手術ロボット鉗子シャフト部における空気圧を用いた力覚提示機構の開発

電気・化学専攻　医用工学領域　2281266　中西　芙由紀
(主査：和多田　雅哉 教授　副査：京相　雅樹 教授，小林　千尋 講師)

1. 緒言

現在の腹部外科手術では患者の早期社会復帰等，生活の質の観点から腹腔鏡下手術が注目され急速に普及している。しかし，術野の限定や力覚の欠如により手術の長時間化や難度が上昇し，術者に高度な技術が要求される。術者負担軽減のため，近年では腹腔鏡下手術にもロボット技術が導入されている。手術ロボットの多くは，術者が操作するリーダ部と患者の腹腔内で作業を行うフォロワー部に分離し，遠隔操作が可能である。術者負担は鉗子関節部の自由度の向上や 3D 画像に加え自在な視野の操作により軽減された。しかし，術者負担は未だ大きく，要因として力覚の欠如が挙げられる。

力覚が伝わらないことは鉗子での臓器圧迫による臓器損傷や病巣の確実な把握が不可能，技術習得に時間がかかる等の問題につながる。特に，シャフト部では臓器との接触が術野外となり臓器損傷起こす危険性が高まる。従って，本研究では臓器損傷を防止し安全性を高めることを目的とし，シャフト部における力覚提示を行う。また，接触時の反力，接触方向，接触範囲を術者が識別可能な機器の開発を最終目標とする。

2. 提案機構のコンセプト

本研究では，臓器損傷を防止し安全性を高めることを目的とし，シャフト部における力覚提示を行う。また，接触時の反力，接触方向，接触範囲を術者が識別可能にする機器の開発を最終目標とする。

2.1 最終目標充足のための必要条件

操作を妨げないため提示機構は両前腕に直接提示し形状はアームカバー型とする。また，最終目標充足のため提示面を 12 ブロックに分割する。図 1 に提示の範囲と方向を示す。

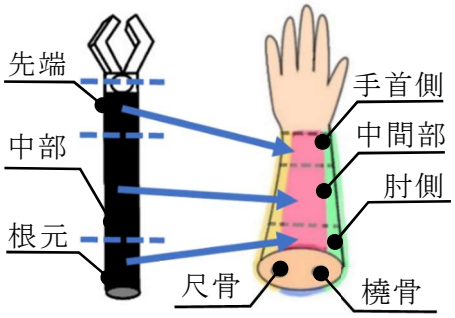


図 1　提示の範囲（右手）

図 1 に示すように，前腕を手首側・中間部・肘側の 3 範囲と上・下・左・右の 4 範囲を合わせた計 12 ブロックでの提示を行う。複数ある操作外の鉗子の対応は視覚・聴覚的な提示を行う。

2.2 提案機構の全体像

本研究では空気圧を用いた力覚提示機構を術者の前腕に装着することで接触時の反力の提示を行う。空気圧を用いることで軽量かつ前腕に装着することで基本操作を妨げない機構にする。図 2 に装着イメージ，図 3 に力覚提示機構のイメージを示す。

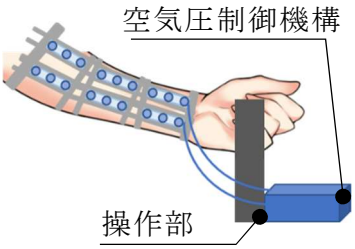


図 2　装着イメージ

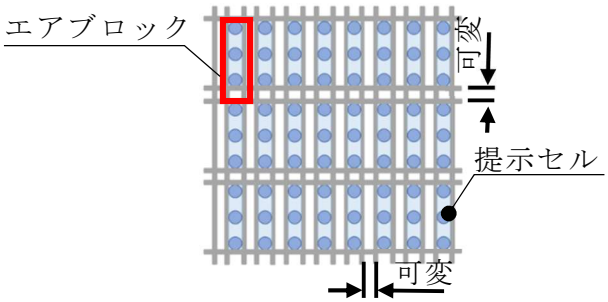


図 3　力覚提示機構イメージ

図 2 に示すように空気圧制御機構は操作部に配置することで術者の腕にかかる負担を軽減する。提示セルはシリコン製の小さな風船であり，空気圧による膨張により反力を提示する。また，エアブロック毎の間隔が変化することで術者の体格差を補う。

