法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-04

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

大岩, 克耀 / OIWA, Katsuaki

(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)
57
(開始ページ / Start Page)
1
(終了ページ / End Page)
8
(発行年 / Year)
2016-03-24
(URL)
https://doi.org/10.15002/00012927

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”

大岩克耀
Katsuaki OIWA
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

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. 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.

***Key Words** : Surgical robot, Single port surgery, Maneuverability evaluation, Force feedback*

１．緒論

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．腹部体表面に複数の孔を開け，鉗子・腹腔鏡を挿入して行う一般的な内視鏡下手術を多孔式腹腔鏡下手術と呼ぶ．これに対し，臍部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．

また，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が開発され，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[1]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．また，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，その有用性を報告している SPS 支援用ロボットが存在する[2]．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[3],[4],[5]．

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)[6],[7]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[8]．そこで本研究では，開発した SPS 支援用ロボット HASROSS の有用性の評価を行うことを目的とする．

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，本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．

本研究では，開発した 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[9],[10]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 つ目は力覚フィードバック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，ならびに力覚フィードバックの有用性の評価を行う．

２．単孔式腹腔鏡下手術(SPS)支援用ロボット

（１）単孔式腹腔鏡下手術(SPS)

近年，SPS の術式や具体的な症例などについての報告が急速に増加している．河内らは泌尿器科領域における SPS の術式および手術成績を報告している[11]．SPS は切開孔が減ることから，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，手術の難度を高めていることが挙げられる．

（２）SPS 支援用ロボット HASROSS の概要

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．

図 1 に SPS 支援用ロボット HASROSS の全体図を示す．また，図 2 にマスタデバイスとして使用する Force Dimension 社製の力覚提示付デバイス Omega.7[12] 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 自由度の操作が可能な入力装置で，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．微細な力覚提示が可能であり，精密な動きが必要とされる遠隔操作デバイスとして用いられている．

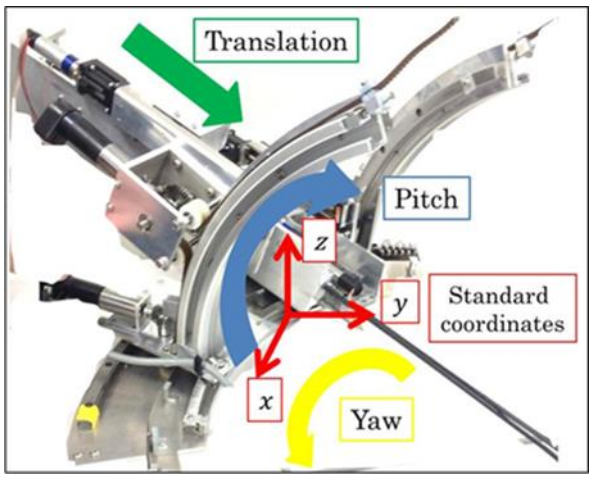

Fig.1　Overview of the SPS surgical robot HASROSS

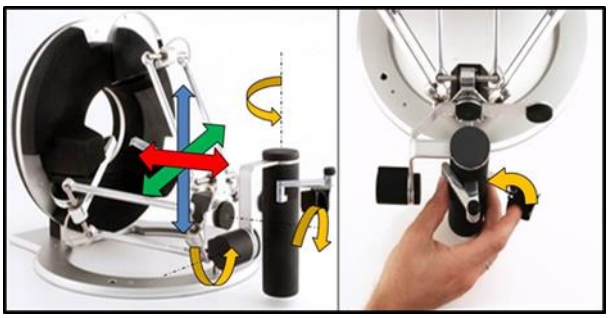

Fig.2　Haptic device Omega 7 and its manipulations

さらに，本研究において使用する SPS 支援用ロボット HASROSS は，力覚フィードバック機能を有している．図 3 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．

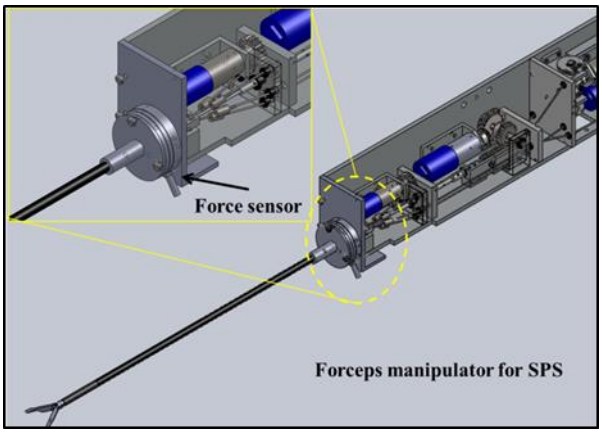

Fig.3　Forceps manipulator for SPS with force sensor

（３）運動学

図 1 および図 4 左に示すように，曲線ガイドの中心に基準座標系(x, y, z)を設定し，基準座標系に対して図 4 に示すように支援用ロボットおよび Omega.7 を配置する．

