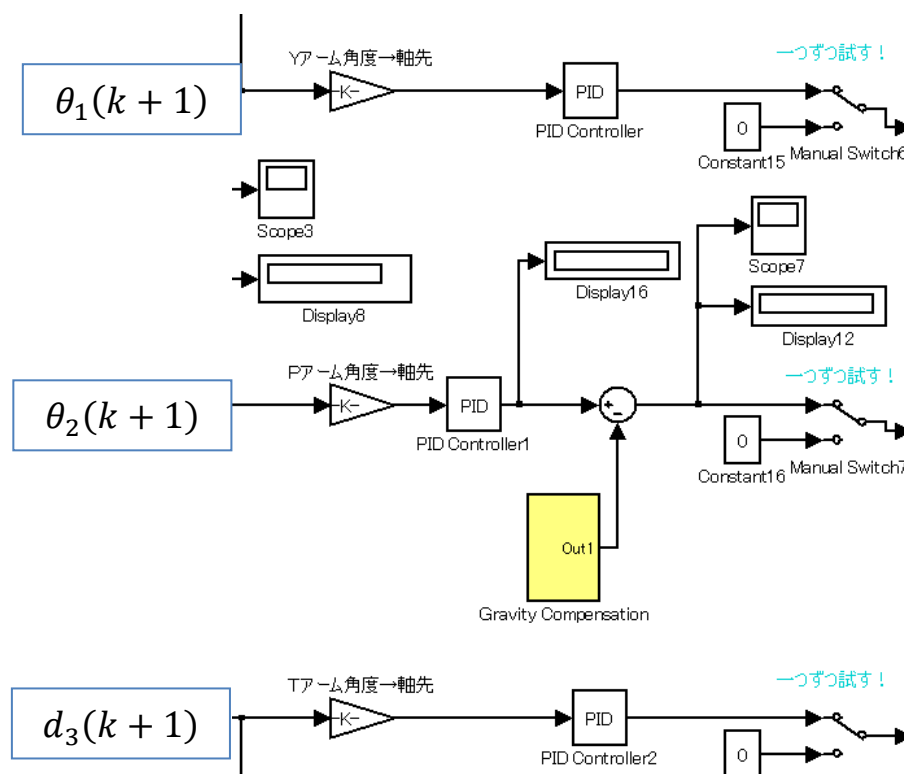


図 4-4 アーム角度計算の Simulink モデリング

Fig.4-4 Detection and calculation part of the actual arm angles

各モータの更新角度を出力するプログラムを示す。

ゲインは算出された Yaw, Pitch, Translation の各アーム角度をモータ軸先の角度に変換する。

モータ軸先の回転角度に対して PI 制御を行っている。

また Pitch に関しては重力補償プログラムを導入している。詳細は参考文献[9]に示されている。

4-2-3 各モータの更新角度を出力するプログラム
モータへの出力を行うプログラムである。

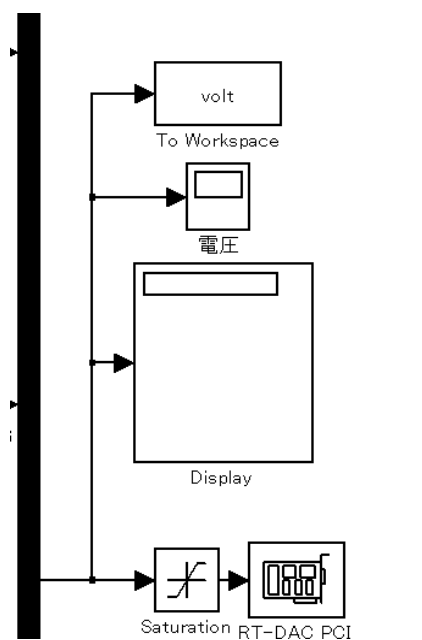


図 4-5 モータ出力の Simulink モデリング
Fig.4-5 Detection part of the motor output

RT-DAC PCI ブロックは PCI ボードに付属されていたものであり，指定したチャンネルへ入力される値に応じた電圧を加えることが可能である．本研究では外部アンプによって PCI ボードからの電圧を昇圧して利用した．実装される DC モータの耐用電圧は 12V であるため，Saturation ブロックで $\pm 10V$ の制限をかけた．

第 5 章 動作範囲確認実験

5-1 実験方法

始めに，使用する SPS 支援用ロボット HASROSS および市販されている COVIDIEN 社製 SPS 用鉗子において，それぞれの鉗子先端部の動作範囲を比較するため，鉗子先端部の動作範囲を計測する実験を行う．

また COVIDIEN 社製 SPS 用鉗子は，オペレーティングインスツルメント SILS ダイセクト 36CM を用いた．

本実験では，鉗子 2 本と内視鏡カメラに見立てたアルミ棒の計 3 本を，COVIDIEN 社製の SILS ポートにクロスして挿入する．それぞれ干渉しないように固定し，3 本中 2 本を固定して 1 本を自由に動かし，その先端部にペンを装着して，最大可動範囲の軌跡を方眼用紙に描く．これを支援用ロボットと市販の SPS 用鉗子においてそれぞれ 3 本ずつ同様に行う．また，図 5-1 に示すように SILS ポートから方眼用紙までの距離は 15cm とした．

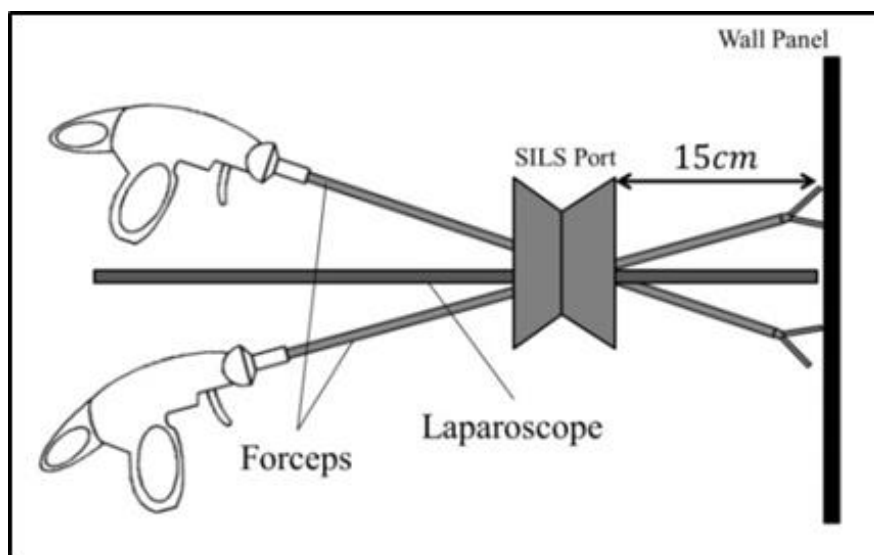


図 5-1 動作範囲確認実験

Fig.5-1 Schematic of the operating range experiment

5-2 実験結果

描かれた軌跡を基に，方眼用紙の目盛から最大可動範囲の面積を求めた．支援用ロボットと市販の SPS 用鉗子を手動によって操作したときの鉗子と内視鏡(アルミ棒)の各面積を表 5-1 に示す．ここで，Forceps A は右手で操作する鉗子，Forceps B は左手で操作する鉗子である．

表 5-1 動作範囲結果

Table5-1 Measured motion space

	Robot operation [mm ²]	Manual operation [mm ²]
Forceps A	8189	13000
Forceps B	5670	16375
Laparoscope	7419	11520
TOTAL	21278	40895

手動による SPS 用鉗子による鉗子操作は，支援用ロボットによる鉗子操作よりも，全ての器具において，最大可動範囲が上回り，支援用ロボットによる合計の動作範囲は手動操作による動作範囲の約半分程度であった．これは，支援用ロボットにはロボット同士の干渉を避けるための動作制限や，曲線ガイドの動作領域に制限があるためである．

また，本実験で得られた手動操作による最大可動範囲は，制限のない状態で鉗子を最大限に操作したものであるので，実際の手術における腹腔内での最大可動範囲は，求まった値より小さくなると考えられる．

第 6 章 ブロック把持移動実験

6-1 実験方法

SPS 支援用ロボット HASROSS の操作性を評価するため、手技トレーニングで一般的に用いられるブロックの把持移動タスクを支援用ロボットと手動操作で遂行し、比較・評価する。被験者は 23 歳の健常男性 1 名であり、医療従事者ではないが、鉗子操作には十分慣れている。また COVIDIEN 社製 SPS 用鉗子は、オペレーティングインストルメント SILS ダイセクト 36CM を用いた。

本実験では、VTi medical 社製の Dexterity Block を用いてブロックの把持移動実験を行った。被験者は、Web カメラによる映像を見ながら、右側に置いてあるブロックを右鉗子で把持し、空中で左鉗子に持ち替え、左側に置き直す。3 つのブロックを移し替える作業を 1 回分のタスクとし、タスク遂行時間を計測した。また、1 回のタスク完了後、ブロックの移動方向を変更する。たとえば、右側から左側に 3 つのブロックを移し替えた場合、次のタスクでは左側から右側へ 3 つのブロックを移し替える。支援用ロボットによる操作および手動操作に対して、それぞれタスクを 10 回施行した。図 6-1 にブロック把持移動実験の外観を示す。

本実験では t 検定により、統計学的に客観的評価を行った。他にもメンタルワークロードの主観的評価を行う場合には、アメリカ航空宇宙局（NASA）が開発した NASA-TLX や SWAT などが存在する。

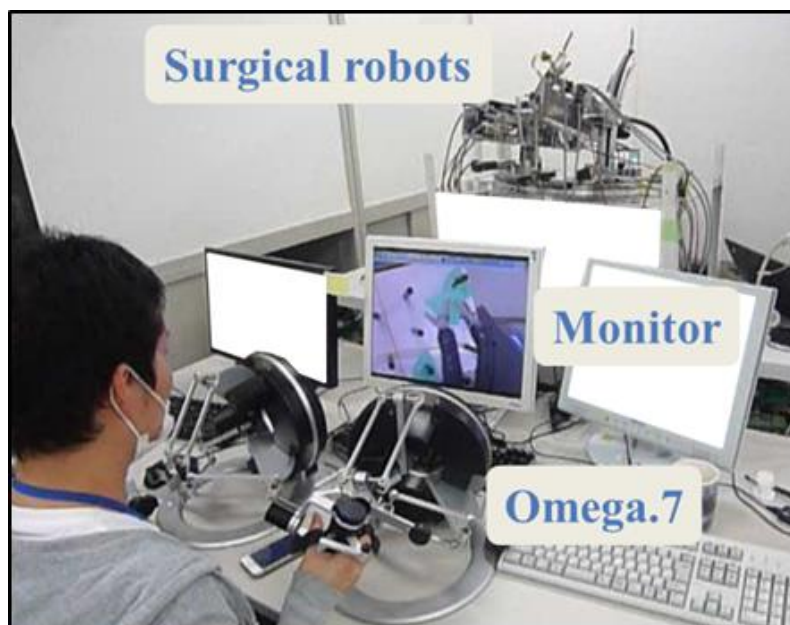


図 6-1 ブロック把持移動

Fig.6-1 Setup of the block transfer experiment

ただし、同等な操作環境条件の下で比較を行うため、手動による鉗子操作を行う場合は、ロボットの最大可動範囲に合わせたゲージを設けて動作範囲を制限し、その範囲内でブロック把持移動タスクを遂行した。

また本実験では、手動の鉗子の屈曲角度(θ_4)は 30° で固定し、支援用ロボットの鉗子の屈曲角度(θ_4)は、右鉗子は 30° 、左鉗子は手元の操作に応じて任意に屈曲させる。鉗子の操作軸とブロックボードの操作面における入射角度は $50^\circ \sim 60^\circ$ とする。なお、本実験においては支援用ロボットにおいて力覚フィードバック機能を用いていない。

得られたデータを解析し、SPS 支援用ロボット HASROSS の操作性の評価を行った。

6-2 t 検定

t 検定とは、統計的有意差検定の手法として一般的に用いられるものであり、2 つの標本（データ）の平均値の差がある場合に、母集団（調査対象の全体）においても、その差があるか否かを推定する。たとえば、新しい飲み薬を開発した際、従来の飲み薬より効果があるかどうか、統計的に決定するときに t 検定が用いられる。本実験の場合、支援用ロボットと手動で行った実験で得られた標本（データ）から、支援用ロボットと手動で操作した場合のタスク完了時間に差が生じるかを推定するものである。

この際、「2 つのタスク完了時間に差がない」という仮説を立てて、その「2 つのタスク完了時間に差がない」確率が低い場合に、「2 つのタスク完了時間に差がある」と判断する論法である。この確率を p 値と呼び、実験で得られた標本（データ）から計算可能である。

p 値は有意確率のことで、標本が示す結果が、母集団に差がない場合に生じる確率である。また、慣例的に p 値を 0.05 に設定し、p 値が 0.05 未満を有意とした。つまり、実験で得られた標本（データ）に対して t 検定を行い、求めた p 値の結果が $p < 0.05$ であれば、支援用ロボットと手動で操作した場合のタスク完了時間に平均値差があると判断する。また、検定する 2 つの標本（データ）があらかじめ偏りが明らかな場合は片側検定、不明な場合は両側検定を用いるため、今回は両側検定を行った。

t 検定で用いられる t 値は次式で与えられる。

$$t = \frac{D_{ave}}{D_{sd}/\sqrt{n}} \quad (n = 10) \quad (8)$$

ここで、 n は標本（データ）数を表し、標準偏差 D_{sd} は次式で与えられる。

$$D_{sd} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (D(k) - D_{ave})^2}{n-1}} \quad (n=10) \quad (9)$$

ただし、 $D(k)$ は2群データにおけるタイムスコアの差であり、 D_{ave} はその平均値を示す。
このとき、2群データとは、ロボット操作による実験で得たデータと、手動操作による実験で得たデータを指す。

また、 p 値は次式で与えられる。

$$p = \int_{-\infty}^{-t} f(t)dt + \int_t^{\infty} f(t)dt \quad (10)$$

ただし、

$$f(t) = \frac{\Gamma((n+1)/2)}{\sqrt{n\pi}\Gamma(n/2)} \left(1 + \frac{t^2}{n}\right)^{-\frac{n+1}{2}} \quad (11)$$

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} u^{x-1} e^{-u} du \quad (12)$$

ここで、 $f(t)$ はt分布といい、 $\Gamma(x)$ はガンマ関数である。また、 u は積分変数、 $x > 0$ である。
(8)式で表されたt値が、自由度($n-1$)の時のt分布で生じる確率(p 値)が5%未満($p < 0.05$)の時に有意差有り、つまり、2群データの平均値に差があると判断する。

6-3 実験結果

実験結果を表 6-1 に示す.