3. 提示セル/エアブロックの配置

12 ブロックの識別のためには提示セル，エアブロックの配置が重要である。始めにエアブロック内は複数のセルを配置するが 1 面として知覚する必要がある。次に 12 ブロックの識別のため，長軸方向は根本・中間・先端の 3 範囲に分かれて知覚する必要がある。最後に，短軸方向は隣り合うブロックは 1 面，3 ブロック隣は分かれて知覚可能にする。臓器が接触しない欠落方向が分かることで臓器の接触方向が識別可能になる。力覚提示面の分割を可能にするため調査結果を基に配置を決定する。

3.1　接触箇所/方向の違いによる 2 点弁別実験

力覚提示機構の設計を行う上で提示セルやエアブロックの配置のため前腕の感覚調査を行った。始めに被験者固有の感覚調査を行い，2 点弁別覚に異常のない被験者を対象に接触する箇所や方向により感じやすさが変わるか実験を行った。

3.1.1 実験環境/方法

図 4 に計測位置，図 5 に実験装置を示す。

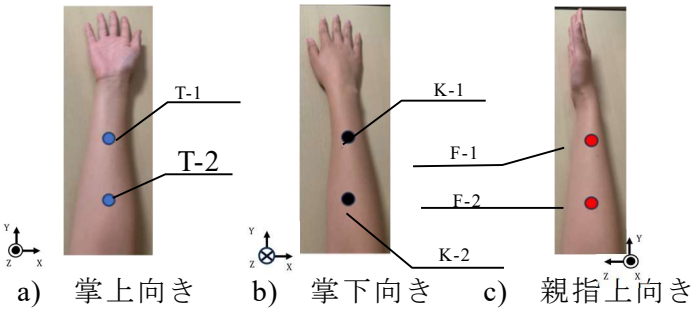


図 4　計測位置

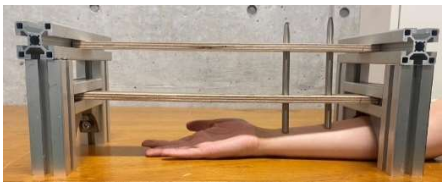


図 5　実験装置

図 4 の計測箇所の全てで長軸方向，T-1/T-2/K-1/K-2 で短軸方向に 2 点別閾の計測を行った。図 5 の実験装置内に前腕を掌が上の状態で置き，試験棒の先端に先端が丸まった針を装着した。針を一定距離から自由落下し，刺激を行った。測定方法は始めに被験者が目視で確認している状態で 1 点と 2 点で刺激した。その後，目視しない状態で 2 点間距離を 10-50[mm]中かつ 10[mm]単位で増加方向に 10 回，減少方向に 10 回，乱数で 10 回の計 30 回刺激した。回答があるまで刺激を継続し，2 点と感じた場合は「2」，1 点と感じた場合は「1」，面と感じた場合は「面」と回答した。集計時は「面」の回答は 2 点識別不可として集計した。

3.1.2 実験結果

回答を集計し，接触箇所/方向毎に距離の変化に伴う正答率を算出，正答率 60%以上になった距離を 2 点弁別閾値とした。長軸方向は被験者全員が 40[mm]以上で全範囲識別可能かつ 20[mm]以下で識別不可能であった。また，短軸方向は被験者全員が 25[mm]以上で全範囲識別可能かつ 10[mm]以下で識別不可能であった。

3.2 結果の反映

12 ブロックを術者に知覚させるためには 3.1.2 の結果を基に提示セルとエアブロックの配置を範囲内にする必要がある。また，全体の寸法は工業技術院が行った計測調査の前腕寸法の結果を基に決定した[5]。上記全ての寸法を基に力覚提示機構の設計を行った。図 6 に配置で満たすべき範囲，図 7 に機構の設計を示す。

