

氏名	小林 洋
所属機関	大阪大学大学院 基礎工学研究科
研究題目	内視鏡外科手術の視野改善を目的とした擬似的視点変更システムに関する研究

1. 研究の目的

低侵襲手術は下記の長所を有する。

- (1) 侵襲性が低いことから入院期間が短い。
- (2) 早期社会復帰が可能である。
- (3) 切痕が小さいことから整容性に優れる。
- (4) 術後の疼痛が小さい。
- (5) 出血が少ないことから輸血量を減らすことが可能である。

侵襲を小さくすることが社会に求められている一方で、医師への負担は増加し、高い技術力が従来の開腹手術より求められている。

低侵襲手術において、5-10[mm] 程度の切開創を複数設け、切開創から内視鏡や手術器具を挿入する手術方法が一般的である。内視鏡を用いた低侵襲手術では、撮影機器の映像は視野が狭く、奥行き感が欠如しやすい。特に手術環境が狭いため内視鏡の位置が制限され操作に適した視点が得られないという問題点がある。更に、内視鏡下手術においては、鉗子の移動方向と画面内の鉗子の移動位方向が一致するとは限らず、医師に肉体的・精神的負担を強いる。

低侵襲手術を支援するため、汎用手術マニピュレータ da Vinci® (Intuitive Surgical, Inc., Sunnyvale, CA) などの手術支援ロボットが臨床で使用されている。手術支援ロボットはマスタ・スレーブ方式が多く、医師は内視鏡から撮影された映像をもとに遠隔でスレーブを操作する。手術支援ロボットは人間の手よりも自由度が高いマニピュレータを実装することで、徒手の手術では到達不可能な姿勢で手術野にアプローチすることが可能でため術具の操作性は改善できるが、内視鏡の操作性においては、例え軟性内視鏡であっても曲率が低いために、徒手の低侵襲手術と同様に狭い体内で自由に視点を変更できないことが問題である。

上記から、徒手およびロボット支援手術では、視点の位置を自由に配置できないことが問題である。本研究の目的は、これらの低侵襲手術において狭い手術環境内でも視点が変更できる技術を実現することである。

2. 研究の内容(手法、経過、評価など)

関連研究

視点位置の配置箇所を拡張するために、腹腔鏡下手術では直視鏡と斜視鏡を変更しながら手術を行うことがあるが、斜視鏡は挿入時に挿入方向が視界に入らないため組織を傷つける恐れがある。また、斜視鏡と直視鏡を切り替えながら手術を行うことは手術時間が長くなることの要因になり得る。

硬性鏡の先端に追加の 1 自由度を有し、内視鏡の抜き差しを行うことなく直視鏡と斜視鏡を交換する効果が得られる ENDOCAMELEON® (Karl Storz & Co. KG, Tuttlingen, Germany) が開発されている。Noonan et al. (2010) は 7 自由度を有する多自由度内視鏡の開発している。しかし、特定の位置に内視鏡を配置することが必要であるため、内視鏡の自由度は手技の条件に強く依存する。手技の条件は、患者の体型・病状、術者の好みなどにより無数に存在するため、これらを網羅し得る自由度構成を実装することは現実的でない。機械的構成の工夫では物理的制約に強く影響を受ける問題は解決できない。物理的制約への依存が小さい内視鏡映像を提示する手法が必要である。

先行研究

内視鏡の自由度や手術の条件などの物理的制約に依存しない画像処理技術を用いた研究が報告されている。Kanade *et al.* が Virtualized Reality 技術では、カメラアレーを撮影対象を囲むように配置し、カメラペアから 3 次元形状を再構成することで、異なる視点からの映像を描画する。Virtualized Reality は記録した映像を非リアルタイムに描画することを想定しており、使用者が Virtualized Reality をインタラクティブに操作することについては検討していない。Koppel *et al.* は画像処理技術を用いた内視鏡映像の擬似的視点変更システムの開発をしている。この報告では擬似的視点変更技術が実装され、その描画精度が評価された。ただし、術者がインタラクティブに操作できるインターフェースは実装されず、擬似的視点変更が手術にどのような影響を及ぼすのかは評価されていない。