表 6-1 ブロック把持移動結果

Table6-1 Results of block transferring experiment

		Robot operation	Manual operation
Count	1	1:33	2:08
	2	1:25	1:34
	3	1:08	1:56
	4	1:10	1:57
	5	1:23	1:10
	6	1:12	1:18
	7	0:52	1:02
	8	1:13	1:00
	9	0:52	1:14
	10	0:58	1:06
Average		1:10	1:26

ロボット操作と手動操作における，タスク完了時間および平均タスク完了時間をタイムスコアとして可視化したものを図 6-2 に示す. 図 6-2 における青および赤色の棒線は平均タスク完了時間を表し，黒色の細線は最も早いタスク完了時間と最も遅いタスク完了時間を表す.

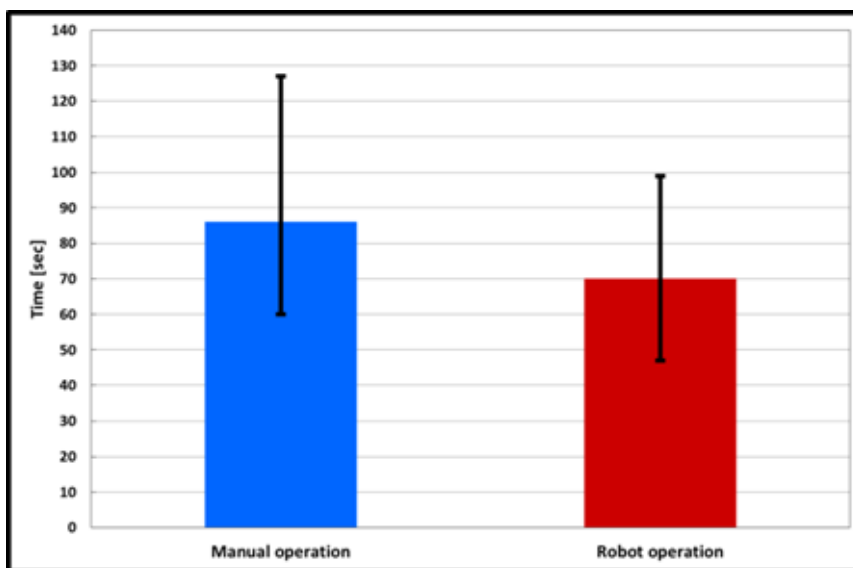


図 6-2 所要時間

Fig.6-2 Time required for the block transfer task

実験結果から、平均タスク完了時間は、ロボット操作では 70 秒、手動操作では 86 秒となり、手動操作よりロボット操作の方が、平均タスク完了時間が短縮された。また、タスク完了時間に関する t 検定の結果、p 値は 0.0472 となり、p 値が 0.05 未満となるため、統計的に有意差があると判断された。これより、2 つの標本の平均の差が偶然誤差の範囲内にならないことが示された。

さらに、施行毎のタスク完了時間を施行順にプロットし、操作の習得を表すラーニングカーブを作成したところ図 6-3 のようになった。

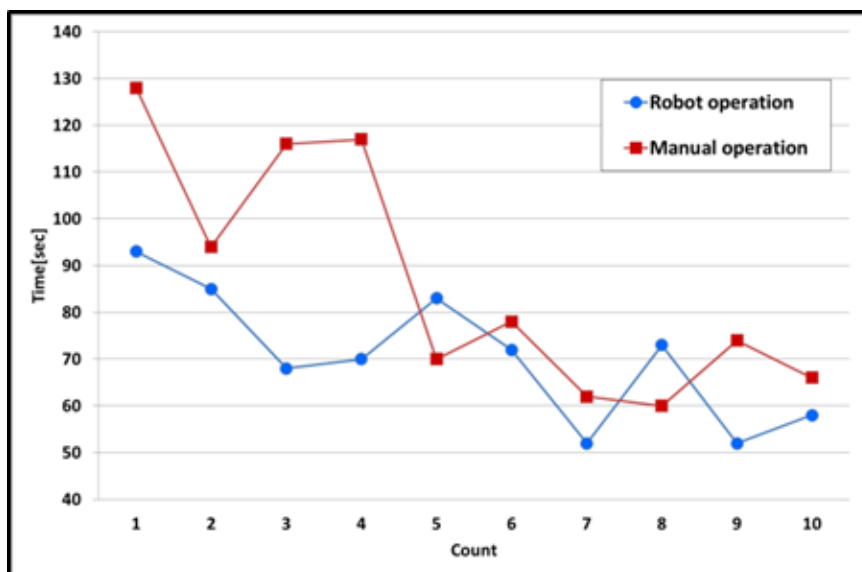


図 6-3 ラーニングカーブ

Fig.6-3 Learning curve in the block transfer experiment

図 6-3 のラーニングカーブより、ロボット操作と手動操作のどちらにおいても、10 回目のタスク完了時間が 1 回目比べて短縮され、施行を重ねることにより操作が上達していると言える。また、5 回目と 8 回目を除いてロボット操作の方が手動操作よりもタスク完了時間が短かった。

これは手動操作においては鉗子先端と左右の手の対応が逆になっているが、ロボット操作では鉗子先端と左右の手の対応が等しいため、直観的な操作が可能となり、操作し易かったためと考えられる。

第 7 章 結紮操作実験及びブドウの皮むき実験

SPS 支援用ロボット HASROSS のより実用的な操作性を評価するため、医療用のナイロン縫合糸を用いて、ロボット操作および手動操作により結紮操作を遂行し、評価を行う。さらにロボット操作によりブドウの皮むき実験を行う。被験者は、23 歳の健常男性 1 名であり、医療従事者ではないが、鉗子操作には十分慣れている。また COVIDIEN 社製 SPS 用鉗子は、オペレーティングインストルメント SILS ダイセクト 36CM を用いた。

7-1 結紮操作実験方法

ロボット操作と手動操作それぞれにおいて、結紮操作を始めてから完了するまでの所要時間を測定する。

なお、手動操作においては、動作範囲を制限しない場合と、動作範囲を支援用ロボットに合わせて制限した場合の 2 通りで結紮操作を行う。このとき、ロボット操作及び動作範囲を制限した手動操作では、一度で結び目を固く縛ることが困難であり、縫合糸を短く持ち替えて、固く結ぶ必要がある。これは、支援用ロボットの最大可動範囲が動作範囲を制限しない手動操作に比べて狭いため、ナイロン縫合糸を大きく左右に引っ張る動作に制限があるためである。

それぞれに対して 4 回結紮操作を行い、所要時間の平均値により評価する。図 7-1 に結紮操作実験の様子を示す。なお、本実験においても支援用ロボットにおいて力覚フィードバック機能は用いていない。

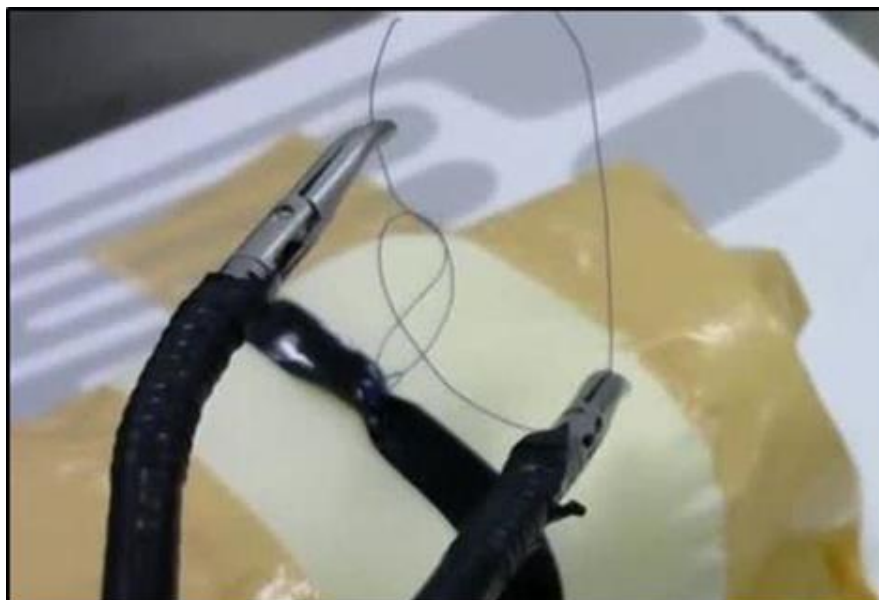


図 7-1 結紮動作

Fig.7-1 Appearance of ligation experiment

7-2 結紮操作実験結果

支援用ロボットによる鉗子操作では，結紮操作の所要時間の平均値が 28 秒であった．手動による鉗子操作では，動作領域を制限しない場合は 21 秒，動作範囲を支援用ロボットに合わせて制限した場合は 24 秒となった．

動作範囲を制限しない手動操作においては，縫合糸を持ち替える必要がないので，所要時間が短かった．動作範囲を支援用ロボットに合わせて制限した場合の手動操作とロボット操作を比較すると，平均値では手動操作の方がロボット操作よりも所要時間が短くなっているが，実験によってはロボット操作の方が手動操作よりも所要時間が短いこともあった．

7-3 ブドウの皮むき実験

SPS 支援用ロボット HASROSS を用いてブドウの皮むきを行う．ブドウにはあらかじめ切り込みをつけておき，両鉗子を用いてブドウの皮をむいた．図 7-2 にブドウの皮むき実験の様子を示す．SPS 支援用ロボット HASROSS による鉗子操作により，所要時間 174 秒で最大幅 10mm ほどのブドウの皮を頂点から反対側の頂点までむくことができた．本実験結果より，SPS 支援用ロボット HASROSS でブドウの皮をむくことが可能であることが実証された．

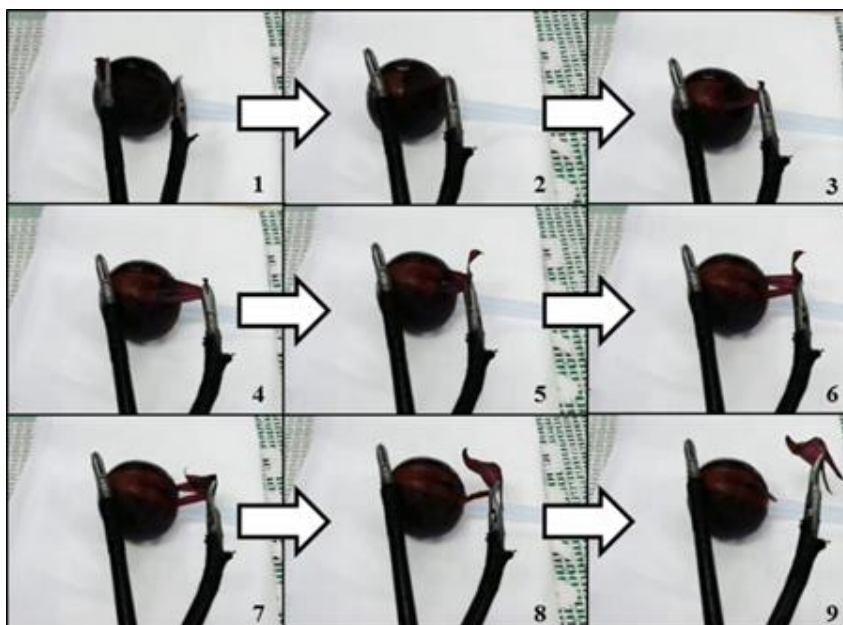


図 7-2 ブドウの皮むき

Fig.7-2 Appearance of the grape peeling

第 8 章 力覚フィードバック機能評価実験

腹腔鏡下手術の際，内視鏡視野外にある手術器具が臓器に接触し，臓器を傷つけてしまう医療事故が発生している．通常，ロボットには触覚がないため，障害物の接触が検知できない．そこで，SPS 支援用ロボット HASROSS の鉗子の軸にかかる負荷に対する力覚フィードバック機能を評価するため，以下の 2 つの評価実験を行う．

始めに，鉗子の軸が内視鏡視野外にある障害物に接触した際に接触を検知できたかどうかを判定する，(a)接触判定実験を行い，成功率を調べて手動操作と比較する．次に，ブロックを掴んだ状態で内視鏡視野外にある障害物との接触を判定した後，力覚情報のみを頼りに，障害物を回避してブロックを運搬する，(b)障害物回避実験を行う．

被験者は，23 歳の健常男性 2 名であり，医療従事者ではないが，鉗子操作には十分慣れている．また，支援用ロボットの操作において，操作範囲や操作感を考慮し，Omega.7 の操作に対して鉗子先端の動きを 1/2 倍して追従させる．力覚フィードバックについては，力覚センサの値を 2 倍にして Omega.7 に力覚提示する．また COVIDIEN 社製 SPS 用鉗子は，オペレーティングインスツルメント SILS ダイセクト 36CM を用いた．

8-1 実験方法

(a) 接触判定実験

被験者は鉗子先端を見ずに鉗子を左右に動かし，実験協力者が鉗子先端に障害物を接触させる．この際，障害物には臓器のやわらかさに近い軟式テニスボールを用いた．被験者は軟式テニスボールに接触したと感じたときに申告する．

このタスクを支援用ロボットの鉗子の軸に対する力覚フィードバック機能を ON にした場合と手動による鉗子操作でそれぞれ行う．接触したことが判らなかった場合を失敗とした．被験者 2 名に各 20 試行遂行してもらい，成功率を計測した．図 8-1 に接触判定実験の様子を示す．

