

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350536

研究課題名(和文) ヒトの操作感を規範とする手術支援ロボットの制御系・操作系の最適化設計手法の構築

研究課題名(英文) Human Operability based Surgical Robot Design Method for robot control and manipulation

研究代表者

川村 和也 (Kawamura, Kazuya)

千葉大学・フロンティア医工学センター・助教

研究者番号：50449336

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：近年、患者と医師の負担軽減を目的とした手術支援ロボットが開発されている。手術支援ロボットは、その適用先に対する有用性と同時に、医師にとっての使いやすさが重要となり、操作性を規範とする機器開発が求められる。そこで、仮想環境を利用し、実機制作の前段階で操作性検証が可能な設計手法の構築を目的とした。環境構築とともに、操作性指標の検討を行った。特に、マスタマニピュレータにおいて、操作法の異なる2種類の機器を使用し、腕にかかる負担に着目した検証実験を行った。結果として、腕への負担評価の有効性が示唆された。また、本設計手法の応用検討とし、水を利用した新しい術式を支援するロボットの設計における検証も行った。

研究成果の概要(英文)：In recent years, surgical robot has been developed to reduce the burden both patients and surgeons in endoscopic surgery. It is required to develop a master controller which can be improved operability of surgical robot for applying surgical robot widely. The development of master controller focused on operability is required a quantitative evaluation index. In this paper, we proposed three evaluation indexes focused on the burden of arms. We selected displacement and fine tremor in each joints of the arm and operation time. These indexes can be measured easily and quantitatively. We performed a reaching task using two master controller and compared between the results by each master controllers. As the results, displacement and operation time was suggested an influence on operation by the difference in mechanical structure. Fine tremor was suggested an influence on operability which could not be confirmed by other results.

研究分野：医用システム

キーワード：手術支援ロボット シミュレーション 操作性評価

1. 研究開始当初の背景

患者への侵襲性低減に向けた医療機器開発の一つにロボット技術の導入が挙げられる。鏡視下手術のような低侵襲性に加え、執刀医の負担軽減、より高精度な手術実現を目指し臨床応用されている。近年では、成人を対象とする手術への適用だけでなく、胎児や小児を対象とする非常に微細かつ繊細な手技の要求される手術に適用が求められている。しかし、ロボットを適用する手術空間がより狭くなるため機構設計が難しく、かつ操作性能の悪化に加え、脆弱な対象にも関わらず負荷されている力などの対象の状態を把握しにくいといった制御面で困難な問題が生じている。このことから、より複雑な手術対象の治療支援を実現していくためには、ロボットの機構面における導入のしやすさだけでなく、操作者視点を考慮した操作のしやすさ、臓器の脆弱性を考慮した制御の精度性を並立させるロボットシステムの開発が期待される。

これらの課題に対して、機構系設計におけるロボットの可動範囲を患者視点での評価や、制御系設計における力帰還型システムや臓器特性を考慮した脆弱な対象へのアプローチの検討、操作系設計における安全性や信頼性と併せて使用者を中心においた使いやすさの検証がなされており、機構系・制御系・操作系それぞれの設計が重要な課題として位置付けられている。

一方で、手術支援ロボットは機構系・制御系・操作系を組合せたシステムとして構成されるにも関わらず、これらを個別に検証・評価されている現状がある。迅速に臨床応用可能な手術支援ロボットを開発していくためには、これまで申請者が実施してきた操作インタフェースが操作性に与える影響評価や機構系設計に着目した研究に加え、制御系設計・操作系設計の要素を組み込む必要がある。医療機器としての使いやすさを工学的に捉え、定量的に明確化する機構系・制御系・操作系を三位一体型設計開発プロセスの構築と医師が実際に操作して行う一貫した評価を実現することにより、医師の操作感を定量的な評価に留めず、最適なシステムを設計するための仕様条件として利用することが可能となる。そのためには、以下を満たす環境で定量的かつ繰り返しの検証が必要となる。

- ・適用症例を想定した環境で、機構系・制御系・操作系の同時設計
- ・性能評価に基づく系の設計の迅速変更
- ・操作者が実際に操作しつつ性能評価

2. 研究の目的

これらの社会的な背景や開発している要素技術である機構設計シミュレーションを利用し、本研究では、ヒトの操作感や認知に関する特性を考慮したロボットの機構系・制御系・操作系を一貫して設計開発・評価する手法の構築と実機システムへの応用を目的