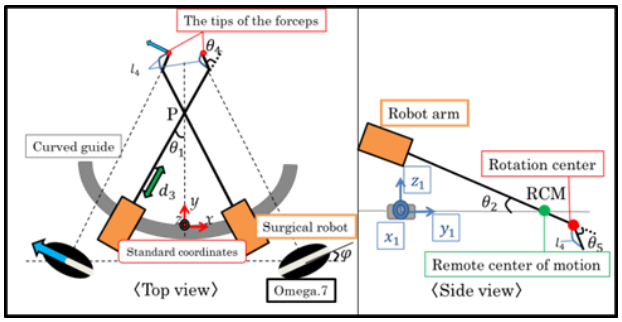

Fig.4　Placement of surgical robots and Omega.7s

この配置を定常位置とし，Omega.7 の操作方向に鉗子先端の位置が追従するように制御する．例えば，図 4 左の青矢印で示すように，左手側の Omega.7 による並進左方向の操作に対して，右側の支援用ロボットの鉗子先端の位置を左方向に追従させる．これを実現するために，開発した SPS 支援用ロボット HASROSS の順運動学と逆運動学を解析したところ，以下のような結果が得られている．

順運動学の解は，同次変換行列を用いて求めることができる．基準座標から左側の支援用ロボットの鉗子先端位置までの同次変換行列${}^{L0}\boldsymbol{T}_{L6}$は次式で表される．

$$ {}^{L0}\boldsymbol{T}_{L6} = {}^{0}\boldsymbol{T}_{L1}\,{}^{1}\boldsymbol{T}_{L2}\,{}^{2}\boldsymbol{T}_{L3}\,{}^{3}\boldsymbol{T}_{L4}\,{}^{4}\boldsymbol{T}_{L5}\,{}^{5}\boldsymbol{T}_{L6} \qquad (1) $$

(1)式の同次変換行列に，鉗子先端の座標系における原点ベクトル ${}^{6}\boldsymbol{p} = [0\ 0\ 0\ 1]^{T}$を掛けたものが，図 4 に示す基準座標系で見た左側の支援用ロボットの鉗子先端の位置となる．

また逆運動学の解は，ヤコビ行列を用いて数値解を求める．鉗子先端の現在位置，1 ステップ前の位置をそれぞれ$\boldsymbol{r}_{new}$，$\boldsymbol{r}_{old}$と表し，支援用ロボットの更新角度，現在角度をそれぞれ$\boldsymbol{\theta}_{new}$，$\boldsymbol{\theta}_{old}$と表す．このとき，ニュートン法より，次式が求まる．

$$ \begin{aligned} \boldsymbol{\theta}_{new} &= \boldsymbol{\theta}_{old} + \Delta\boldsymbol{\theta} \\ &= \boldsymbol{\theta}_{old} + \boldsymbol{J}^{-1}\Delta\boldsymbol{r} \\ &= \boldsymbol{\theta}_{old} + \boldsymbol{J}^{-1}(\boldsymbol{r}_{new} - \boldsymbol{r}_{old}) \end{aligned} \qquad (2) $$

支援用ロボットの現在角度$\boldsymbol{\theta}_{old}$はモータに取り付けたエンコーダにより測定できる．また，鉗子先端の現在位置および 1 ステップ前の位置$\boldsymbol{r}_{new}$，$\boldsymbol{r}_{old}$は Omega.7 により検出される．これより，更新角度$\boldsymbol{\theta}_{new}$，すなわち逆運動学の解が得られる．詳細については[8]に示されている．

（４）制御方法

ニュートン法を用いた逆運動学の数値解によって，サンプリング時間ごとに支援用ロボットが到達すべき角度・変位が与えられるので，これを目標角度・変位として追従制御を行うことにより，鉗子先端の位置追従制御を達成することができる．コントローラには，各変数に対して PID コントローラを使用する．

本研究では，上述のマスタスレイブ方式による位置追従制御により，Omega.7 の操作方向に鉗子先端の位置を追従させ，各タスクを遂行する．

実験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．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．

３．動作範囲確認実験

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．

（１）実験方法

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 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．

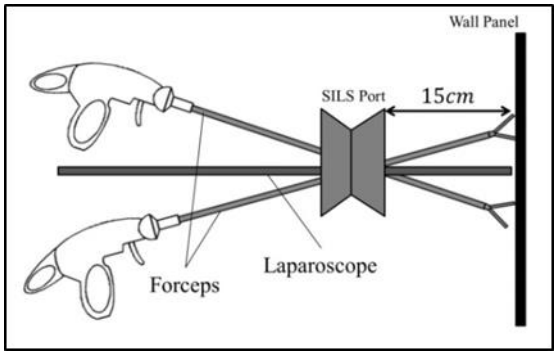

Fig.5　Schematic of the operating range experiment

（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 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．