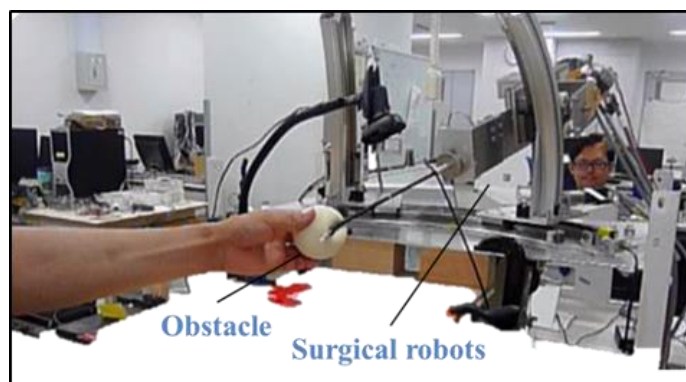


図 8-1 接触判定実験

Fig.8-1 Experiment of the obstacle contact judgment

(b) 障害物回避実験

被験者はブロック把持移動実験で用いたブロックを掴み、鉗子先端を見ずに障害物を兼ねた積木の上にブロックを乗せる。この際、実験協力者がランダムに積木の高さを変えている。また、被験者が見ている操作画面は鉗子のシャフト部のみが映されているため、被験者から鉗子先端部は見えない。

このタスクを支援用ロボットの鉗子の軸に対する力覚フィードバック機能を **ON** にした場合と **OFF** にした場合、及び手動による鉗子操作でそれぞれ行う。ブロックを積木の上に乗せられなかった場合や、明らかに積木の位置を把握していない場合を失敗とした。2名の被験者に各 10 試行ずつ遂行してもらい、成功率を計測した。図 8-2 に障害物回避実験の様子を示す。

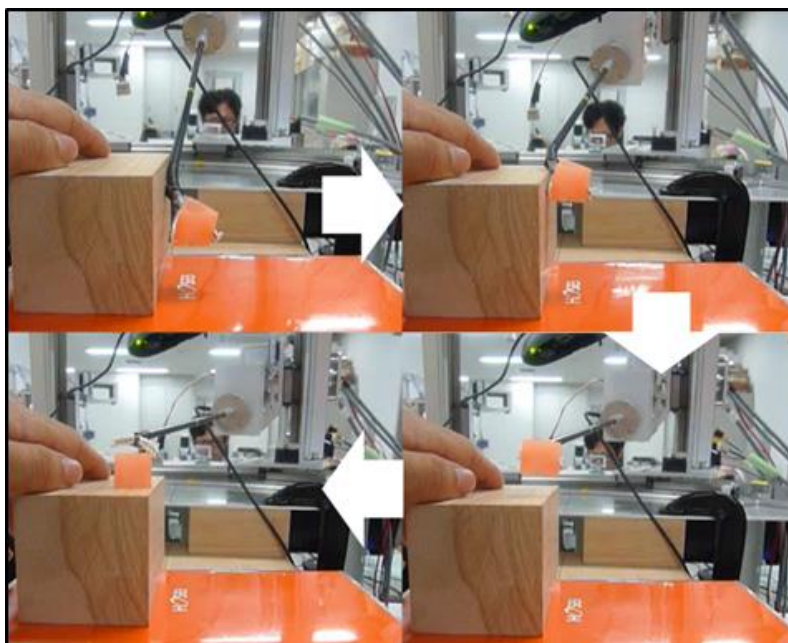


図 8-2 障害物回避実験

Fig.8-2 Snapshots of the obstacle avoidance experiment

8-2 実験結果

(a) 接触判定実験

実験結果を表 8-1 に示す。支援用ロボットによる操作の場合，被験者 A は 20 試行中 18 回成功し，成功率は 90%であった。被験者 B は全試行で成功した。被験者 A, B とともに軟式ボールの接触が概ね判定できており，力覚フィードバックが機能していると言える。しかしながら，被験者 A は 2 回失敗した結果となった。この理由として，支援用ロボットの鉗子先端が軟式テニスボールに接触した際に，鉗子先端の屈曲部のみがたわみ，鉗子根本部に装着された力覚センサで接触力を検出できなかったことが考えられる。

手動操作の場合，SPS 用鉗子を手で直接操作しているので，鉗子を通して力覚検知ができるため，被験者 2 名とも成功率は 100%であった。

表 8-1 接触判定実験結果

Table8-1 Results of the obstacle judging contact

	Subject:A		Subject:B	
	Count	Rate [%]	Count	Rate [%]
Robot Operation	18/20	90	20/20	100
Manual Operation	20/20	100	20/20	100

(b) 障害物回避実験

実験結果を表 8-2 に示す。支援用ロボットにおいては、力覚フィードバック機能を ON にした場合は、被験者 2 名とも成功率は 100%であり、障害物への接触を判別でき、積木の上にブロックを乗せることができた。

力覚フィードバック機能を OFF にした場合は、被験者 A が 1 回のみ成功したが、他試行では失敗した。これは、鉗子のシャフトのみ映された操作画面だけでは情報量が少なく、障害物との接触を判別できなかったためである。

手動操作の場合、鉗子を通して力覚検知ができるため、成功率は 100%であった。

表 8-2 障害物回避実験結果

Table8-2 Results of the obstacle avoidance experiment

	Subject:A		Subject:B	
	Count	Rate [%]	Count	Rate [%]
Robot Operation (ForceFB ON)	10/10	100	10/10	100
Robot Operation (ForceFB OFF)	1/10	10	0/10	0
Manual Operation	10/10	100	10/10	100

第9章 考察

ブロックの把持移動タスクでは、ロボット操作の方が、手動操作に比べて、平均タスク完了時間が早かった。その理由として、ロボット操作においては鉗子先端と左右の手の対応が等しい点、および位置追従制御により直観的な作業が可能になった点が挙げられる。また、右側の支援用ロボットの鉗子先端部を任意に屈曲制御できる機能により、ブロックを適切な角度で把持することができ、無駄な動きを省略できた点が、所要時間の短縮につながったと考えられる。

これより、ブロック把持移動実験において、支援用ロボットによる操作と手動による鉗子操作を比較・評価し、SPS 支援用ロボット HAROSS の有用性を示すことができた。結紮操作実験では、手動操作において動作範囲を制限しない場合は、手動操作の方がロボット操作より所要時間が短かった。これは、支援用ロボットの可動範囲が狭いため、一度で結び目を固く縛ることが困難で、縫合糸を持ち替える必要があったためである。

手動操作において動作範囲を支援用ロボットに合わせて制限した場合は、手動操作の方がロボット操作よりも若干平均所要時間が短かった。しかし、実験によってはロボット操作の方が手動操作よりも所要時間が短いこともあり、大きな差にはなっていない。

本 SPS 支援用ロボット HASROSS により、結紮操作をスムーズに行うためには、可動範囲の拡大や、支援用ロボットに適合した独自の結紮方法の開発が必要である。

またブドウの皮むき実験では、右側の支援用ロボットの鉗子先端部を任意に屈曲制御できる機能と鉗子先端の回転動作により、ブドウの皮を適切に把持し、皮をむくことができた。本実験において、SPS 支援用ロボット HASROSS によってブドウの皮むきのように繊細な作業が遂行可能であることを確認した。

力覚フィードバック機能評価実験では、鉗子の軸に対する力覚フィードバック機能を適用することで、操作画面外で鉗子先端が障害物に接触した際、マスタデバイスによる力覚提示により、被験者は障害物との接触を判断することができた。

これより、鉗子の軸に対する力覚フィードバック機能の有効性を示すことができた。しかし、支援用ロボットの鉗子先端に微小な負荷がかかった際、鉗子先端の屈曲部のみがたわみ、鉗子の根本に装着された力覚センサでは、微小な負荷を検出することが困難であった。

第 10 章 結言

本研究では、独自に開発した力覚フィードバック可能な SPS 支援用ロボット HASROSS による鉗子操作と手動による鉗子操作を比較し、SPS 支援用ロボット HASROSS の有用性の評価を行った。操作性の評価を行うため、ブロック把持移動実験、結紮操作実験、ブドウの皮むき実験を行い、SPS 支援用ロボット HASROSS の有用性を確認できた。また、SPS 支援用ロボット HASROSS の鉗子の軸に対する力覚フィードバック機能の評価するため、接触判定実験と障害物回避実験を行い、鉗子の軸に対する力覚フィードバック機能の有効性を確認できた。

今後の課題として、さらに被験者を増やし、特に外科医の操作によるデータを取得すること、及び鉗子の把持部に対する把持力フィードバック機能を付加して操作性の評価を行うことが挙げられる。

謝辞

本研究は、法政大学理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、知識に基づいた多くの的確な意見や助言を頂き、多岐にわたってお世話になりました。心より感謝申し上げます。

研究が行き詰ると「みんなはどう思うか」と、同期メンバに投げかけ、その度に同期メンバは一緒に思案をしてくれた。同期メンバは、私のモチベーションそのものだった。

本研究は大勢の人の協力に支えられている。
主に研究室同期メンバ、後輩そして石井千春教授である。この場を借りて敬意を表し、感謝します。

参考文献

- (1) 河内明宏, 三木恒治, 「泌尿器科領域における単孔式腹腔鏡手術(特集 低侵襲手術・機能温存手術の最前線)」, 京都府立医科大学雑誌, Vol.120, No.2, pp.75-80 (2011)
- (2) 津村遼, 堀瀬友貴, 関本貢嗣, 瀧口修司, 土岐祐一郎, 森正樹, 宮崎文夫, 河合俊和, 西川敦: 「単孔式内視鏡手術のためのマスタ・スレーブロボットシステムに用いる湾曲式手術器具の評価」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, pp.2A1-C22(1)-2A1-C22(3) (2013)
- (3) 関口雄太, 小林洋, 伴野裕, 渡辺広樹, 豊田和孝, 小西晃造, 富川盛雅, 家入里志, 田上和夫, 橋爪誠, 藤江正克: 「単孔式手術を支援するロボットのためのフレキシブルシャフト駆動を用いた術具マニピュレータの開発」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, pp.2A1-B22(1)-2A1-B22(4) (2010)
- (4) Jienan Ding, Roger E. Goldman, Kai Xu, Peter K. Allen, Dennis L. Fowler, Nabil Simaan: “Design and Coordination Kinematics of an Insertable Robotic Effectors Platform for Single-Port Access Surgery”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.18, No.5, pp.1612-1624 (2013)
- (5) 伴野裕, 小林洋, 関口雄太, 渡辺広樹, 豊田和孝, 小西晃造, 富川盛雅, 家入里志, 田上和夫, 橋爪誠, 藤江正克: 「単孔式手術を支援する能動内視鏡マニピュレータの開発」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, pp.2A1-B21(1)-2A1-B21(3) (2010)
- (6) Daisuke Yamaoka, Chiharu Ishii, Katsuaki Oiwa, Shotarou Maeda, “Development of a Surgical Robot for Single-Port Surgery and its Position Tracking Control,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on ROBOTICS*, pp.41-46, (2014)
- (7) 大岩克耀, 石井千春, 山岡大祐, 川村秀樹, 「単孔式腹腔鏡下手術(SPS)支援用ロボットの位置制御」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会概要集, No.14-2, pp.3A1-B02, (2014)
- (8) F. Cavallo, G. Megali, S. Sinigaglia, O. Tonet, and P. Dario, “A biomechanical analysis of surgeon’s gesture in a laparoscopic virtual scenario,” *Stud. Health Technol. Inf.*, Vol. 119, pp.79–84, (2006)
- (9) M. Mitsuishi, N. Sugita, and P. Pitakwatchara, “Force-feedback augmentation modes in the laparoscopic minimally invasive telesurgical system,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, Vol. 12, No. 4, pp. 447–454, (2007)

- (10) C. Ishii, H. Mikami and Y. Nishitani, "Passivity Based Bilateral Teleoperation for Surgical Robotic Forceps System with Time Varying Delay", *International Journal of Mechatronics and Automation*, Vol.2, No.2, pp.132-146, (2012)
- (11) A.M.derossis, J.Bothwell, H.H.Sigman, G.M.fried, "The effect of practice on performance in a laparoscopic simulator," *Surgery Endoscopy*, Vol.12, pp.1117-1120, (1998)
- (12) M.C.Vassiliou, G.A.Ghitulescu, L.S.Feldman, D.Stanbridge, K.Leffondre, H.H.Sigman, ,G.M.Fried, "The MITELS program to measure technical skill in laparoscopic surgery," *Surgery Endoscopy*, Vol.20, pp.744-747, (2006)
- (13) 小林一行, MATLAB ハンドブック, 秀和システム (2008)
- (14) 鈴森康一 岡山大教授 工博 ,ロボット機構学,コロナ社 (2004)
- (15) 石村園子, やさしく学べる統計学, 共立出版 (2006)
- (16) 石村貞夫, 入門はじめての統計解析, 東京図書 (2006)
- (17) 土井誠, 理工系の数理統計, 東海大学出版会(2005)

付録 A : ソースコード

スケーリングと Omega.7 の傾き角度による目標位置を算出するプログラムである.

%Omega.7 入力プログラム

```
function Omega7_sfun(block)

    setup(block);

    function setup(block)
        block.NumDialogPrms = 0;

        block.NumInputPorts = 3;

        %block.SetPreCompInpPortInfoToDynamic;

        block.InputPort(1).DirectFeedthrough = true;
        block.InputPort(2).DirectFeedthrough = true;
        block.InputPort(3).DirectFeedthrough = true;

        block.InputPort(1).SamplingMode = 'Sample';
        block.InputPort(2).SamplingMode = 'Sample';
        block.InputPort(3).SamplingMode = 'Sample';

        block.NumOutputPorts = 3;

        %block.SetPreCompOutPortInfoToDynamic;

        block.OutputPort(1).SamplingMode = 'Sample';
        block.OutputPort(2).SamplingMode = 'Sample';
        block.OutputPort(3).SamplingMode = 'Sample';

        block.SampleTimes = [-1 0];

        block.RegBlockMethod('Outputs', @Outputs);
```

```

function Outputs(block)
syms th0

x=block.InputPort(1).data; %Omega.7 x方向 操作量
y=block.InputPort(2).data; %Omega.7 y方向 操作量
z=block.InputPort(3).data; %Omega.7 z方向 操作量

a= 0.1; %スケーリング定数
b= 0.1;
c= 0.1;

ax=a*x;
ay=b*y;
az=c*z;

p=[ax;ay;az];

th0=0;

R= [ cos(th0), -sin(th0), 0;
     sin(th0),  cos(th0), 0;
     0        ,    0    , 1]; %0Tomega 基準座標からOmega.7

pr=R*p;

block.OutputPort(1).Data= pr(1);
block.OutputPort(2).Data= pr(2);
block.OutputPort(3).Data= pr(3);

```

右の Omega.7 で左のロボットアームを操作するときに用いる逆運動学プログラムである.