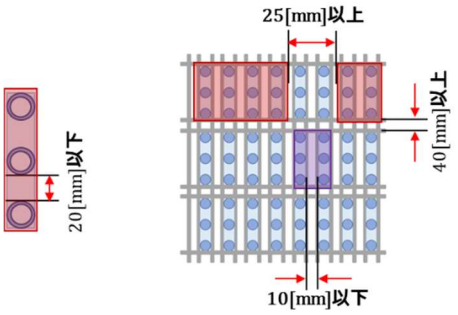
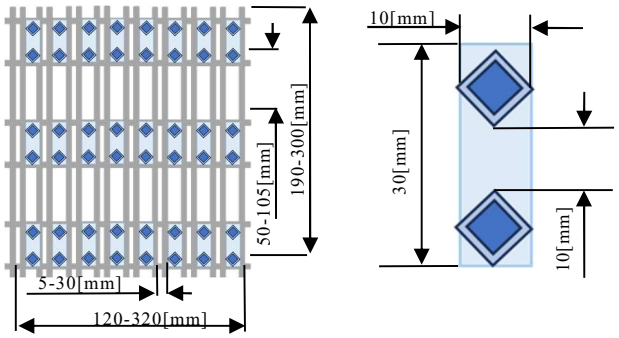


図 6　配置で満たすべき範囲



a) 提示機構の設計　　b) エアブロック

図 7　機構の設計

図 7 に示すように提示機構の全長，全幅は様々な体格の術者が装着可能になるよう前腕寸法より設計した。エアブロック間の距離は 1 面と感じるべき範囲は 2 点弁別可能距離を超えず，体格や感覚の鈍さにも対応できるよう余剰を含めて寸法に決定した。

4. 提示セル

提示セルは空気圧により膨張することで力覚を提示する。提示セルの接触面の形状は感覚の伝わりやすさに影響を及ぼすため，人がより知覚しやすい形状の選定が必要である。提示セルの形状を選定する上で応答性が良く，提示セル内は 1 点に知覚可能な形状である必要がある。従って，力覚提示機構の設計を行う上で提示セルの形状の選定のため前腕の感覚調査を行った。始めに被験者固有の感覚調査を行い，2 点弁別覚に異常のない被験者を対象に模擬セルを用いた感覚調査を行った。

4.1　表面積の違いによる 2 点弁別実験

提示セルの設計のため，表面積の違いが感覚の伝達しやすさに影響を及ぼすか実験を行った。

4.1.1 実験環境/方法

図 8 に装着具，図 9 に表面積の異なる模擬提示セルの形状，表 1 に表面積の異なる模擬提示セルの寸法を示す。

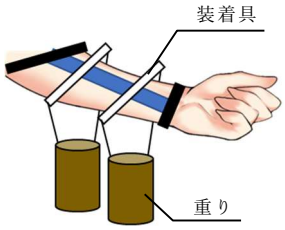


図 8　装着具

a)　4 点　　b)　リング　　c)　円

図 9　表面積の異なる模擬提示セルの形状

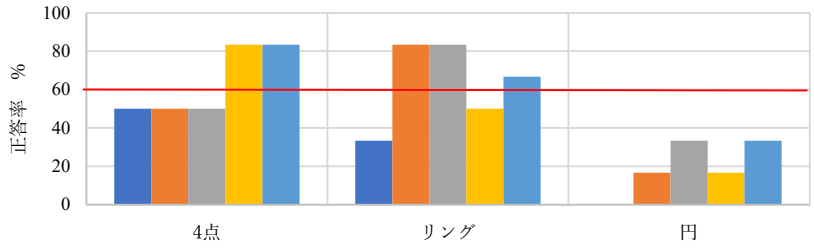
表 1　表面積の異なる模擬提示セルの寸法

形状	4 点	リング	円
表面積[mm^2]	12.6	40.1	78.5
周囲[mm]	25.1	53.4	31.4
重り[g]	128	409	801

図 8 に示した模擬セルを取り付けた装着具を腕に付けて実験を行った。刺激は模擬セル直上から圧力一定となる様，表 1 の質量の重りをぶら下げ刺激した。実験方法は，始めに被験者が目視で確認している状態で 1 点と 2 点で刺激した。その後，目視しない状態で模擬セルの間隔を 10-50[mm]中かつ 10[mm]単位で増加方向に 10 回，減少方向に 10 回，乱数で 10 回の計 30 回刺激した。回答があるまで刺激を継続し，2 点と感じた場合は「2」，1 点と感じた場合は「1」，面と感じた場合は「面」と回答した。集計時は「面」の回答は 2 点識別不可として集計した。