先行研究は術者とのインタラクティブ性が考慮されておらず、擬似的視点変更が手術手技にどのような影響を与えるかが評価されていない。本研究では、術者がインタラクティブに操作できる擬似的視点変更システムを開発し、擬似的視点変更システムが手術手技にどのような影響を与えるのかを検証する。

2. 研究の内容(続き)

疑似的視点変更システム

疑似的視点変更システムは両眼内視鏡，視点位置コントローラ，画像処理用コンピュータから構成される．両眼内視鏡から取得された左・右の撮像素子の映像はそれぞれ画像処理コンピュータに取り込まれる．視点位置コントローラの入力値に基づき画像を変形し，ディスプレイで使用者に画像を提示する．

画像レンダリングアルゴリズム

本研究では，画像の生成にテクスチャマッピングと呼ばれる手法を活用する(Kaneda, et al., 1997)．テクスチャマッピングは，3次元の頂点(Vertex)3つ以上から構成されるポリゴンに，テクスチャと呼ばれるビットマップを写像し，内挿することで，画像を描画する手法である．一般にテクスチャマッピングはGraphics Processing Unit (GPU) などの専用ハードウェアによって実現される．

視点位置を変更するということは，世界座標系に対するカメラ座標系の位置を変化させることと等価である．ゆえに，疑似的視点変更の処理は多数の座標変換を伴う．座標変換，写像，内挿はGPUを使用し高速に処理できる．ゆえに，本研究においてGPUを有効に活用できるテクスチャマッピング手法を利用することとした．

本手法は実行前処理と，実行時処理から構成される．実行前処理においては，システムが実行時に利用する諸パラメータを取得する．実際にシステムを利用する時は，実行前処理において取得した諸パラメータを使用しながら処理を行う．

本アルゴリズムについて詳しい原理と性能評価は文献[1]の方で発表済みである．提案アルゴリズムを実装したシステムが視点変更時において安全に手術可能な描画精度と遅延時間を有しているかを検証において，提案システムの遅延時間は平均36.8 [ms] であり目標値である155 [ms] (Marescaux, 2001)を満たした．提案システムの描画誤差は視点変更角度 $\theta \leq 20[^\circ]$ の条件において，第3四分位数の最大値は2.72[$^\circ$] であり目標値である視角2.85 [$^\circ$] (Jakobson, 1989) を満たした．

以上の内容をまとめて図1で示す．

- (1) 両眼視差に基づく3次元再構成(Hirschmuller, et al., 2005, Birchfield, et al., 1998)
 - マスク付きGaussianフィルタ
- (2) ドロネー3角形分割(Chew, et al., 1989)
 - 補間最適な形状
 - 高速な頂点探索 $O(\log n)$
- (3) 視点変更量の決定
 - 組織表面を中心とした回転
 - ジョイスティックによる視点入力(図2)
- (4) OpenGLによるレンダリング