%逆運動学解プログラム

```
function gyakuundougaku2sfunm4(block)

setup(block);

function setup(block)
block.NumDialogPrms = 0;

block.NumInputPorts = 6;

%block.SetPreCompInPortInfoToDynamic;

block.InputPort(1).DirectFeedthrough = true;
block.InputPort(2).DirectFeedthrough = true;
block.InputPort(3).DirectFeedthrough = true;
block.InputPort(4).DirectFeedthrough = true;
block.InputPort(5).DirectFeedthrough = true;
block.InputPort(6).DirectFeedthrough = true;

block.InputPort(1).SamplingMode = 'Sample';
block.InputPort(2).SamplingMode = 'Sample';
block.InputPort(3).SamplingMode = 'Sample';
block.InputPort(4).SamplingMode = 'Sample';
block.InputPort(5).SamplingMode = 'Sample';
block.InputPort(6).SamplingMode = 'Sample';

block.NumOutputPorts = 3;

%block.SetPreCompOutPortInfoToDynamic;

block.OutputPort(1).SamplingMode = 'Sample';
block.OutputPort(2).SamplingMode = 'Sample';
block.OutputPort(3).SamplingMode = 'Sample';
```

```
block.SampleTimes = [-1 0];
```

```
block.RegBlockMethod('Outputs', @Outputs);
```

```
function Outputs(block)
```

```
%基準座標からロボットアームの鉗子先端位置までにおける逆運動学プログラム
```

```
% for k=1:20
```

```
    r=[block.InputPort(1).data;
        block.InputPort(2).data;
        block.InputPort(3).data]; %目標値(x y z) Omega.7入力
```

```
    th1=block.InputPort(4).data; %Yaw方向 現在角度(エンコーダより読み取る)
    th2=block.InputPort(5).data; %Pitch方向 現在角度(エンコーダより読み取る)
    l3=block.InputPort(6).data; %直動方向 現在角度(エンコーダより読み取る)
    l4=50; %屈曲部長さ
    th4=-pi/5; %Z軸まわり屈曲
    th5=0; %X軸まわり屈曲
```

```
    th=[th1;th2;l3]; %現在角度
```

```
    J=[ l4*(cos(th5)*(sin(th1)*sin(th4) + cos(th1)*cos(th2)*cos(th4)) +
cos(th1)*sin(th2)*sin(th5)) - cos(th1)*(300*cos(th2) - 300) - 300*cos(th1) +
cos(th1)*cos(th2)*(l3 + 350), l4*(cos(th2)*sin(th1)*sin(th5) -
cos(th4)*cos(th5)*sin(th1)*sin(th2)) + 300*sin(th1)*sin(th2) - sin(th1)*sin(th2)*(l3 +
350), cos(th2)*sin(th1);
```

```
        300*sin(th1) + sin(th1)*(300*cos(th2) - 300) + l4*(cos(th5)*(cos(th1)*sin(th4)
- cos(th2)*cos(th4)*sin(th1)) - sin(th1)*sin(th2)*sin(th5)) - cos(th2)*sin(th1)*(l3 +
350), 300*cos(th1)*sin(th2) + l4*(cos(th1)*cos(th2)*sin(th5) -
cos(th1)*cos(th4)*cos(th5)*sin(th2)) - cos(th1)*sin(th2)*(l3 + 350), cos(th1)*cos(th2);
```

```
    0, 300*cos(th2) - cos(th2)*(l3 + 350) -
l4*(sin(th2)*sin(th5) + cos(th2)*cos(th4)*cos(th5)), -sin(th2)];
```

```
    dth= th + (J \ r); %ニュートン法の式 th現在角度 \逆行列
```

```
% end
```

```
block.OutputPort(1).Data= dth(1); %Yaw方向 目標角度
```

```
block.OutputPort(2).Data= dth(2); %Pitch方向 目標角度
```

```
block.OutputPort(3).Data= dth(3); %直動方向 目標角度
```


左の Omega.7 で右のロボットアームを操作する時に用いる逆運動学プログラムである.

%逆運動学解プログラム

```
function gyakuundougaku2sfunm4_rightarm(block)
```

```
    setup(block);
```

```
    function setup(block)
```

```
        block.NumDialogPrms = 0;
```

```
        block.NumInputPorts = 6;
```

```
%block.SetPreCompInpPortInfoToDynamic;
```

```
        block.InputPort(1).DirectFeedthrough = true;
```

```
        block.InputPort(2).DirectFeedthrough = true;
```

```
        block.InputPort(3).DirectFeedthrough = true;
```

```
        block.InputPort(4).DirectFeedthrough = true;
```

```
        block.InputPort(5).DirectFeedthrough = true;
```

```
        block.InputPort(6).DirectFeedthrough = true;
```

```
        block.InputPort(1).SamplingMode = 'Sample';
```

```
        block.InputPort(2).SamplingMode = 'Sample';
```

```
        block.InputPort(3).SamplingMode = 'Sample';
```

```
        block.InputPort(4).SamplingMode = 'Sample';
```

```
        block.InputPort(5).SamplingMode = 'Sample';
```

```
        block.InputPort(6).SamplingMode = 'Sample';
```

```
        block.NumOutputPorts = 3;
```

```
%block.SetPreCompOutPortInfoToDynamic;
```

```
        block.OutputPort(1).SamplingMode = 'Sample';
```

```
        block.OutputPort(2).SamplingMode = 'Sample';
```

```
        block.OutputPort(3).SamplingMode = 'Sample';
```

```
block.SampleTimes = [-1 0];
```

```
block.RegBlockMethod('Outputs', @Outputs);
```

```
function Outputs(block)
```

```
%基準座標からロボットアームの鉤子先端位置までにおける逆運動学プログラム
```

```
% for k=1:20
```

```

r=[block.InputPort(1).data;
   block.InputPort(2).data;
   block.InputPort(3).data]; %目標値(x y z) Omega.7入力

```

```

th1=block.InputPort(4).data; %Yaw方向 現在角度(エンコーダより読み取る)
th2=block.InputPort(5).data; %Pitch方向 現在角度(エンコーダより読み取る)
l3=block.InputPort(6).data; %直動方向 現在角度(エンコーダより読み取る)
l4=35; %屈曲部長さ
th4=-pi/18; %Z軸まわり屈曲
th5=0; %X軸まわり屈曲

```

```
th=[th1;th2;l3]; %現在角度
```

```

J=[ 300*cos(th1) + cos(th1)*(300*cos(th2) - 300) - l4*(cos(th5)*(sin(th1)*sin(th4)
+ cos(th1)*cos(th2)*cos(th4)) + cos(th1)*sin(th2)*sin(th5)) - cos(th1)*cos(th2)*(l3 +
350), sin(th1)*sin(th2)*(l3 + 350) - 300*sin(th1)*sin(th2) -
l4*(cos(th2)*sin(th1)*sin(th5) - cos(th4)*cos(th5)*sin(th1)*sin(th2)),
-cos(th2)*sin(th1);

```

```

300*sin(th1) + sin(th1)*(300*cos(th2) - 300) + l4*(cos(th5)*(cos(th1)*sin(th4)
- cos(th2)*cos(th4)*sin(th1)) - sin(th1)*sin(th2)*sin(th5)) - cos(th2)*sin(th1)*(l3 +
350), 300*cos(th1)*sin(th2) + l4*(cos(th1)*cos(th2)*sin(th5) -
cos(th1)*cos(th4)*cos(th5)*sin(th2)) - cos(th1)*sin(th2)*(l3 + 350),
cos(th1)*cos(th2);

```

```

0, 300*cos(th2) - cos(th2)*(l3 + 350) -
l4*(sin(th2)*sin(th5) + cos(th2)*cos(th4)*cos(th5)), -sin(th2)];

```

```
dth= th + (J \ r); %ニュートン法の式 th現在角度 ¥逆行列
```

```
% end
```

```
block.OutputPort(1).Data= dth(1); %Yaw方向 目標角度
```

```
block.OutputPort(2).Data= dth(2); %Pitch方向 目標角度
```

```
block.OutputPort(3).Data= dth(3); %直動方向 目標角度
```

付録 B：使用機器仕様

モータ

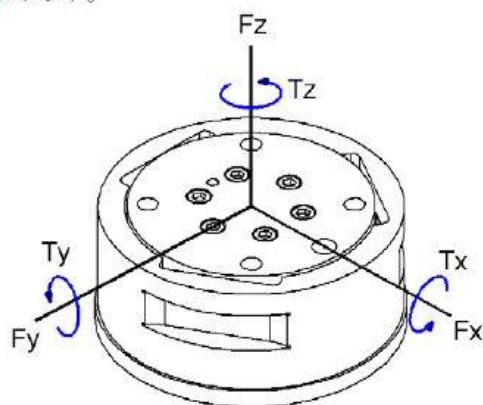
ロボット駆動に用いた FAULHARBER 社製 DC モータの仕様を以下に示す。

			トランスレーション	ヨー	ピッチ	
モータ	型番		1741U012CXR	2342S012CR	2342S012CR	
	定格電圧		12	12	12	V
	最大出力		5.8	17	17	W
	最大効率		5.58	80	80	%
	無負荷回転数		7500	8100	8100	rpm
	起動トルク		28.5	80	80	mNm
	トルク係数		14.48	20.7	20.7	mNm/A
	直径		17	23	23	mm
	長さ		52	63	63	mm
	重量		45	88	88	g
ギアヘッド	型番		20/1	26/1S	26/1S	
	推奨最大入力 回転数		5000	4000	4000	rpm
	バックラッシュ		≦1	≦1	≦1	deg
	動作温度範囲		- 30～+100	- 30～+100	- 30～+100	℃
	減速比		3.71:1	23:1	43:1	[-]
	重量		28	116	139	g
	長さ		32.7	53.4	53.4	mm
	最大 軸負荷	連続 運転	500	3500	3500	mNm
		断続 運転	700	4500	4500	mNm
効率		88	80	70	%	
エンコーダ	型番		IE2-512	HEDS5540A	HEDS5540A	
	発生パルス		512	500	500	[-]
	チャンネル数		2	2+1	2+1	[-]
	パルス幅		90±45	180±35	180±35	[-]
	周波数範囲		160	100	100	kHz
	作動温度範囲		- 25～+85	-40～+100	-40～+100	℃

センサ

実験で用いた 6 軸力覚センサは ATI Industrial Automation 社の Mini40 である。Mini40 の仕様を以下に示す。

力の性質、状態はニュートンの運動の第三法則により、「すべての力（作用）に対して、相手から反対方向に力（反作用）を受ける。またお互いの 2 つの物体に及ぼす作用と反作用の大きさは等しく、方向は反対である。」と言えます。このニュートンの第三法則の考えより、作用した力とトルクは変換器に伝わります。



（取扱説明書より抜粋）

重量(g)	50
直径(mm)	40
高さ(mm)	12.3
1 軸あたりの最大過負荷	
Fx,Fy	±810N
Fz	±2400N
Tx,Ty	±19Nm
Tz	±20Nm

付録 C : Sensing, Actuation, Motion Control, and
Optimization (SAMCON2016)投稿論文

Evaluation of Performance of the Surgical Robot HASROSS

Katsuaki Oiwa^{*a)}, Non-member, Shotaro Maeda^{*}, Non-member, Chiharu Ishii^{*}, Member

In this paper, the maneuverability of a haptic surgical robot for single-port surgery (SPS), termed HASROSS, developed in our laboratory is evaluated. The kinematics of the surgical robot was analyzed and a position control method on the basis of inverse kinematics was proposed to control the surgical robot intuitively. The surgical robot operates under master–slave control implemented by the haptic interface Omega 7 and a force feedback is provided to the operator. We assigned five tasks to the surgical robot and compared its performance against manual operation using commercially available forceps. The maneuverability of the surgical robot was assessed in a block transfer experiment, a ligation experiment and a grape peeling experiment. The completion times of forceps manipulation by robot operation were compared with those of manual operation. To assess the force feedback functionality of the surgical robot, we tested whether the robot could properly contact and avoid obstacles using the forceps. The results verified the effectiveness of the HASROSS.

Keywords : haptic surgical robot, single-port surgery, maneuverability evaluation, force feedback

1. Introduction

In recent years, minimally invasive surgery has become the preferred option in hospitals, but it requires accurate and delicate operation in a small workspace with a limited field of vision, demanding considerable skill of the surgeon. Single-port surgery (SPS) has been lately embraced by laparoscopic surgeons [1]. Various surgical robots controlled by a teleoperated master–slave system such as the da Vinci system have also been developed and used in conventional laparoscopic surgery [2]. Other surgical robots have been designed for SPS [3]–[5]. In addition, to perform minimally invasive surgery, only visual information is provided in the conventional robotic systems. Force feedback is particularly beneficial in surgical robot systems, as it improves the surgeon’s dexterity and enhances the operability of surgical robots in telesurvey execution [6].

Our originally developed haptic surgical robot for SPS, termed HASROSS, is described in [7]. We analyzed the kinematics of the developed surgical robot and proposed a position control method based on inverse kinematics as an intuitive control. The present study evaluates the maneuverability of the surgical robot for SPS. To this end, we assigned five tasks to the surgical robot and compared its performance against manual operation using commercially available forceps.

The first task is block transfer in which the robot grips and moves the block. The robot also performs the Task1 Peg transfer described in [8] and [9]. The second task is a ligating operation using a surgical suture, and the third task is a peeling of grape. The fourth and fifth tasks are contact detection of a soft tennis ball and obstacle avoidance, respectively. These tasks are experimentally performed in manual and robot operations. The maneuverability of the surgical robot is evaluated by comparing these results.