4.1.2 実験結果

回答を集計し，セル毎に各 2 点間距離での正答率を算出，形状と 2 点間距離に因果関係があるか調査するため 2 要因分散分析を行った。2 要因分散分析とは，実験計画と 2 つの条件群の平均値を比較する分散分析である。P 値が有意水準である 0.05 以下の場合は，対立仮説を採択する。対立仮説は，「正答率に対し，形状/距離に因果関係有り」または「正答率に対し，形状と距離に交互作用有り」とした。今回は特に形状と正答率に因果関係が生じるかに着目する。形状の違いが正答率に影響を及ぼしたのは被験者 B の結果のみであった。図 10 に表面積の異なる模擬セルでの 2 点間距離毎の被験者 B の正答率の結果を示す。



2 点間距離:■ 10[mm], ■ 20[mm], ■ 30[mm], ■ 40[mm], ■ 50[mm]

図 10　表面積の異なる模擬セルでの 2 点間距離毎の被験者 B の正答率の結果

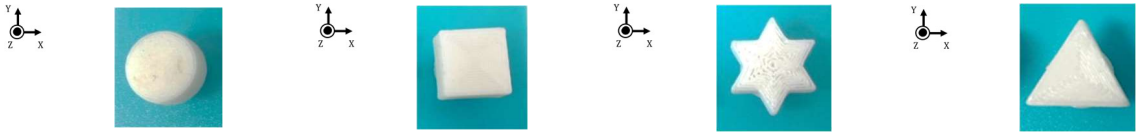
図 10 より 4 点とリング形状にて正答率が高いことが分かる。4 点は最小の表面積であり，リング形状は周囲の長さが最長であった。表面積が小さい程正答率は上昇すると考察したが周の長さも影響及ぼす可能性がある。

4.2　周の長さの違いによる 2 点弁別実験

4.1 の実験より模擬セルの接触面の周の違いによって 2 点弁別閾が変化する可能性があることが分かった。周の長さが 2 点弁別閾に変化を及ぼすか実験を行った。

4.2.1 実験環境/方法

図 11 に周の長さの異なる模擬提示セルの形状，表 2 に模擬提示セルの寸法を示す。



a)　円　　b)　四角　　c)　六芒星　　d)　三角

図 11　周の長さの異なる模擬提示セルの形状

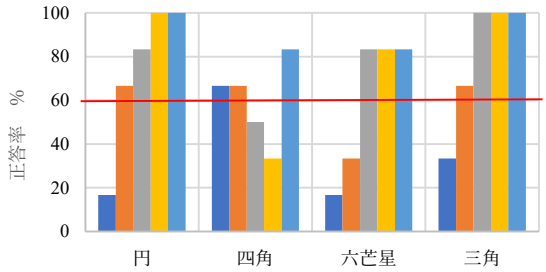
表 2　周の長さの異なる模擬提示セルの寸法

形状	円	四角	六芒星	三角
周囲[mm]	35.4	40.0	52.6	55.8
表面積[mm^2]	100.0			

図 5 の実験装置の試験棒の先端に模擬セルを装着した。模擬セルは表面積が一定かつ周の長さが異なる様に設計した。外径を同程度とするため前実験の 4 点/リング形状は除外し，3.1.1 と同様の実験方法で実験を行った。

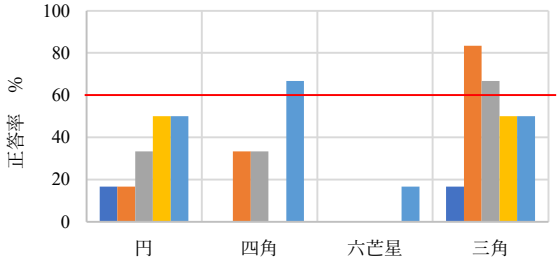
4.2.2 実験結果

4.1.2 と同様に 2 要因分散分析を行った結果，形状の違いが正答率に影響を及ぼしたのは被験者 D と F の結果であった。図 12 に周の長さの異なる模擬セルにおける 2 点間距離毎の被験者 D の正答率の結果，図 13 に F の結果を示す。



2 点間距離:■ 10[mm], ■ 20[mm], ■ 30[mm], ■ 40[mm], ■ 50[mm]

図 12　周の長さの異なる模擬セルにおける 2 点間距離毎の被験者 D の正答率の結果



2 点間距離:■ 10[mm], ■ 20[mm], ■ 30[mm], ■ 40[mm], ■ 50[mm]