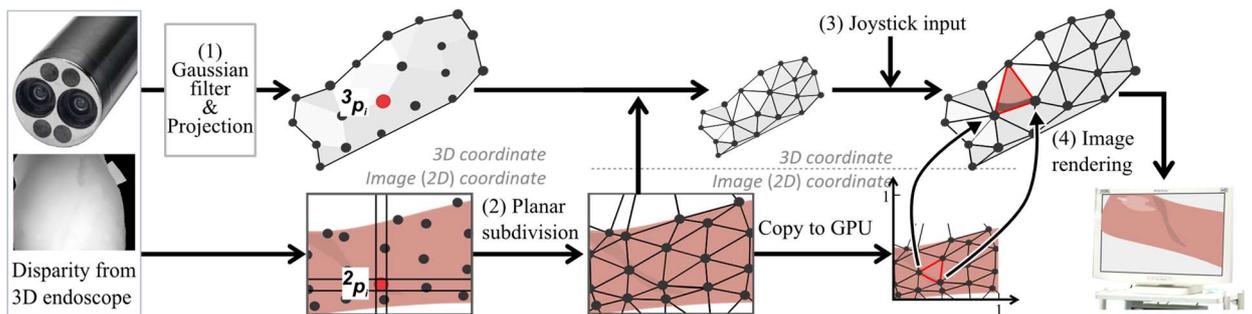


図1 アルゴリズム全体のフロー

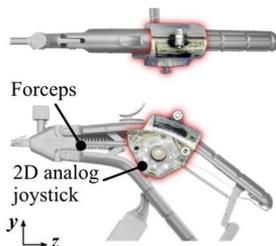


図2 視点入力用ジョイスティック

***in vivo* 実験による有用性評価**

本実験の目的は、提案した疑似的視点変更システムの手術環境下における有用性の評価と、臨床応用に向けた課題の導出である。

非生体由来のファントムを使った手術タスク(Dry lab)は同一の環境や条件を容易に再現可能であるから反復的な評価手法に適している。また、Dry lab に関しては多数の知見が存在し、手術の技量や能力を計ることが可能であることが広く認められている。Dry lab に対して、摘出臓器を使用したトレーニング(Wet lab)やCadaver、動物を用いた手術トレーニングも広く行われている。これらのトレーニングは環境や条件を操作できないという問題があるものの、Dry lab よりも高いフィデリティを有するという特長がある。Dry lab で基本手技の反復練習を行った上で、Wet lab や*in vivo* 環境で最終確認をすることが有効であるとされる。医療機器の評価もトレーニングと同様に、Dry lab で基本手技の反復練習を行った上で、Wet lab や*in vivo* 環境で最終確認をすることが有効であり(Fann, *et al.*, 2010)、医療機器の評価でもこの手順が頻繁に用いられている。

方法

本実験では、食道逆流症(GAstroesophageal Reflux Disease; GARD) に対する腹腔鏡下逆流防止術(Laparoscopic AntiReflux Surgery; LARS) をモデルケースとして実験を行った。実験タスクとして、LARSの中でも最も頻繁に適用されるNissen 噴門形成術を採用した。Nissen 噴門形成術は、腹部に設けたポートから腹腔最奥に位置する胃穹窿部を組織から剥離し、食道に巻きつけ、食道を挟み込む形で胃穹窿部を吻合・固定する手技である。LARS のような腹腔奥の臓器に対する内視鏡下手術において、視野が臓器に対して水平に近い角度を成すことから、奥行きが把握が困難であるという問題がある。奥行きが把握が困難な手術環境においては均等な縫合が困難である。また、奥行きが把握が困難な環境においては均等な縫合が成されたかを確認する手段がない。不均等な胃穹窿部の吻合は、吻合の破断を引き起こす危険がある。吻合の破断はLARS においてしばしば見られる問題であり、再手術の原因と成る(48)。LARS は小児外科領域においても用いられている。しかし、小児外科におけるLARS は術空間が更に狭小かつ脆弱であるため成人のLARS と比較してさらに難易度が高いことが知られている。水平視野が問題となる環境に対して提案手法を導入することで均等な縫合および吻合部破断を回避することが可能になることが期待できる。

本実験では月齢2カ月の15 - 20[kg] 相当のメス豚を対象とした。体重15 - 20[kg] 程度のブタは小児外科におけるLARS に環境に近い。開腹したブタの胃穹窿部と食道下部がNissen 噴門形成術と同様な外観を成すように医師の所見に基づきCCD カメラを配置した。腹腔鏡下手術においてポートに設けたトロカーが術具を支える役割を担っているが、開腹時にはトロカーを支持するポートが存在しない、内視鏡保持アームを用いてジンバル機構を空中に配置し、トロカーを代替した。腹腔鏡下手術において十分な経験を有する小児外科医師3名が上記の*in vivo* 条件で疑似的視点変更システムを操作し、定性的所見を述べた。

提案手法によって疑似的に患部を見下ろす角度で見ている画像と、提案手法による視点移動を行っていない状態の画像を確認したところ、提案手法によりあたかも視点を変更しているような仮想現実感が*in vivo* 環境においても確認できるという医師の所見を得た。