Table1　Measured motion space

	Robot operation [㎟]	Manual operation [㎟]
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．

４．ブロック把持移動実験

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．

（1）実験方法

本実験では，VTi madical 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 にブロック把持移動実験の外観を示す．

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[7]．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°～60°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．

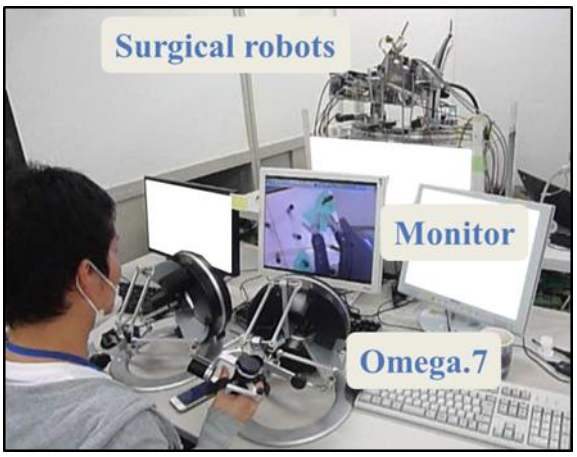

Fig.6　Setup of the block transfer experiment

（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．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．

$$t = \frac{D_{ave}}{D_{sd}/\sqrt{n}} \quad (n = 10) \tag{3}$$

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．

$$D_{sd} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n}(D(k) - D_{ave})^2}{n-1}} \quad (n = 10) \tag{4}$$

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．

$$p = \int_{-\infty}^{-t} f(t)dt + \int_{t}^{\infty} f(t)dt \tag{5}$$

ただし，

$$f(t) = \frac{\Gamma((n+1)/2)}{\sqrt{n\pi}\Gamma(n/2)}\left(1+\frac{t^2}{n}\right)^{-\frac{n+1}{2}} \tag{6}$$

$$\Gamma(x) = \int_{0}^{\infty} u^{x-1}e^{-u}du \tag{7}$$

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．

(3)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．

（3）**実験結果**

実験結果を表 2 に示す．

Table2　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 7 に示す．図 7 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．

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 8 のようになった．

図 8 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 回目に比べて短縮され，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．

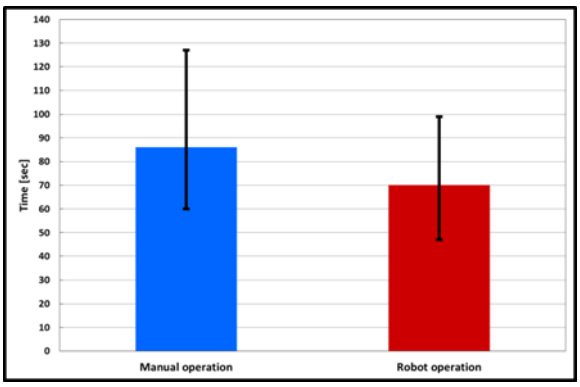

Fig.7　Time required for the block transfer task

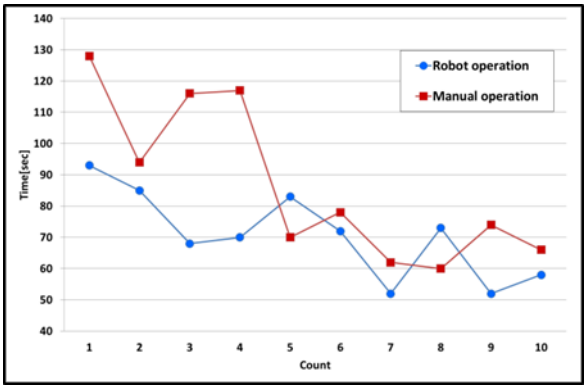

Fig.8　Learning curve in the block transfer experiment

5．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．

（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 9 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．

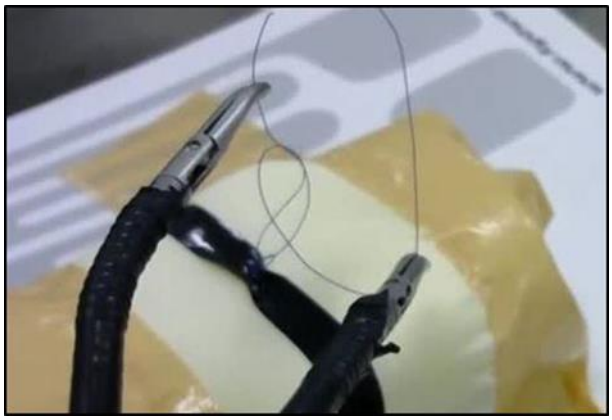

Fig.9　Appearance of ligation experiment

（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．

（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 10 にブドウの皮むき実験の様子を示す．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，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．