2. Surgical Robot for Single-Port Surgery

2.1 Single-port Surgery In conventional laparoscopic surgery, the forceps and laparoscope are inserted through incision holes on the body surface. However, in SPS, they are inserted through a single-incision hole on the umbilicus. The scar is almost unnoticeable because the incision trace is indistinguishable from the umbilical wrinkle pattern [10]. Therefore, SPS yields a better aesthetic outcome than conventional laparoscopic surgery. In addition, SPS reduces the risk of adhesion-based postoperative complications because of its much lower invasiveness than the conventional method.

2.2 Experimental Devices Fig. 1 shows the haptic device Omega 7 produced by Force Dimension, used as a master device for teleoperation control of the developed SPS surgical robot. Omega 7 can perform seven DOF operations: translational motions along three axes, rotary motions around these three axes, and a grasping motion around one axis. In addition, force feedback is available for the translational motions and the grasping motion.

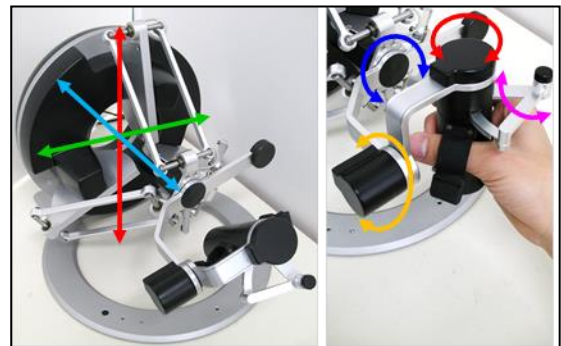


Fig. 1. Haptic device Omega 7 and its manipulations (left panel indicates the yaw, pitch, and translational motions; right panel indicates the rotational motions (blue, red, yellow) and the grasping motion (pink).)

a) Correspondence to: Katsuaki oiwa.

E-mail: katsuaki.oiwa.st@stu.hosei.ac.jp

* Medical and welfare robotics laboratory
Hosei University 3-7-2, Kajinocho, Koganei, Tokyo, Japan 184-8584

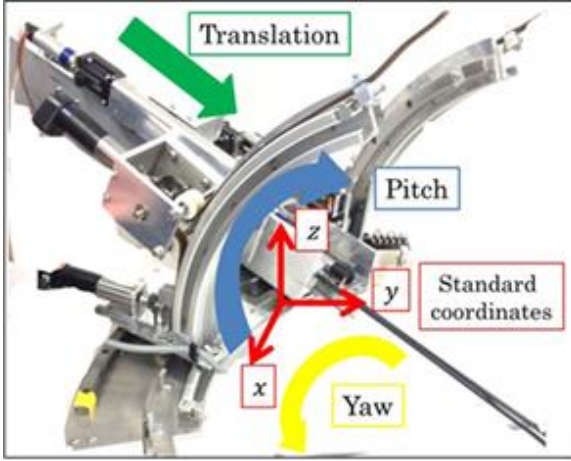


Fig. 2. Overview of the SPS surgical robot HASROSS.

Fig. 2 shows an overview of the SPS surgical robot HASROSS. The surgical robot consists of two forceps manipulators and two robotic arms. The laparoscope is assumed to be operated manually by a laparoscopic camera assistant. As shown in Fig. 2, the surgical robot for SPS can perform yaw, pitch, and translational motions. The surgical robot is also equipped with a force feedback function. A six-axis force sensor is attached in the root of the forceps shaft as shown in Fig. 3. Therefore, the system will detect loads applied to the shaft of the forceps. In tasks 4 and 5, the contact force was fed back to the operator through the Omega 7. The feedback force was based on the force measured by the sensor.

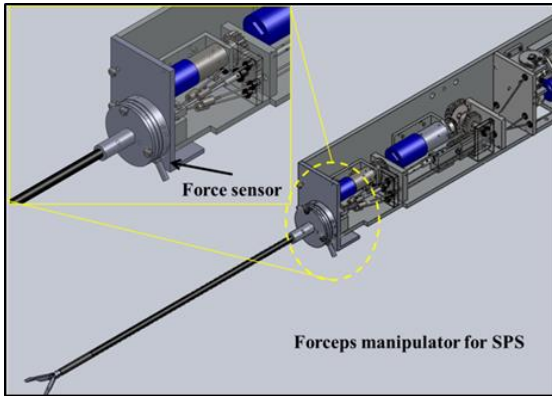


Fig. 3. Forceps manipulator for SPS.

2.3 Kinematics The standard coordinates (x, y, z) are set in the center of the curved guide of the surgical robot. Two Omega 7s and the SPS surgical robot are then placed as shown in Fig. 4.

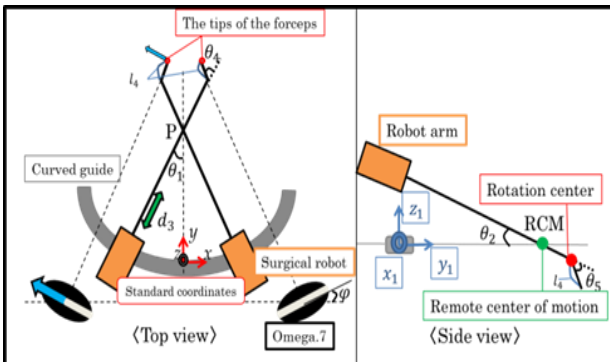


Fig. 4. Placement of the surgical robot and Omega 7.

This arrangement is called the home position. In the position tracking control, intuitive operation is realized so that the moving direction of the forceps tip coincides with the operating direction of Omega 7. An example is indicated by the blue arrow in Fig. 4, in which the right side surgical robot is controlled using the left side Omega 7. To achieve intuitive operation, we developed the following forward and inverse kinematics of the developed surgical robot.

The forward kinematics are solved through a simultaneous transformation matrix, which converts the standard coordinates to the coordinates at the tip of the forceps, denoted as ${}^{L0}T_{L6}$.

$${}^{L0}T_{L6} = {}^{L0}T_{L1} {}^{L1}T_{L2} {}^{L2}T_{L3} {}^{L3}T_{L4} {}^{L4}T_{L5} {}^{L5}T_{L6} \dots \dots \dots (1)$$

The end position of the left-side robotic arm with forceps manipulator in the standard coordinates is obtained by multiplying

the origin vector ${}^{L6}p = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$ from the right side of (1).

In this study, we seek a numerical solution to the inverse kinematics using the Jacobian matrix. Then, by Newton's method, we obtain:

$$\begin{aligned} \theta_{new} &= \theta_{old} + \Delta\theta \\ &= \theta_{old} + J^{-1}\Delta r \\ &= \theta_{old} + J^{-1}(r_{new} - r_{old}) \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

The previous angle of the robotic arm θ_{old} is measured by encoders mounted on the drive motors of the robotic arm, and r_{new} and r_{old} are detected by Omega 7. r_{new} and r_{old} represent a current tip position and the tip position from one step before. Thus, the updated angle of the robotic arm θ_{new} is obtained by numerically solving the inverse kinematics. Details are given in [7].

2.4 Control Methodology The target angular displacement θ_{new} is provided to the surgical robot at each sampling time. As explained above, the target angle is found by numerically solving the inverse kinematics by Newton's method. Tracking the target angular displacement provides a suitable position tracking control of the forceps tip.

The controller is a proportional-integral-derivative controller. The position of the forceps tip is tracked in the operating direction of the Omega 7. The control program was written in MATLAB/Simulink software. As the interface board, we used a digital controller (PCIA04; Inteco Co., Ltd.). The motor amplifier comprised a bipolar power supply (Metronix Inc.) and a VoltPAQ-X4 (Quanser Corp.).

3. Operating Range

In the first experiment, we evaluated the operating range of the forceps tip by robot operation using the surgical robot and by manual operation using the commercially available SPS forceps. The forceps used in the manual operation were commercially manufactured for SPS by Covidien Ltd.

3.1 Operating Range Experiment In this experiment, two SPS forceps and an aluminum rod that mimics a laparoscope were inserted in crossover fashion into the single-incision laparoscopic surgery (SILS) port made by Covidien Ltd. Two of them were fixed to prevent their interference and another one was moved freely. The locus of the maximum movable range was traced onto a grid paper by a pen mounted at the tip of the rod and the forceps. The experiments were sequentially performed for the rod and the forceps. The SILS port was placed 15 cm from the

grid paper as shown in Fig. 5. The experiment was carried out for robot operation using the surgical robot and for manual operation using the SPS forceps.

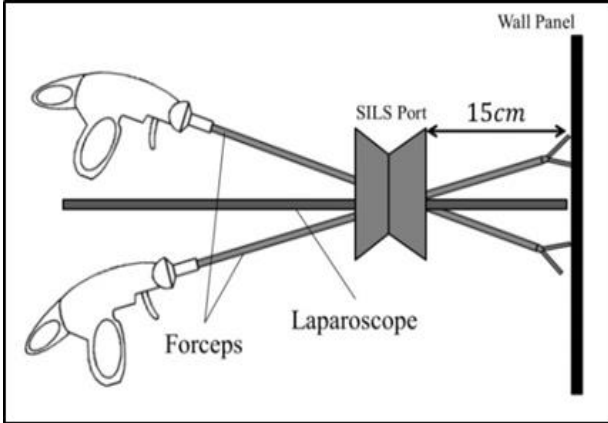


Fig. 5. Schematic of the operating range experiment.

3.2 Experimental Results The results of the operating range experiment are summarized in Table 1. For all the manipulated parts, manual operation of the SPS forceps far exceeded the maximum range of movement of the surgical robot's operation. This result is attributed to the limited operating area of the surgical robot, which narrows the movement range of the robot operation. However, it should be mentioned that the maximum movable range of the actual surgery is smaller than the movable range of measurement by manual operation.

Table 1. Results of the operating range experiment.

	Robot operation [mm ²]	Manual operation [mm ²]
Forceps A	8189	13000
Forceps B	5670	16375
Laparoscope	7419	11520
TOTAL	21278	40895

4. Evaluation Experiment of Block Transfer

The maneuverability of the surgical robot was evaluated in block transfer tasks. The subject was a healthy 23-year-old male who is not a medical worker but is sufficiently familiar with forceps operation. The control program was created using MATLAB/Simulink software.

4.1 Experimental Methodology The equipment of the evaluation experiment was set up as shown in Fig. 6. The block transfer tasks were performed with VTi medical Dexterity Blocks. In the block transfer experiments, three blocks were sequentially manipulated by the nondominant hand of the subject. The subject was required to transfer the object in midair to his dominant hand and then place the block on the opposite side of the board. The time to transfer three blocks was recorded.

10 block transfer tasks were conducted for the robot operation and the manual operation. The manual operations were performed in a cage, limiting the operations to the maximum movable range of the surgical robot. In this experiment, the bending angle of the forceps during the manual operation was fixed at approximately 30°. The bending angle of the right forceps (θ_4 in Fig.4) of the

robot operation was fixed at approximately 30°, and the bending angle of the left forceps was arbitrary changed depending on the hand operation.

The incident angle in the operating shaft relative to the operating face of the block board of the forceps was fixed at approximately 50°–60°. During this experiment, the surgical robot was operated without the force feedback function. The obtained results were analyzed to evaluate the maneuverability of the surgical robot for SPS.

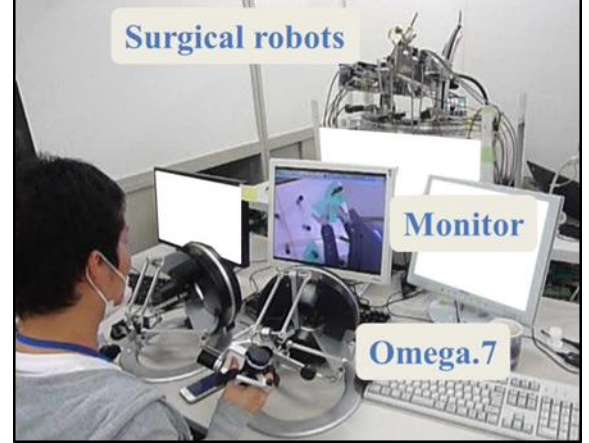


Fig. 6. Setup of the block transfer experiment.

4.2 T-test The *t*-test evaluates the statistical significance of different results. Specifically, if the average values of two samples selected from a population appear to differ, the *t*-test determines whether the difference is likely to be real [11]. In our experiments, we evaluated whether the task completion time differed between the robot and manual operations.

The probability, called the *p*-value, actually measures the probability that differences among groups obtained during an experiment are chance occurrences. We considered that *p*-values were significant at the 0.05 level, because this means that the average completion times coincide between the manual and robot operations at a 5%.

4.3 Experimental Result The results of the block transfer experiment are shown in Table 2 and Fig. 7. Fig. 8 plots the learning curve representing the time required for familiar operation. The blue and red bars in Fig. 7 represent the average task completion times of the manual operation and robot operation, respectively, and the thin black lines extend from the earliest to the latest completion time.

Clearly, the robot operation completed the task earlier than the manual operation. This was attributed to the equivalent left and right manipulation ability of the robot, and the intuitive tasking by the position tracking control. In addition, the difference was statistically significant because $p = 0.0472$ was obtained. Therefore, the difference between the average task completion times was not due to accidental errors.

The learning curve demonstrates that by the 10th trial, the completion time of both manual and robot operations had reached its minimum. In the first few trials, the robot operation was accomplished faster than manual operation because the robot performs right and left operations with equal competency.

Table 2. Results of the block transfer experiment.

		Robot operation	Manual operation
Count	1	1:33	2:08
	2	1:25	1:34
	3	1:08	1:56
	4	1:10	1:57
	5	1:23	1:10
	6	1:12	1:18
	7	0:52	1:02
	8	1:13	1:00
	9	0:52	1:14
	10	0:58	1:06
Average		1:10	1:26

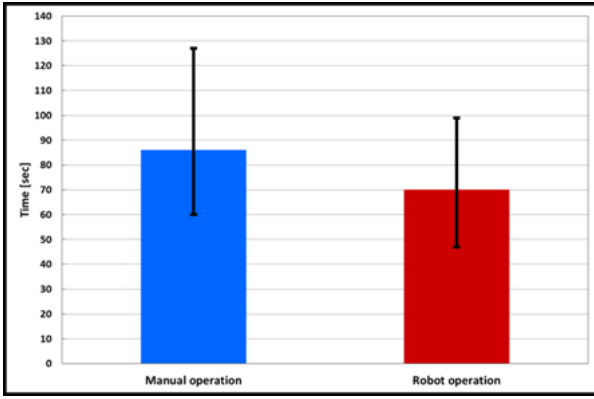


Fig. 7. Time required for the block transfer task.