縫合後に提案手法を使用することによって均等に縫合ができたかを確認した。水平視野において縫合の均等さの確認は従来の内視鏡では不可能であるため、縫合の確認の用途において提案手法は特に有用であるという所見を得た。

ロボット支援手術における有用性評価

本節の目的は、手術支援ロボットに疑似的視点変更システムを導入し、疑似的視点変更システムがロボット支援手術環境においても有用であるかのpilot study を与えることである。提案システムを本研究室で開発している小児小切開手術支援ロボットに実装した。システムの有無と疑似的視点変更に伴った操作軸変更の有・無を条件にタスクを行い、医師の負担の指標であるワークロードを測定した。

図3に示すLiu *et al.* が開発した小児小切開手術支援ロボット[2]をモデルケースとし、提案システムの実装、評価を行った。これ以降、小児小切開手術支援ロボットと記載した場合、Liu *et al.* の小児小切開手術支援ロボットを指すものとする。小児小切開手術支援ロボットは近年急速が普及している汎用手術マニピュレータda Vinci® と同様の片腕7 自由度を有するマスタ・スレーブ型手術支援ロボットであり、提案手法の手術支援ロボット応用の評価のモデルケースとして妥当である。

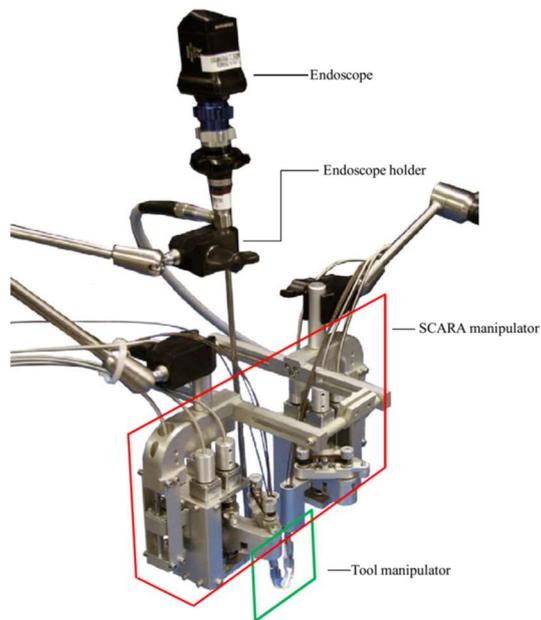


図3 小児小切開手術支援ロボット

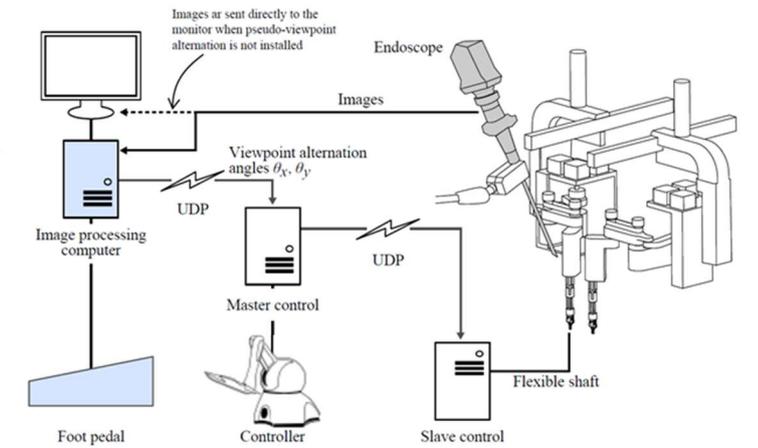


図4 疑似的視点変更システムと手術支援ロボットの統合

疑似的視点変更システムと手術支援ロボットの統合

手術支援ロボットと疑似的視点変更システムを含む本実験で用いた手術支援システムの構成を図4に示す。図4に示した通り、疑似的視点変更システムは手術支援ロボットとは独立したシステムである。疑似的視点変更システムを導入していない状態の小児小切開手術ロボットが内視鏡からの映像を直接モニタに出力するのに対して、疑似的視点変更システムを導入した状態の小児小切開手術ロボットは映像をコンピュータで変形した後にモニタに出力する。疑似的視点変更システムを導入するために新たに追加されたシステム要素は、図4に青色で示された画像処理用コンピュータと、フットペダルのみである。