とした。対象症例と手技に適した、ヒトを含めたシステムの最適設計指針の確立に向け、本申請では「ヒトを感じる遅れ」を含めた制御・操作系の遅れ特性と「それに応じた手技の質」との関係性を工学的に評価する。ヒトの感じる操作しにくさは、操作時に動かす手の動きと術具の動作に「ずれ」が生じることにより発生するが、ヒトの介在する系における評価では定性的である。この曖昧な評価になりがちな現状を打破し、操作者にとって使いやすい機器の設計開発を進めていくために、機構的な側面に加えて、「実際に動作させる・操作する」という点から以下の点を実施した。

- ・制御系が潜在的に有する遅れを評価する手法の構築
- ・操作系においてヒトを感じる遅れの評価と上記を組み合わせた操作性能の評価

3. 研究の方法

本研究では、実施した成果の内、評価指標に関する内容、ならびに研究を進める上で、新しい適用環境を視野に入れるため、それに対する対応について報告する。

【1】検討する評価指標

術空間再現シミュレータを利用した環境下において異なるマスタコントローラ使用時の操作性を対象とした、定量的な評価指標の検討を行った。評価指標の検討を行うにあたり、比較的簡単に定量的な計測が可能である項目に着目し、次の3点を計測項目として選定した。まず、手術の際に腕に疲労が蓄積することによって生じる操作性の低下が関節の移動量の変化に影響すると仮定し、肩、肘、手首関節の移動量、及び微細な震えを計測項目とした。また、腕の負担が蓄積することにより、作業完遂までに要する時間も延長すると考えられるため、作業時間を計測項目とした。

【2】評価指標の検証実験

【1】にて示した指標を用いてマスタコントローラの操作性を定量的に評価可能であるかを2種類の操作機器を比較することによって確認する検証実験を行った。比較対象として使用するマスタコントローラは以下の二つを採用した。一つ目として操作部を把持した際に、操作者の手に機構的な拘束を生じる Geomagic®Touch を、二つ目として操作感の異なるマスタコントローラを想定し、モーションセンサの Leap Motion を採用した。操作負担の計測項目は、非接触センサの Kinect v2 を用いて計測を行った。実験タスクとして、術空間再現シミュレータ上で Fig.1 に示す簡易的に手術手技の一部を模擬したタスクであるリーチングタスクを行った。リーチングタスクはランダムに指定されたブロックに対し左右交互に 30 回行った。これを一つの実験の中で 1 分の休憩を挟みながら 10 セツ

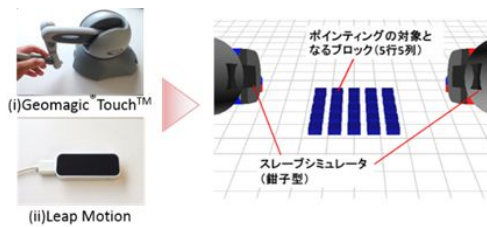


Fig. 1 Experimental environment

ト行った。また、実験間は 10 分の休憩を挟むものとした。慣れによる影響を排除するため、本実験の前に十分な練習を行った。被験者として若年健常男性二名に対し各コントローラで 2 回ずつ実験を行った。

各関節の微細な震えの評価手法は肩関節を基準にした相対的な移動量に対して、サンプリング周波数を 30[Hz]として周波数解析した結果を評価した。腕の微細な震えはカメラ等における手振れ防止のためにカットされる周波数を参考にして、1~15[Hz]とした。

4. 研究成果

【1】評価指標に関する結果

各関節の移動量については、両被験者で Leap Motion 使用時に左肘関節に増加が確認できた。Geomagic®Touch 使用時には両被験者の左手首関節、左肘関節において移動量の減少が確認できた。マスタコントローラ間で比較すると両被験者で両手首関節に Geomagic®Touch 使用時の方に移動量の増加が確認できた。次に微細な震えの実験結果の一例（被験者 B, 右手首）を示す。Fig.2 に実験 1 回目の 1 セット目、Fig.3 に実験 2 回目の 10 セット目の結果を示した。グラフは縦軸を振幅、横軸を周波数とした周波数分布図で示した。Geomagic®Touch 使用時の結果を実線、Leap Motion 使用時の結果を点線で示した。結果として 1 回目と 2 回目の比較でほとんどの場合で増加が確認できた。また、手首関節と肘関節で比較すると手首関節の震えのほうが大きいことが確認できた。Fig.2 および Fig.3 よりマスタコントローラ間で比較すると Geomagic®Touch 使用時の方が実験を重ねた時の震えの増加が大きいことが確認できた。作業時間については両被験者で Leap Motion 使用時のほうが長いことが確認できた。