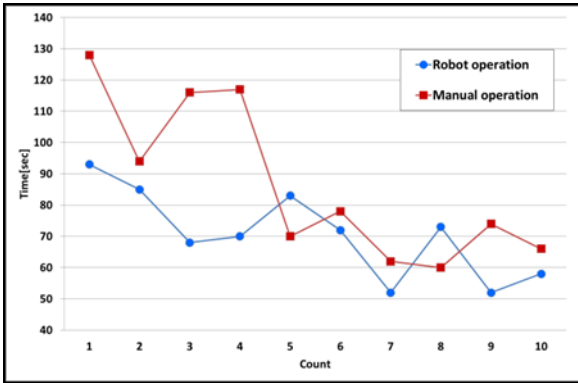


Fig. 8. Learning curve in the block transfer experiment.

5. Ligation Operation and Grape Peeling

To evaluate the surgical robot in a more practical setting, the robot performed ligation using a medical nylon suture, and its performance was compared with that of manual operation. In addition, a peeling of grape was carried out using the surgical robot. The subject was a 23-year-old male who is not a medical worker but sufficiently accustomed to forceps operation.

5.1 Experimental Methodology of the Ligation The manual operation was performed in no-cage and in cage situations, limiting the maximum movable range to that of the surgical robot.

The ligation operation was performed four times by the manual operation and the robot operation, and the average completion time was calculated. The equipment of the ligation operation experiment is shown in Fig. 9. In this experiment, the surgical robot was operated without the force feedback function.

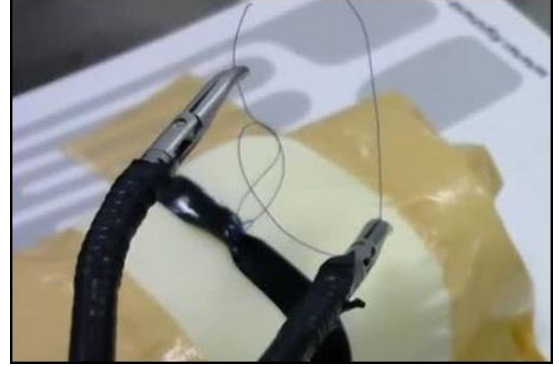


Fig. 9. Appearance of the ligation experiment.

5.2 Experimental Result of the Ligation The robot operation required 28 s on average to complete the ligation procedure against 21 s by the manual operation in an unrestrained operating area and 24 s by the manual operation in the caged area.

The completion times of the manual operation were shorter than that of the robot operation. One of the reasons of this is considered as follows. Because the maximum movable range of the surgical robot is narrower than in the normal manual operation, large left and right movements for ligation operation are prevented under this condition.

5.3 Methodology and Result of Grape Peeling The subject performed peeling of grape using the surgical robot. The appearance of the grape peeling experiment is shown in Fig. 10.

The robot operation required 174 s to complete the grape peeling. As a result, the grape peeling was successfully accomplished by the surgical robot.

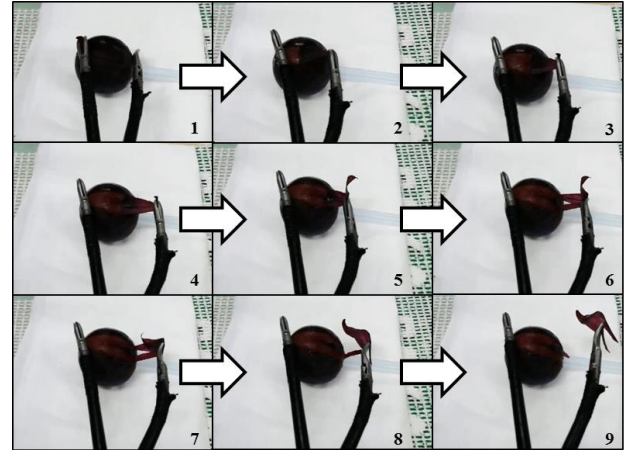


Fig. 10. Appearance of the grape peeling.

6. Evaluation Experiment of Force Feedback

6.1 Experimental Methodology During laparoscopic surgery, there is risk of organ damage when the surgical instruments contact the organ outside of the endoscope's field of view. Generally, the robots cannot detect contacted obstacles unless they elicit a tactile response.

Therefore, this experiment examined the judgment rate of the surgical robot when contacting obstacles outside the operation

screen and compared the judgement performance with that of manual operation. For this purpose, the robot was equipped with the force feedback function.

After judging the contact obstacles from force feedback alone, the subject was required to avoid the obstacle. The force feedback function of the surgical robot was evaluated in two tasks. The human subjects were two students with sufficient knowledge of forceps operation.

As for the motion scaling of displacement, the forceps tip follows half of the movement of Omega 7, and as for the haptic feedback, doubled force was presented to the Omega 7.

1) Contact judgement

Fig. 11 shows the equipment of the contact judgement experiment. The subject moved the forceps tip to the left and the right without looking at the forceps tip. An obstacle was touched to the forceps tip by the experimental collaborator. The obstacle was a soft tennis ball mimicking the softness of an organ. The subjects were required to declare when they sensed contact with the tennis ball.

This task was conducted by the manual operation and the robot operation with the force feedback function. The case of “unsure contact” was considered a failure. The judgment rate of each subject was measured in 20 trials per subject.

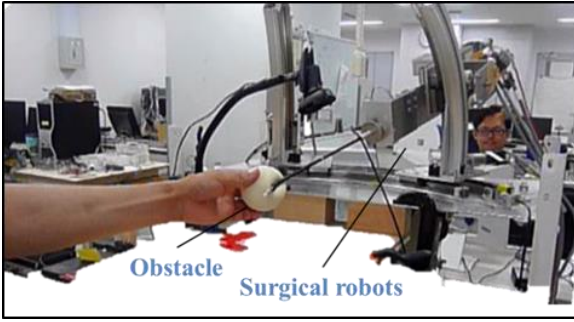


Fig. 11. Experiment of obstacle contact judgment.

2) Obstacle avoidance

Snapshots of the obstacle avoidance task are presented in Fig. 12. The subjects started the experiment with grasping the block used in the block transfer experiment. Then, without looking at the forceps tip, the subject stacked it onto other specified building blocks by pushing the forceps tip to the sidewall of the building blocks, where the stack height was randomly selected. Since the subjects see only the shaft of the forceps on the operation screen, the forceps tip is completely hidden from the subjects.

This task was conducted by the robot operation with and without the force feedback function. If the position of the building blocks was not clearly identified or a block was not stacked onto other building blocks, the trial was considered a failure. The success rate was computed from 10 trials per subject.

6.2 Experimental Result

1) Contact judgement

The results of the contact judgement are summarized in Table 3. In the robot operation, subject A successfully detected contact in 18 out of 20 trials (a success rate of 90%), whereas Subject B was successful in all trials. Therefore, both subjects clearly identified the contact with a soft tennis ball, verifying the functionality of the force feedback. The subject A failed in two trials. This is because when the tip of the forceps contacts the soft tennis ball, the force sensor attached in the root of the forceps cannot detect

the contact due to the deflection of the forceps shaft.

In the manual operation, the force was directly detected by the forceps; hence, the judgment rate was 100%.

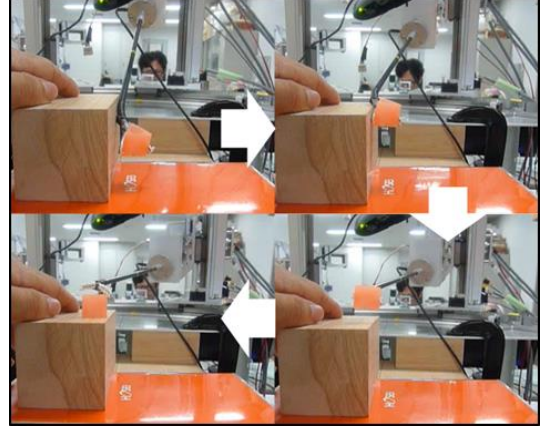


Fig. 12. Snapshots of the obstacle avoidance task.

Table 3. Results of judging contact with an obstacle.

	Subject:A		Subject:B	
	Count	Rate [%]	Count	Rate [%]
Robot Operation	18/20	90	20/20	100
Manual Operation	20/20	100	20/20	100

2) Obstacle avoidance

The results of the obstacle avoidance task are summarized in Table 4. In the robot operation with force feedback function (Force FB ON), the avoidance success rate of both subjects was 100%, indicating proper contact with the obstacle. In the robot operation without force feedback function (Force FB OFF), the robot failed in all but one attempt. In the manual operation, the force was detected by the forceps, and the success rate was 100%.

Table 4. Results of the obstacle avoidance experiment.

	Subject:A		Subject:B	
	Count	Rate [%]	Count	Rate [%]
Robot Operation (ForceFB ON)	10/10	100	10/10	100
Robot Operation (ForceFB OFF)	1/10	10	0/10	0
Manual Operation	10/10	100	10/10	100

7. Discussion

In the block transfer experiment, the robot operation required an average of 70 s to complete the task, whereas manual operation required 86 s. The faster completion time in the robot operation was attributed to the equivalent left and right manipulation ability of the robot, and the intuitive tasking by the position tracking control.

In addition, in the right-hand robot arm, the subject was able to control the bending angle of the forceps tip arbitrarily during the experiment. Therefore, the robot's timing in the block transfer experiment might also have been shortened by the ability to grasp at a suitable angle.

The block transfer experiments demonstrated the usefulness of the surgical robot for SPS. However, in the ligation operation experiment, manual operation required less time than the robot operation. Furthermore, within the narrow operating space of the

surgical robot, it is difficult to tie a tight knot in the suture. In further developments, we must adapt a proprietary ligation method to the surgical robot, adding the bending function of the forceps tip to both robot arms.

The force feedback function enables contact detection when the forceps tip touches an obstacle outside the operation screen. The experimental results verified the effectiveness of the force feedback function. However, when a small load was applied to the forceps tip, the small contact to the forceps tip was not easily detected by the force sensor attached in the root of the forceps.

8. Conclusion

This study investigated the performance of the developed SPS surgical robot HASROSS and compared it with that of manual operation. The usability of the surgical robot was validated in a mock ligation operation and in block transfer experiments. In addition, the force feedback function of the SPS surgical robot was verified in contact detection and obstacle avoidance experiments.

In future work, we will evaluate the maneuverability of our SPS surgical robot by adding a grasping force feedback function.

References

- (1) I. S. Gill, et al. : "Consensus statement of the consortium for laparoendoscopic single-site surgery", *Surg Endosc*, Vol.24, No.4, pp.762-768 (pub. April 2010)
- (2) R. H. Taylor and D. Stoianovici : "Medical robotics in computer-integrated surgery", *IEEE Trans. Robot. Autom.*, Vol.19, No.5, pp.765-781 (pub. Oct. 2003)
- (3) J. Ding, R. E. Goldman, K. Xu, P. K. Allen, D. L. Fowler, and N. Simaan : "Design and coordination kinematics of an insertable robotic effectors platform for single-port access surgery", *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, Vol.18, No.5, pp.1612-1624 (pub. Oct. 2013)
- (4) Marco Piccigallo, et al. : "Design of a novel bimanual robotic system for single-port laparoscopy", *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, Vol.15, No.6, pp.871-878 (pub. Dec. 2010)
- (5) Y. Sekiguchi, et al. : "Development of a tool manipulator driven by a flexible shaft for single port endoscopic surgery", 3rd *Proc. IEEE RAS & EMBS Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechanics*, pp.120-125 (pub. Sept. 2010)
- (6) M. Mitsuishi, N. Sugita, and P. Pitakwatchara : "Force-feedback augmentation modes in the laparoscopic minimally invasive telesurgical system", *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, Vol.12, No.4, pp.447-454 (pub. Aug. 2007)
- (7) D. Yamaoka, K. Oiwa, S. Maeda, and C. Ishii : "Development of a surgical robot for single-port surgery and its position tracking control", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomechanics*, pp.41-46 (pub. 2014)
- (8) A. M. Derossis, J. Bothwell, H. H. Sigman, and G. M. Fried : "The effect of practice on performance in a laparoscopic simulator", *Surg. Endos.*, Vol.12, No.9, pp.1117-1120 (pub. Sept. 1998)
- (9) M. C. Vassiliou, et al. : "The MISTELS program to measure technical skill in laparoscopic surgery: Evidence for reliability", *Surg. Endos.*, Vol.20, No.5, pp.744-747 (pub. May 2006)
- (10) J. D. Raman, J. A. Cadeddul, P. Raol, and A. Rane : "Single-incision laparoscopic surgery initial urological experience and comparison with natural-orifice transluminal endoscopic surgery", *BJU Int.*, Vol.101, No.12, pp.1493-1496 (pub. June 2008)
- (11) C. A. Boneau : "The effects of violations of assumptions underlying the t test", *Psychological Bulletin*, Vol.57, pp.49-64 (pub. Jan. 1960)

付録 D : International Conference on Biomedical Engineering
and Technology (ICBET 2016)投稿論文

Maneuverability Evaluation of a Surgical Robot for Single-Port Surgery

Katsuaki Oiwa
Hosei University, Tokyo, Japan
Email: katsuaki.oiwa.st@stu.hosei.ac.jp

Shotaro Maeda and Chiharu Ishii
Hosei University, Tokyo, Japan
Email: c-ishii@hosei.ac.jp

Abstract—This study evaluates the operability of a surgical robot for single-port surgery (SPS) developed in our laboratory. The surgical robot operates under master–slave control implemented by the haptic interface Omega 7 and is reinforced with a force feedback mechanism. The maneuverability of the surgical robot system was assessed in a block transfer experiment and a ligation experiment. The completion times of forceps manipulation by robot operation were compared with those of manual operation. To assess the force feedback functionality of the surgical robot, we tested whether the robot could properly contact and avoid obstacles when using the forceps. The results verified the effectiveness of the surgical robot system for SPS.