前述したように、画面上のスレーブロボットの動きが、マスタ操作と一致することが良好なHand-eye coordination のためには不可欠である。ゆえに、本研究では疑似視点位置にあわせてマスタ・スレーブロボット間の座標変換を変更することにより、画面上のスレーブロボットの動きが、マスタ操作と一致する疑似的視点変更システムを構築する。

実験タスク

本実験では、輪の移動タスクとラバーシートの針刺しタスクの2つのタスクを使用した。これらの2つのタスクを採用した理由を下記に示す。

輪の移動タスク 被験者は重力方向に直立する棒からニトリルゴム製の輪を持ち上げ、異なる棒に輪を移動する。輪を移動するタスクは手術トレーニングにおいて術者の基礎的な巧緻性を評価するのに頻繁にthe Society of American Gastrointestinal and Endoscopic Surgeons(SAGES) が主催するトレーニングプログラム Fundamentals of Laparoscopic Surgery の手術技術部分であるthe McGill Inanimate System for Training and Evaluation of Laparoscopic Skills(MISTELS) (Vassiliou, et al., 2006)の一部である。何らかの物体を1位置から他の位置に移動するタスクは手術支援ロボットの評価でも用いられる(Garcia-Ruiz, et al., 1998) 他、心理神経学の分野でもPurdue peg board test の名前で知られているタスクである。

ラバーシートの針刺しタスク 被験者はラバーシートに描画されたドットを目標に針刺しを行う。本タスクを採用した背景については成果論文[1]と同じである。

- (1) システムなし. 映像はA/D 変換で画像処理用コンピュータに取り込まれ, 歪み除去処理を行った後で提示される. 画像処理用コンピュータからマスタコンピュータには視点変更角度0°が常に送信される.
- (2) システム有り・操作軸変更無し. 被験者はフットペダルによって視点位置を操作可能であるが, 画像処理用コンピュータからマスタコンピュータには視点変更角度0°が常に送信される.
- (3) システム有り・操作軸変更有り. 被験者はフットペダルによって視点位置を操作可能である. 視点位置角度_x が画像処理用コンピュータからマスタコンピュータに送信される.

本実験においては, 練習時間を短縮し, タスク間における習熟の影響を小さくするために, 被験者を熟練医師3名とした. 被験者の情報を表1に示す. 全被験者は手術支援ロボットの使用経験がなかった.

被験者Aは輪の移動タスクのみを, 被験者B, Cは輪の移動タスクとラバーシートの針刺しタスクの両方を行った. ゆえに, 全被験者のタスク回数はいずれも5試行であった.

ワークロードの測定

医師への負担を評価するために本実験ではワークロードの測定を行った. ワークロードの測定としては, ワークロード測定方法として長い歴史を有し, 妥当性検証が十分行われているThe NASA Task Load Index (NASA-TLX) 法(62)を使用することとした. 本実験においては, 2つの条件の結果の変化を比較するために, non-parametric かつ対応ありの統計検定手法であるWilcoxon signed-rank testを使用した. 本章においてp値を示す場合は, Wilcoxon signed-rank testの結果であるものとする. 各タスク試行ごとに, システム無条件からシステム有条件を引いた結果, システム有り条件(操作軸変更有り)からシステム有り(操作軸変更無し)条件を引いた結果を図5に示す.

表1 被験者らの経験情報

No.	# of interventions†	Years after graduation‡	Experience in surgical robot
A	100	13	Yes
B	350	10	No
C	100	8	No

†Laparoscopic surgeries only. ‡6 years medical college in Japan, where they got a medical license.