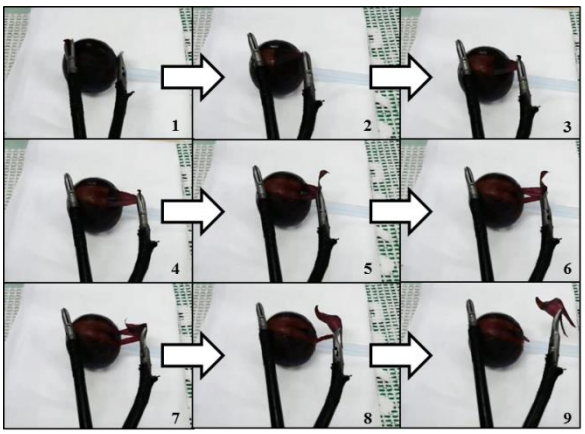

Fig.10　Appearance of the grape peeling

６．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．

（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 11 に接触判定実験の様子を示す．

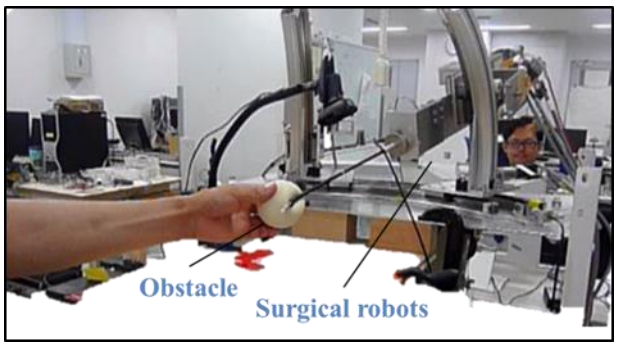

Fig.11　Experiment of the obstacle contact judgment

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 12 に障害物回避実験の様子を示す．

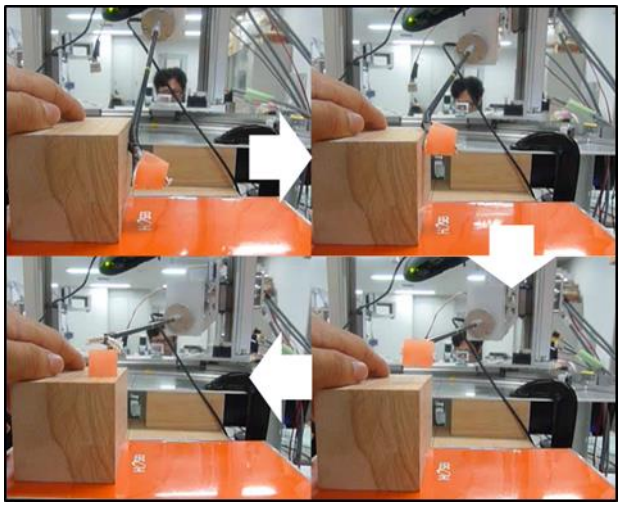

Fig.12　Snapshots of the obstacle avoidance experiment

（２）実験結果

a) 接触判定実験

実験結果を表 3 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．

Table3　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 4 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 にした場合では，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 にした場合では，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．

Table4: 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．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．

８．結論

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を評価するため，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．

参考文献

1) http://www.intuitivesurgical.com/

2) 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.

3) F. Cavallo, G. Megali, S. Sinigaglia, O. Tonet, and P. Dario, “A biomechanicalanalysis of surgeon’s gesture in a laparoscopic virtual scenario,” *Stud. Health Technol. Inf.*, Vol. 119, pp.79–84, 2006.

4) M. Mitsuishi, N. Sugita, and P. Pitakwatchara, “Force-feedback augmentationmodes in the laparoscopic minimally invasive telesurgical system,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, Vol. 12, No. 4, pp. 447–454, 2007.

5) 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.

6) Daisuke Yamaoka, Chiharu Ishii, Katsuaki Oiwa, Shotarou Maeda, “Developmant of a Surgical Robot for Single-PortSugery and its Position Tracking Control,” *Proc. of IEEE Int. Conf. on ROBIO*, pp.41-46, 2014.

7) 前田翔太郎，石井千春，山岡大祐，川村秀樹，：単孔式腹腔鏡下手術(SPS)用鉗子マニピュレータの開発と制御”，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-C02, 2014

8) 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

9) 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.

10) 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.

11) 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

12) http://www.forcedimension.com