Index Terms—surgical robot, single-port surgery, maneuverability evaluation, force feedback

I. INTRODUCTION

In recent years, minimally invasive surgery has become the preferred option in hospitals, but it requires accurate and delicate operation in a small workspace with a limited field of vision, demanding considerable skill of the surgeon. Single-port surgery (SPS) has been lately embraced by laparoscopic surgeons [1]. Various surgical robots controlled by a teleoperated master–slave system such as the da Vinci system have also been developed and used in conventional laparoscopic surgery [2]. Other surgical robots have been designed for SPS [3]–[8]. In addition, to perform minimally invasive surgery, only visual information is provided in the conventional robotic systems. Force feedback is particularly beneficial in surgical robot systems, as it improves the surgeon’s dexterity and enhances the operability of surgical robots in telesurvey execution [9] and [10].

Our originally developed surgical robot for SPS is described in [11]. We analyzed the kinematics of the developed surgical robot and proposed a position control method based on inverse kinematics as an intuitive control.

The present study evaluates the maneuverability of the surgical robot for SPS. To this end, we assigned four tasks to the surgical robot and compared its performance

against manual operation using commercially available forceps.

The first task is block transfer in which the robot grips and moves the block. The robot also performs the Task1 Peg transfer described in [12] and [13]. The second task is a ligating operation using a surgical suture. The third and fourth tasks are contact detection of a soft tennis ball and obstacle avoidance, respectively.

These tasks are experimentally performed in manual and robot operations. The maneuverability of the surgical robot is evaluated by comparing these results.

II. SURGICAL ROBOT FOR SINGLE-PORT SURGERY

A. Single-port Surgery

In conventional laparoscopic surgery, the forceps and laparoscope are inserted through incision holes on the body surface. However, in SPS, they are inserted through a single-incision hole on the umbilicus. The scar is almost unnoticeable because the incision trace is indistinguishable from the umbilical wrinkle pattern [14]. Therefore, SPS yields a better aesthetic outcome than conventional laparoscopic surgery. In addition, SPS reduces the risk of adhesion-based postoperative complications because of its much lower invasiveness than the conventional method.

B. Experimental Devices

Fig. 1 shows the haptic device Omega 7 produced by Force Dimension, used as a master device for teleoperation control of the developed SPS surgical robot. Omega 7 can perform seven DOF operations: translational motions along three axes, rotary motions around these three axes, and a grasping motion around one axis. In addition, force feedback is available for the translational motions and the grasping motion.

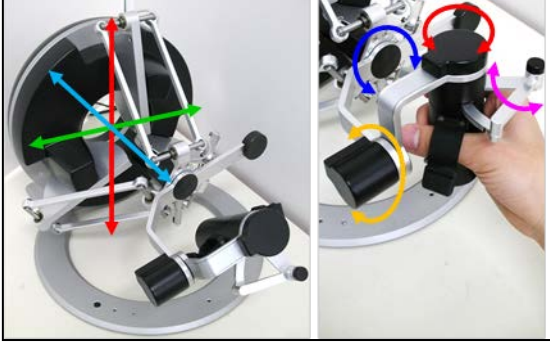


Figure 1. Haptic device Omega 7 and its manipulations (left panel indicates the yaw, pitch, and translational motions; right panel indicates the rotational motions (blue, red, yellow) and the grasping motion (pink).)

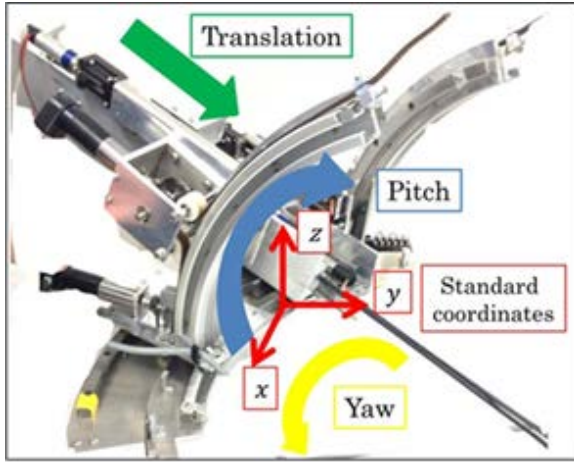


Figure 2. Overview of the SPS surgical robot.

Fig. 2 shows an overview of the SPS surgical robot. The surgical robot consists of two forceps manipulators and two robotic arms. The laparoscope is assumed to be operated manually by a laparoscopic camera assistant. As shown in Fig. 2, the surgical robot for SPS can perform yaw, pitch, and translational motions.

For this study, the surgical robot is also equipped with a force feedback function. A six-axis force sensor is attached in the root of the forceps shaft as shown in Fig. 3. Therefore, the system will detect loads applied to the shaft of the forceps. In tasks 3 and 4, the contact force was fed back to the operator through the Omega 7. The feedback force was based on the force measured by the sensor.

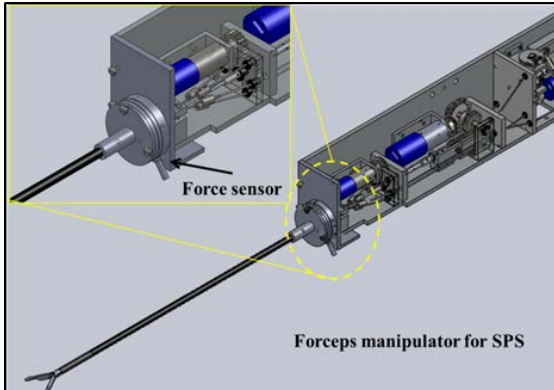


Figure 3. Forceps manipulator for SPS.

C. Kinematics

The standard coordinates (x, y, z) are set in the center of the curved guide of the surgical robot. Two Omega 7s and the SPS surgical robot are then placed as shown in Fig. 4.

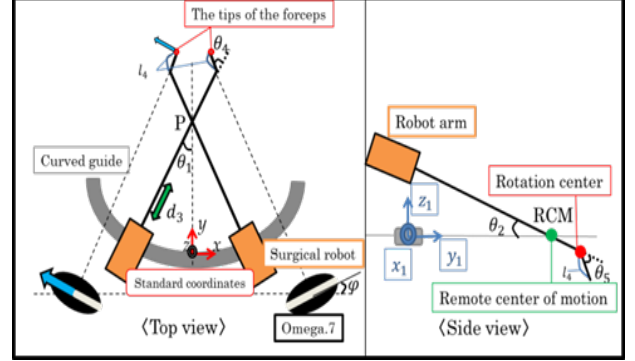


Figure 4. Placement of the surgical robot and Omega 7.

This arrangement is called the home position. In the position tracking control, intuitive operation is realized so that the moving direction of the forceps tip coincides with the operating direction of Omega 7. An example is indicated by the blue arrow in Fig. 4, in which the right side surgical robot is controlled using the left side Omega 7. To achieve intuitive operation, we developed the following forward and inverse kinematics of the developed surgical robot.

The forward kinematics are solved through a simultaneous transformation matrix, which converts the standard coordinates to the coordinates at the tip of the forceps, denoted as ${}^{L0}T_{L6}$.

$${}^{L0}T_{L6} = {}^{L0}T_{L1} {}^{L1}T_{L2} {}^{L2}T_{L3} {}^{L3}T_{L4} {}^{L4}T_{L5} {}^{L5}T_{L6} \quad (1)$$

The end position of the left-side robotic arm with forceps manipulator in the standard coordinates is obtained by multiplying the origin vector ${}^{L6}p = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$ from the right side of (1).

In this study, we seek a numerical solution to the inverse kinematics using the Jacobian matrix.

Then, by Newton's method, we obtain:

$$\begin{aligned} \theta_{new} &= \theta_{old} + \Delta\theta \\ &= \theta_{old} + J^{-1}\Delta r \\ &= \theta_{old} + J^{-1}(r_{new} - r_{old}). \end{aligned} \quad (2)$$

The previous angle of the robotic arm θ_{old} is measured by encoders mounted on the drive motors of the robotic arm, and r_{new} and r_{old} are detected by Omega 7. r_{new} and r_{old} represent a current tip position and the tip position from one step before. Thus, the updated angle of the robotic arm θ_{new} is obtained by numerically solving the inverse kinematics. Details are given in [11].

D. Control methodology

The target angular displacement θ_{new} is provided to the surgical robot at each sampling time. As explained above, the target angle is found by numerically solving the inverse kinematics by Newton's method. Tracking the

target angular displacement provides a suitable position tracking control of the forceps tip.

The controller is a proportional-integral-derivative controller. The position of the forceps tip is tracked in the operating direction of the Omega 7. The control program was written in MATLAB/Simulink software. As the interface board, we used a digital controller (PCIA04; Inteco Co., Ltd.). The motor amplifier comprised a bipolar power supply (Metronix Inc.) and a VoltPAQ-X4 (Quanser Corp.)

III. OPERATING RANGE

In the first experiment, we evaluated the operating range of the forceps tip by robot operation using the surgical robot and by manual operation using the commercially available SPS forceps. The forceps used in the manual operation were commercially manufactured for SPS by Covidien Ltd.

A. Operating Range Experiment

In this experiment, two SPS forceps and an aluminum rod that mimics a laparoscope were inserted in crossover fashion into the single-incision laparoscopic surgery (SILS) port made by Covidien Ltd. Two of them were fixed to prevent their interference and another one was moved freely. The locus of the maximum movable range was traced onto a grid paper by a pen mounted at the tip of the rod and the forceps. The experiments were sequentially performed for the rod and the forceps. The SILS port was placed 15 cm from the grid paper as shown in Fig. 5. The experiment was carried out for robot operation using the surgical robot and for manual operation using the SPS forceps.

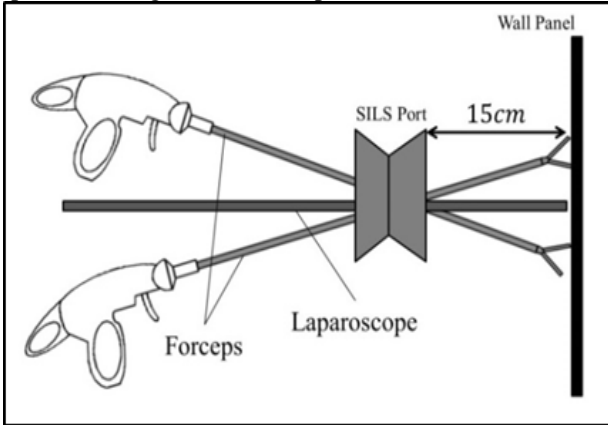


Figure 5. Schematic of the operating range experiment.

B. Experimental Results

The results of the operating range experiment are summarized in Table I.

For all the manipulated parts, manual operation of the SPS forceps far exceeded the maximum range of movement of the surgical robot's operation. This result is attributed to the limited operating area of the surgical robot, which narrows the movement range of the robot operation. However, it should be mentioned that the maximum movable range of the actual surgery is smaller

than the movable range of measurement by manual operation.

TABLE I. RESULTS OF THE OPERATING RANGE EXPERIMENT

	Robot operation [mm ²]	Manual operation [mm ²]
Forceps A	8189	13000
Forceps B	5670	16375
Laparoscope	7419	11520
TOTAL	21278	40895

IV. EVALUATION EXPERIMENT OF BLOCK TRANSFER

The maneuverability of the surgical robot was evaluated in block transfer tasks. The subject was a healthy 23-year-old male who is not a medical worker but is sufficiently familiar with forceps operation. The control program was created using MATLAB/Simulink software.

A. Experimental Methodology

The equipment of the evaluation experiment was set up as shown in Fig. 6.



Figure 6. Setup of the block transfer experiment.

The block transfer tasks were performed with VTi medical Dexterity Blocks. In the block transfer experiments, three blocks were sequentially manipulated by the nondominant hand of the subject. The subject was required to transfer the object in midair to his dominant hand and then place the block on the opposite side of the board. The time to transfer three blocks was recorded.

10 block transfer tasks were conducted for the robot operation and the manual operation. The manual operations were performed in a cage, limiting the operations to the maximum movable range of the surgical robot. In this experiment, the bending angle of the forceps during the manual operation was fixed at approximately 30°. The bending angle of the right forceps (θ_4 in Fig.4) of the robot operation was fixed at approximately 30°, and the bending angle of the left forceps was arbitrary changed depending on the hand operation.

The incident angle in the operating shaft relative to the operating face of the block board of the forceps was fixed

at approximately 50°–60°. During this experiment, the surgical robot was operated without the force feedback function. The obtained results were analyzed to evaluate the maneuverability of the surgical robot for SPS.

B. *T*-test

The *t*-test evaluates the statistical significance of different results. Specifically, if the average values of two samples selected from a population appear to differ, the *t*-test determines whether the difference is likely to be real [15]. In our experiments, we evaluated whether the task completion time differed between the robot and manual operations.

The probability, called the *p*-value, actually measures the probability that differences among groups obtained during an experiment are chance occurrences. We considered that *p*-values were significant at the 0.05 level, because this means that the average completion times coincide between the manual and robot operations at a 5%.

C. *Experimental Result*

The results of the block transfer experiment are shown in Table II and Fig. 7. Fig. 8 plots the learning curve representing the time required for familiar operation. The blue and red bars in Fig. 7 represent the average task completion times of the manual operation and robot operation, respectively, and the thin black lines extend from the earliest to the latest completion time.

Clearly, the robot operation completed the task earlier than the manual operation, and the difference was statistically significant because $p = 0.0472$ was obtained. Therefore, the difference between the average task completion times was not due to accidental errors.

The learning curve demonstrates that by the 10th trial, the completion time of both manual and robot operations had reached its minimum. In the first few trials, the robot operation was accomplished faster than manual operation because the robot performs right and left operations with equal competency.