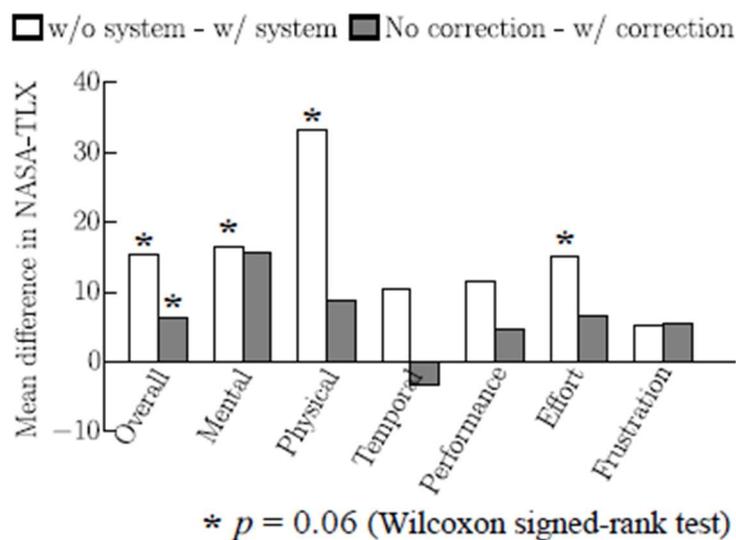


図5 異なる条件でのNASA-TLXの平均差. 星印は各比較のp値を示す.

アンケート・実験結果

本実験では、NASA-TLX とあわせて定性的な評価を行った。各アンケート項目に対して、4段階のリッカート尺度 (a) 強く思う (b) そう思う (c) あまりそう思わない (d) そう思わない) のアンケートを行った。アンケートは書面にて行った。アンケートは遅延の存在に関する質問、描画誤差に関する質問、システムの有用性に関する質問、Hand-eye coordination に関する質問を含む。

本実験において取得したアンケート結果を図6に示す。質問# 1 に対して、質問# 3 が矛盾する結果を示している。これは、被験者が質問を、本実験における小児小切開ロボットの評価として述べているのではなく一般論として質問を認識した可能性がある。ゆえに、本実験においては質問# 3 を無効なデータとする。また、同様のことが質問# 7 についても適用されるため、質問# 7 も除外する。

考察

図6に示した通り、システム無し条件に対してシステム有り条件で顕著にワークロードが低下している。また、アンケートの質問# 10, 11 においてもこの結果を証拠付ける、システムの有用性に肯定的な結果を得た。

システム無し条件とシステム有り条件を比較した時、知的・知覚的要求、身体的要求、努力において顕著なワークロードの低下が観察されたが、タイムプレッシャーや作業成績においてはワークロードの低下は顕著でなかった。本実験においては、被験者に特に素早い動作や、タスク成績を求めているなかったために、実験結果と実験条件が一致している。ゆえに、システム無し条件とシステム有り条件の比較において本実験は妥当な結果を示しているものと考えられる。

本実験においては、100% の結果において被験者がシステムの遅延を感じない、100% の被験者がシステムの描画誤差の存在を感じないとした。

図6に示した通り、システム有り条件(操作軸変更有り) に対してシステム有り(操作軸変更無し) 条件で顕著にワークロードが低下している。ゆえに、視点位置にあわせて操作軸を変更し、Hand-eye coordination を改善することは操作のシヤすさに寄与することが示唆された。

アンケートの質問# 9 のHand-eye coordination に関する質問において、システム無し、システム有り条件(操作軸変更有り)、システム有り(操作軸変更無し) に顕著な差はみられなかった。Hand-eye coordination のようなpsychomotor に関与するロボットの要素はアンケートのような主観まで顕在化しにくいいため、アンケート結果の各条件間に差が見られないものと考えられる。一方で、NASA-TLX 法においては差が検出されている。アンケートと比較してNASA-TLX法はHand-eye coordination の変化に起因するワークロードの変化の検出に有効な手法であると考えられる。