実験結果より、移動量に違いが出た理由として Geomagic®Touch 使用時は移動範囲が拘束されており、範囲の限界まで動かした際にマスタコントローラの位置を可動域まで修正したためだと考えられる。操作時間が短いほうが疲労しないと考えられるが微細な震えに注目し 2 つのマスタコントローラを比べると Geomagic® Touch の増加量の方が多かった。微細な震えの増加量を考慮した場合、マスタコントローラの操作性には移動量の違いが影響したことが考えられる。このことから、微細な震えに注目することで他の評価指標では評価できない操作性の違いが見ら

れるようになることが示唆された。また、手首関節と肘関節で震えの増加量に違いが出たのは基準とした肩からの距離が影響したためだと考えられる。作業時間の違いについては、マスタコントローラと鉗子の位置関係が直感的理解できリーチングタスクがスムーズに行えたかどうかの影響したと考えられる。

これらのことから、本報告で提案した評価指標はマスタコントローラの定量的な評価に有効であると考えられる。しかし、微細な震えに関しては計測の際のノイズが混ざることが予想され、これを考慮した計測方式、データ処理方法を検討する必要がある。また、今後実験回数を増やすことで評価指標としての有効性をより細かく検証していく必要がある。

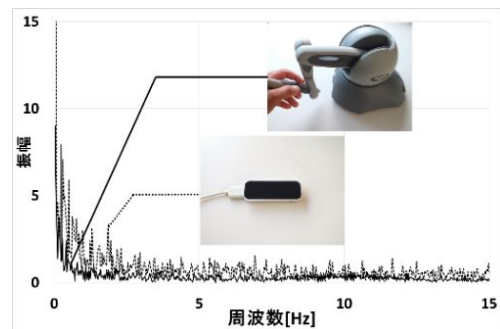


Fig.2 Exp. -1st-set

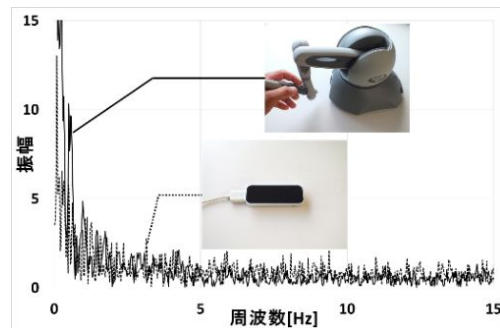


Fig. 3 Exp. -10th-set

【2】実機開発への応用展開を考慮した術式への適用検討

本学では、これまで新しい術式として水を使用した術式（WaFLES）の開発を医師主導のもと実施している。その術式を支援するロボットシステムの開発を対象とした本申請の応用の検討を実施した。特に、開発したマスタマニピュレータを評価するにあたり、術空間再現シミュレーションを利用し、対象とする単孔式 WaFLES を模擬した環境を使用した。仮想空間上に空間確保マニピュレータを再現するため、3本の圧排具とそれらを覆う圧排膜を表現し、それぞれの圧排具に対して開閉操作が行えるようにした。また、臓器を簡易的に模した柔軟体を 2 つ配置し、仮想空間内を漂わせている。この柔軟体が圧排して 1

度確保した術野空間へ再度侵入してくる状況が発生し、その柔軟体に対する再圧排の動作を行うことができる。これにより、WaFLESにおける空間確保マニピュレータの動作環境が再現されている。マスタマニピュレータの操作性を評価するシミュレーションとして、この WaFLES の環境を再現した仮想空間と、リーチングタスクを組み合わせたものを用いた(Fig. 4)。WaFLES 用に開発を進めたマスタマニピュレータと Geomagic Touch を組み合わせたものを対象とし、これらの操作による入力での仮想空間内の鉗子先端部や空間確保用圧排具の操作を行うこととした(Fig. 5)。結果として、操作時に視界に与える影響および操作に対する負担を検証できることが確認された。