図 13　周の長さの異なる模擬セルにおける 2 点間距離毎の被験者 F の正答率の結果

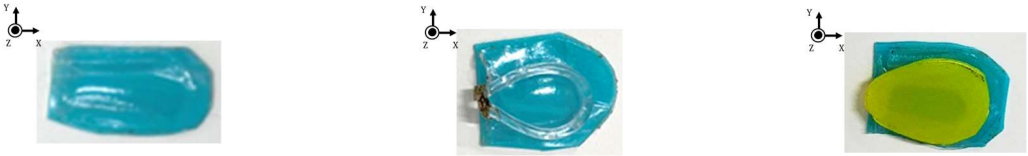
図 12，13 より三角形状が最も正答率が高かった。三角は 4 つの形状の中で最長の周であった。従って，周の長さは正答率に影響を及ぼすと言える。また，角の有無も 2 点弁別のしやすさに影響を及ぼしたと考える。

4.3　表面材質の違いによる 2 点弁別実験

エッジの際立つ形状は 2 点弁別に影響を及ぼすか実験を行った。

4.3.1 実験環境/方法

図 14 に表面材質の異なる模擬提示セルの形状を示す。



a)　表面加工なし　　b)　エッジ　　c)　プラスチック薄板

図 14　表面材質の異なる模擬提示セルの形状

エッジが際立つよう周にテグスを取り付けたセル，面とエッジが際立つようプラスチック薄板を取り付けたセルを用い，3.1.1 と同様の実験方法で実験を行った。

4.3.2 実験結果

4.1.2 と同様に 2 要因分散分析を行った結果，表面材質の違いが正答率に影響を及ぼしたのは被験者 I と L の結果であった。表 3 に被験者 I，L の 2 点弁別閾の結果を示す。

表 3　被験者 I，L の 2 点弁別閾の結果

被験者	表面加工なし	エッジ	プラスチック薄板
I	20[mm]以上	10[mm]以上	10[mm]以上
L	30[mm]以上	20[mm]以上	20[mm]以上

表 3 よりエッジと面形状が最も正答率が高い。従って，表面に加工を施した方が正答率は高いと言える。

4.4 前実験結果を反映させた提示セル形状と機構

提示セルは 4.1，4.2，4.3 の実験より表面積はできる限り小さく，周の長さは長く，エッジは際立った形状であることが重要である。上記を考慮し提示セルの設計を行った。エッジや角が際立つ形状とするためひし形を採用した。また，表面積を小さく，周の長さを長くするため中心方向にくぼんだ形状にした。

5. 力覚提示機構機能試験機

機能試験機の部品が 1/30 に届いたため，ただいま作成並びに実験中です。後日抄録は差し替えさせていただきます。ご迷惑おかけしますが，よろしくお願いいたします。

6. 機構機能試験機評価実験

6.1 実験環境/方法

6.2 実験結果

7. 結言

本研究は, 臓器損傷を防止し安全性を高めることを目的とし, 接触時の反力, 接触方向, 接触範囲を術者が識別可能な機器の開発を最終目標とする。力覚提示方法は手術を行う術者の操作性を損なわないため前腕に装着する空気圧を用いた提示機構を提案し，機構の詳細設計のため前腕の感覚を調査した。調査結果より提示セルとエアブロックの配置は 2 点弁別の可能閾値，2 点弁別の不可能閾値より決定した。提示セルの形状では表面積はできる限り小さく，周の長さは長く，エッジは際立った形状であることが重要であった。

今後の展望としては，提示圧力に段階を持たせることや小型な空気圧制御機構の開発，手首の動きや個人差に対応したシステムの構築など力覚提示精度の向上が求められる。また，実装時には指先に対する力覚提示機構との併用により更に術者が直感的に操作可能になると考える。従って，力覚提示精度の向上及び力覚提示デバイスの形状の拡大を提案する。

参考文献

[1] 藤野昇三“触診の重要性を再認識しよう”，日本外科系連合学会誌，vol.40，No.5，pp.1052-1055，2015

[2] 内山靖,” 理学療法における感覚障害の評価”,理学療法,No.12,pp271-280,1995

[3] 田崎義昭, 斎藤佳雄,“ベッドサイドの神経の診かた（改訂 18 版）”.,南山堂, pp99-100 , 2020

[4] 中田眞由美, 岩崎テル子,“ 知覚をみる・いかす-手の知覚再教育”,協同医書出版社, pp65-67 , 2005

[5] 人工知能研究センター, 人体寸法データベース 1991-92-, https://www.airc.aist.go.jp/dhrt/91-92/data/list.html，2022.09.20.