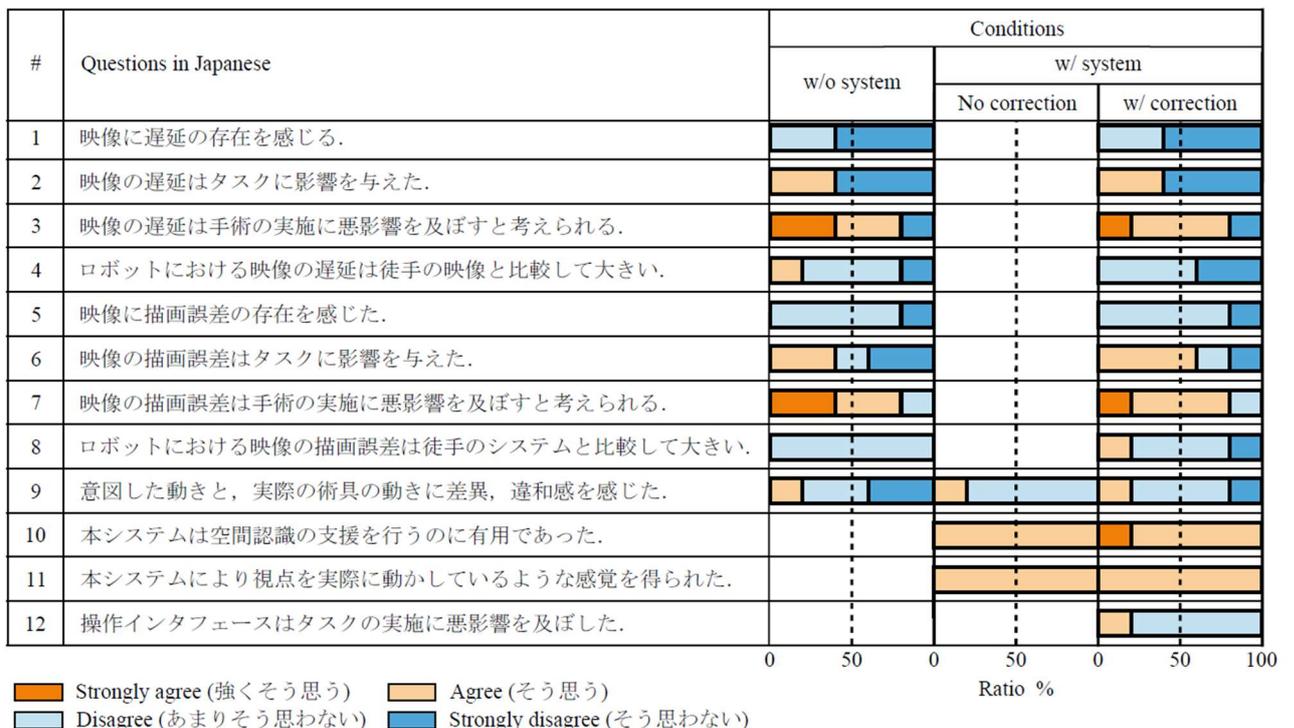


図6 アンケート調査結果

3. 研究の結論、今後の課題

疑似的視点変更技術は従来の内視鏡では不可能であった視点の動きを可能とする。医療では医療器具の使用法のベストプラクティスを知見として共有することが行われているが、疑似的視点変更技術については有効な視点変更方法が明らかでない。本研究において最適な視点変更に関して考察を与えたが、今後は異なる視点位置に対する操作のしやすさを評価することで、最適な視点位置を導出することが必要であると考えられる。

また、疑似的視点変更技術の視点変更のベストプラクティスについて検討するとともに、疑似的視点変更に必要な視点変更インターフェースを開発することが必要であると考えられる。視点の取りうる姿勢は6自由度あるために視点変更インターフェース開発は難しく、異なる手術支援ロボットに対して最適とされるインターフェースも異なるために、視点変更インターフェースの研究開発が盛んに行われている。今後は疑似的視点変更技術についても最適なインターフェースを検討する。

今回行った**疑似的視点変更システムと手術支援ロボットの統合実験**はpilot studyであり、通常医療機器の評価を行うのに使用される被験者数と比較すると小さく、被験者も熟練医師に偏っていた。また、本実験においては被験者数が少なかったために、実験条件の実行順番がrandomizedされていなかった。今後は被験者数を増やして実験を行い、信頼性の高い結果を得ることを目指す。

4. 成果の価値(とくに判りやすく書いて下さい)