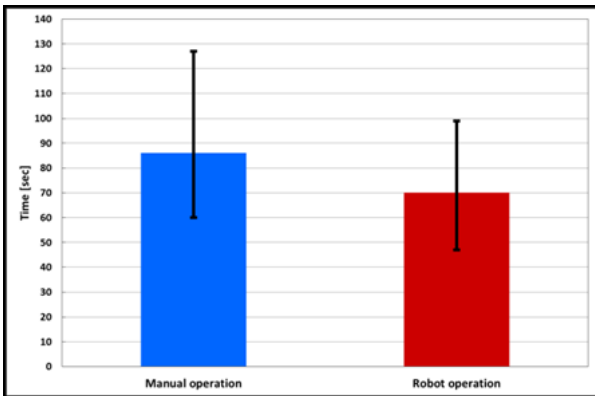


Figure 7. Time required for the block transfer task.

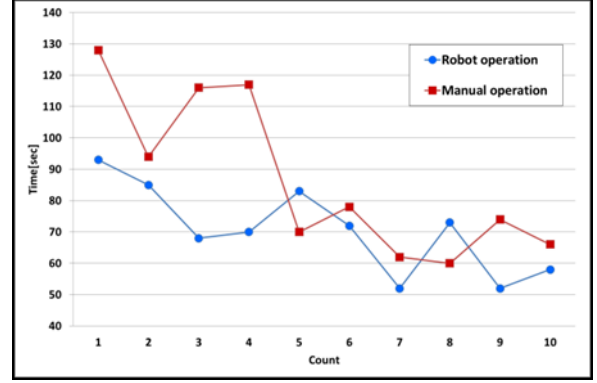


Figure 8. Learning curve in the block transfer experiment.

TABLE II. RESULTS OF THE BLOCK TRANSFER EXPERIMENT

		Robot operation	Manual operation
Count	1	1:33	2:08
	2	1:25	1:34
	3	1:08	1:56
	4	1:10	1:57
	5	1:23	1:10
	6	1:12	1:18
	7	0:52	1:02
	8	1:13	1:00
	9	0:52	1:14
	10	0:58	1:06
Average		1:10	1:26

V. LIGATION OPERATION

To evaluate the surgical robot in a more practical setting, the robot performed ligation using a medical nylon suture, and its performance was compared with that of manual operation. The subject was a 23-year-old male who is not a medical worker but sufficiently accustomed to forceps operation.

A. *Experimental Methodology*

The manual operation was performed in no-cage and in cage situations, limiting the maximum movable range to that of the surgical robot. The ligation operation was performed four times by the manual operation and the robot operation, and the average completion time was calculated. The equipment of the ligation operation experiment is shown in Fig. 9. In this experiment, the surgical robot was operated without the force feedback function.

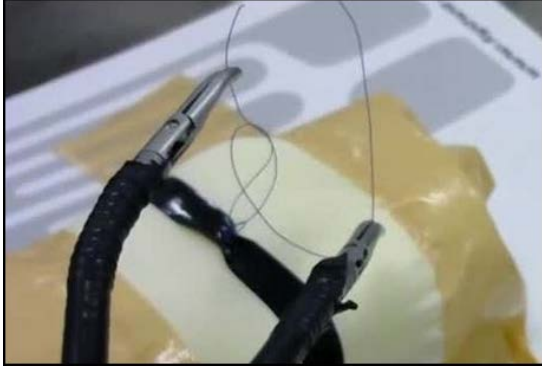


Figure 9. Appearance of the ligation experiment

B. Experimental Results

The robot operation required 28 s on average to complete the ligation procedure against 21 s by the manual operation in an unrestrained operating area and 24 s by the manual operation in the caged area.

The completion times of the manual operation were shorter than that of the robot operation. One of the reasons of this is considered as follows. Because the maximum movable range of the surgical robot is narrower than in the normal manual operation, large left and right movements for ligation operation are prevented under this condition.

VI. EVALUATION EXPERIMENT OF FORCE FEEDBACK

A. Experimental Methodology

During laparoscopic surgery, there is risk of organ damage when the surgical instruments contact the organ outside of the endoscope's field of view. Generally, the robots cannot detect contacted obstacles unless they elicit a tactile response.

Therefore, this experiment examined the judgment rate of the surgical robot when contacting obstacles outside the operation screen and compared the judgement performance with that of manual operation. For this purpose, the robot was equipped with the force feedback function.

After judging the contact obstacles from force feedback alone, the subject was required to avoid the obstacle. The force feedback function of the surgical robot was evaluated in two tasks. The human subjects were two students with sufficient knowledge of forceps operation.

As for the motion scaling of displacement, the forceps tip follows half of the movement of Omega 7, and as for the haptic feedback, doubled force was presented to the Omega 7.

1) Contact judgement

Fig. 10 shows the equipment of the contact judgement experiment. The subject moved the forceps tip to the left and the right without looking at the forceps tip. An obstacle was touched to the forceps tip by the experimental collaborator. The obstacle was a soft tennis

ball mimicking the softness of an organ. The subjects were required to declare when they sensed contact with the tennis ball.

This task was conducted by the manual operation and the robot operation with the force feedback function. The case of "unsure contact" was considered a failure. The judgment rate of each subject was measured in 20 trials per subject.

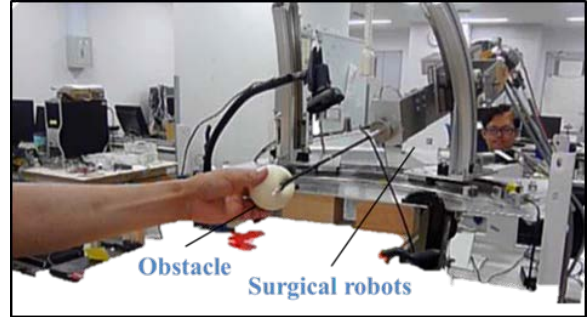


Figure 10. Experiment of obstacle contact judgment.

2) Obstacle avoidance

Snapshots of the obstacle avoidance task are presented in Fig. 11. The subjects started the experiment with grasping the block used in the block transfer experiment. Then, without looking at the forceps tip, the subject stacked it onto other specified building blocks by pushing the forceps tip to the sidewall of the building blocks, where the stack height was randomly selected. Since the subjects see only the shaft of the forceps on the operation screen, the forceps tip is completely hidden from the subjects.

This task was conducted by the robot operation with and without the force feedback function. If the position of the building blocks was not clearly identified or a block was not stacked onto other building blocks, the trial was considered a failure. The success rate was computed from 10 trials per subject.

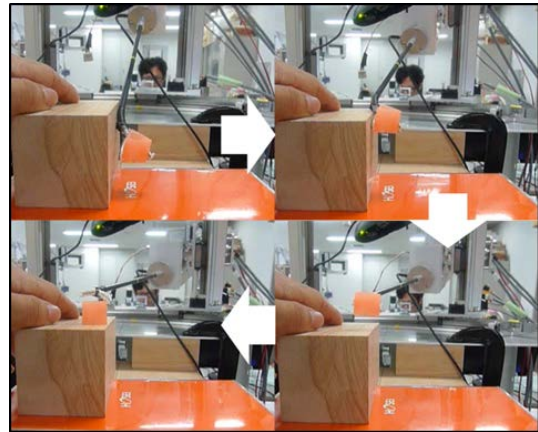


Figure 11. Snapshots of the obstacle avoidance task.

B. Experimental Results

1) Contact judgement

The results of the contact judgement are summarized in Table III. In the robot operation, subject A successfully

detected contact in 18 out of 20 trials (a success rate of 90%), whereas Subject B was successful in all trials. Therefore, both subjects clearly identified the contact with a soft tennis ball, verifying the functionality of the force feedback. The subject A failed in two trials. This is because when the tip of the forceps contacts the soft tennis ball, the force sensor attached in the root of the forceps cannot detect the contact due to the deflection of the forceps shaft.

In the manual operation, the force was directly detected by the forceps; hence, the judgment rate was 100%.

TABLE III. RESULTS OF JUDGING CONTACT WITH AN OBSTACLE

	Subject:A		Subject:B	
	Count	Rate [%]	Count	Rate [%]
Robot Operation	18/20	90	20/20	100
Manual Operation	20/20	100	20/20	100

2) Obstacle avoidance

The results of the obstacle avoidance task are summarized in Table IV. In the robot operation with force feedback function (Force FB ON), the avoidance success rate of both subjects was 100%, indicating proper contact with the obstacle. In the robot operation without force feedback function (Force FB OFF), the robot failed in all but one attempt. In the manual operation, the force was detected by the forceps, and the success rate was 100%.

TABLE IV. RESULTS OF THE OBSTACLE AVOIDANCE EXPERIMENT

	Subject:A		Subject:B	
	Count	Rate [%]	Count	Rate [%]
Robot Operation (ForceFB ON)	10/10	100	10/10	100
Robot Operation (ForceFB OFF)	1/10	10	0/10	0
Manual Operation	10/10	100	10/10	100

VII. DISCUSSION

In the block transfer experiment, the robot operation required an average of 70 s to complete the task, whereas manual operation required 86 s. The faster completion time in the robot operation was attributed to the equivalent left and right manipulation ability of the robot, and the intuitive tasking by the position tracking control.

In addition, in the right-hand robot arm, the subject was able to control the bending angle of the forceps tip arbitrarily during the experiment. Therefore, the robot's timing in the block transfer experiment might also have been shortened by the ability to grasp at a suitable angle.

The block transfer experiments demonstrated the usefulness of the surgical robot for SPS. However, in the ligation operation experiment, manual operation required less time than the robot operation. Furthermore, within the narrow operating space of the surgical robot, it is difficult to tie a tight knot in the suture. In further developments, we must adapt a proprietary ligation method to the surgical robot, adding the bending function of the forceps tip to both robot arms.

The force feedback function enables contact detection when the forceps tip touches an obstacle outside the operation screen. The experimental results verified the effectiveness of the force feedback function. However, when a small load was applied to the forceps tip, the small contact to the forceps tip was not easily detected by the force sensor attached in the root of the forceps.

VIII. CONCLUSION

This study investigated the performance of our developed SPS surgical robot and compared it with that of manual operation. The usability of the surgical robot was validated in a mock ligation operation and in block transfer experiments.

In addition, the force feedback function of the SPS surgical robot was verified in contact detection and obstacle avoidance experiments.

In future work, we will evaluate the maneuverability of our SPS surgical robot by adding a grasping force feedback function.

REFERENCES

- [1] I. S. Gill, et al., "Consensus statement of the consortium for laparoendoscopic single-site surgery," *Surg Endosc*, vol. 24, no. 4, pp. 762-768, April 2010.
- [2] R. H. Taylor and D. Stoianovici, "Medical robotics in computer-integrated surgery," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 19, no. 5, pp. 765-781, Oct. 2003.
- [3] J. Ding, R. E. Goldman, K. Xu, P. K. Allen, D. L. Fowler, and N. Simaan, "Design and coordination kinematics of an insertable robotic effectors platform for single-port access surgery," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 18, no. 5, pp. 1612-1624, Oct. 2013.
- [4] Marco Piccigallo, et al., "Design of a novel bimanual robotic system for single-port laparoscopy," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 15, no. 6, pp. 871-878, Dec. 2010.
- [5] Y. Sekiguchi, et al., "Development of a tool manipulator driven by a flexible shaft for single port endoscopic surgery," *3rd Proc. IEEE RAS & EMBS Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechanics*, pp. 120-125, Tokyo, 2010.
- [6] Andrea Bajo, et al., "Integration and Preliminary Evaluation of an Insertable Robotic Effectors Platform for Single Port Access Surgery," *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.3381-3387, May 2012.
- [7] Se-gon Roh, et al., "Development of the SAIT Single-Port Surgical Access Robot-Slave Arm Based on RCM Mechanism," *EMBC, 2015 37th Annual International Conference of the IEEE*, pp. 5285-5290, Aug. 2015.
- [8] G. Tortora et al., "Design of Miniature Modular in vivo Robots for Dedicated Tasks in Minimally Invasive Surgery," *IEEE/ASME AIM*, pp. 327-332, July 2011.
- [9] M. Mitsuishi, N. Sugita, and P. Pitakwatchara, "Force-feedback augmentation modes in the laparoscopic minimally invasive telesurgical system," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 12, no. 4, pp. 447-454, Aug. 2007.
- [10] C. R. Wagner, et al., "The benefit of force feedback in surgery: Examination of blunt dissection," *Presence: Teleoperators Virtual Environ.*, vol. 16, no. 3, pp.252-262, 2007.
- [11] D. Yamaoka, K. Oiwa, S. Maeda, and C. Ishii, "Development of a surgical robot for single-port surgery and its position tracking control," *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics*, pp. 41-46, Dec. 2014.
- [12] A. M. Derossis, J. Bothwell, H. H. Sigman, and G. M. Fried, "The effect of practice on performance in a laparoscopic simulator," *Surg. Endos.*, vol. 12, no. 9, pp. 1117-1120, Sept. 1998.
- [13] M. C. Vassiliou, et al., "The MISTELS program to measure technical skill in laparoscopic surgery: Evidence for reliability," *Surg. Endos.*, vol. 20, no. 5, pp. 744-747, May 2006.

- [14] J. D. Raman, J. A. Cadeddul, P. Raol, and A. Rane, "Single-incision laparoscopic surgery initial urological experience and comparison with natural-orifice transluminal endoscopic surgery," *BJU Int.*, vol. 101, no. 12, pp. 1493-1496, June 2008.
- [15] C. A. Boneau, "The effects of violations of assumptions underlying the t test," *Psychological Bulletin*, vol.57, pp. 49-64, Jan. 1960.



Katsuaki Oiwa received his BE in Mechanical Engineering from Hosei University, Japan in 2013. Currently, he is a Master Course student at Graduate School of Engineering, Hosei University, Japan. His research interest is in medical robotics.



Shotaro Maeda received his BE in Mechanical Engineering from Hosei University, Japan in 2013. Currently, he is a Master Course student at Graduate School of Engineering, Hosei University, Japan. His research interest is in medical robotics.



Chiharu Ishii received his PhD in Mechanical Engineering from Sophia University, Japan in 1997. From 2002 to 2009, he was an Assistant Professor with Kogakuin University. Currently, he is a Professor at the Department of Mechanical Engineering, Hosei University, Japan. His research interests are in medical robotics, assistive technology and robust control. He is a member of JSME, SICE, RSJ, IEEJ and IEEE.