4. 1. 社会的価値

低侵襲手術は開腹手術と比較し多数の利点を有しており、様々な手技への低侵襲手術の適用が進んでいる。しかしながら、低侵襲手術は開腹手術と比較し手技の難易度が高い。例えば、腹腔鏡下手術は視界の劣悪さや手術具の操作が困難なために開腹手術と比較し手術が困難である。本研究の社会的意義は、画像処理を用いた疑似的な視点変更を行うことで徒手の手術やロボット支援手術において、医師の巧緻性を改善し、医師への負担を軽減することである。画像処理を用いた疑似的な視点変更技術は、医師への負担や技術的要求が問題となっている低侵襲手術において医師を支援し、患者の救命率向上に貢献できる。現在の医療技術文献は、外科手術の安全性および有効性を改善するために拡張現実を手術に使用することに関する外科医の関心が高まっていることを示唆している。多くの研究では、新たに考案された拡張現実感システムの性能が従来の技術に匹敵することを示した。医療の未来がAR (Argument Reality, 拡張現実) によって強化されるならば、より多くの可能性が広がり、様々な病状の改善が期待できる。本研究はAR (Argument Reality, 拡張現実) 技術を低侵襲手術の世界に重ね合わせる技術の推

4. 2. 学術的価値

低侵襲手術を支援する手術支援ロボットにおいて、術空間の物理的制約により視点の位置を自由に配置できないことが問題である。低侵襲手術において、手術空間による物理的制約への依存性が低い視点変更を実現するために、画像処理技術を用いた内視鏡映像の疑似的視点変更手法を開発した。先行研究では術者のインタラクティブな操作が考慮されておらず、疑似的視点変更が手術手技にどのような影響を与えうるかが検証されていない。本研究では、術者がインタラクティブに操作できる疑似的視点変更システムを開発し、疑似的視点変更システムが手術手技にどのような影響を与えるかを検証した。さらに、提案システムを本研究室で開発している小児小切開手術支援ロボットに実装し、システムの有無と疑似的視点変更に併せた操作軸変更の有・無を条件にタスクを行い、医師の負担の指標であるワークロードを測定した。全被験者・全タスクにおけるシステム有条件と、システム無条件の比較において、顕著なワークロード変化が観測された。提案手法はロボット支援手術環境においても有用であることが示唆された。

4. 3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いて下さい。未発表のものは公表予定を書いて下さい)

- [1] Koreeda, Y., **Kobayashi, Y.**, Ieiri, S., Nishio, Y., Kawamura, K., Obata, S., Hashizume, M. & Fujie, M. G. (2016). Virtually transparent surgical instruments in endoscopic surgery with augmentation of obscured regions. *International journal of computer assisted radiology and surgery*, 11(10), 1927-1936.
- [2] Yang Cao, Satoshi Miura, **Yo Kobayashi**, Kazuya Kawamura, Shigeki Sugano, Masakatsu G. Fujie, "Pupil Variation Applied to the Control of an Endoscope", IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Stockholm, Sweden 16-21 May, 2016, pp.531-538.
- [3] Yang Cao, Satoshi Obata, **Yo Kobayashi**, Kazuya Kawamura and Masakatsu G. Fujie, "Verification of Pupil Variation for Use in Zoom Control" , The 12th Asian Conference on Computer Aided Surgery (ACCAS 2016), Daejeon, Korea, Oct. 14-15, 2016.
- [4] Yang Cao, Li Liu, Satoshi Miura, Masaki Seki, **Yo Kobayashi**, Kazuya Kawamura and Masakatsu G. Fujie, Development of angle information system to facilitate the adjustment of needle-holding posture [J]. *International Journal of Computer Assisted Radiology & Surgery*, 2017, 12(11):1-11.
- [5] Yang Cao, Satoshi Miura, Quanquan Liu, **Yo Kobayashi**, Kazuya Kawamura, Shigeki Sugano and Masakatsu G. Fujie (2017). Probabilistic neural network applied to eye tracking control to alter the direction of an endoscopic manipulator. *Mechanical Engineering Journal*, 4(4), 15-00568.