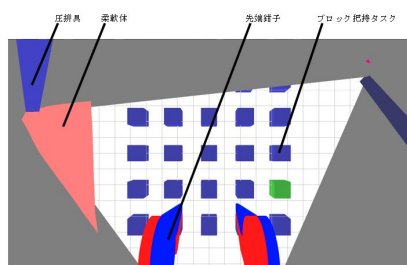


Fig. 4 WaFLES 環境再現シミュレータ

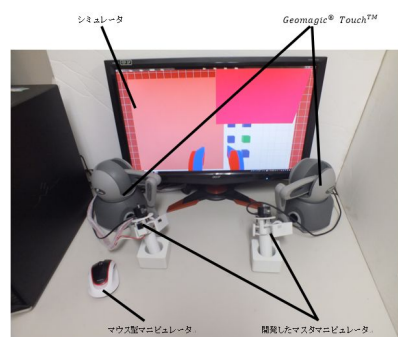


Fig. 5 実験環境

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

1. Kazuya Kawamura, Hiroto Seno, Yo Kobayashi, Satoshi Ieiri, Makoto Hashizume and Masakatsu G. Fujie, "Design parameter evaluation based on human operation for tip mechanism of forceps manipulator using surgical robot simulation", *Advanced Robotics*, Volume 30, Issue 7, pp.476-488, 2016, DOI:10.1080/01691864.2015.1129361

〔学会発表〕(計 8 件)

1. Shuto Ogino, Yuya Tanaka, Kazuya

Kawamura, Tatsuo Igarashi, "Development of Robotic Tool Holder with Power Transmission for Single Port WaFLES", *Proceeding of 2015 International Symposium on InfoComm & Media Technology in Bio-Medical & Healthcare Application*, p.84, November 15th-18th, 2015, (千葉県千葉市)

2. Yuya Tanaka, Shuto Ogino, Kazuya Kawamura, Tatsuo Igarashi, "Sheath-shaped manipulator for surgical workspace creation in WaFLES", *Proceeding of 2015 International Symposium on InfoComm & Media Technology in Bio-Medical & Healthcare Application*, p.81, November 15th-18th, 2015, (千葉県千葉市)

3. Kazuya KAWAMURA, Yo Kobayashi, Satoshi Ieiri, Masakatsu G. Fujie, "Mechanical Design of Forceps Manipulator Using Surgical Robot Simulation and Operability Evaluation", *36th Annual International IEEE EMBS Conference*, August 26th-30th, 2014, (Chicago, USA)

4. 鈴木祥慶, 石井啓介, 川村和也, "術空間再現シミュレーションを利用した操作性評価に向けた腕に着目した指標の検討", *日本コンピュータ外科学会誌*, Vol.18, No.4, p.241-242, 2016年11月26日-27日, (東京都大田区)

5. 荻野嵩人, 田中佑弥, 川村和也, 五十嵐辰男, "動力伝達機構を有する単孔式 WaFLES 支援用術具フォルダの開発~動作制御のための位置検出方法の基礎検討~", *日本コンピュータ外科学会誌*, vol.17, no.3, pp.294, 2015年11月21日-23日, (東京都文京区)

6. 川村和也, 田中佑弥, 荻野嵩人, 五十嵐辰男, "WaFLES 支援用空間確保マニピュレータの基礎性能評価", *日本コンピュータ外科学会誌*, vol.17, no.3, pp.295-296, 2015年11月21日-23日 (東京都文京区)

7. 荻野嵩人, 田中佑弥, 川村和也, 五十嵐辰男, "単孔式腹腔鏡下水中手術支援システムにおける動力伝達機能を備えた術具ホルダの開発", *平成 27 年度電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集*, pp.43-47, 2015年8月26日-29日, (長崎県長崎市)

8. 田中佑弥, 荻野嵩人, 川村和也, 五十嵐辰男, "WaFLES のロボット化を目指した空間確保機能に関する基礎検討", *日本コンピュータ外科学会誌*, vol.16, No.3, pp.204-205, 2014年11月8日-9日, (大阪府吹田市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

川村 和也 (KAWAMURA KAZUYA)

千葉大学・フロンティア医工学センター・

助教

研究者番号：50449336

(2)研究分担者

小林 洋 (KOBAYASHI YO)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：50424817

(3)連携研究者

家人 里志 (IEIRI SATOSHI)

鹿児島大学・医歯学域医学系・教授

研究者番号：00363359

五十嵐 辰男 (IGARASHI TATSUO)

千葉大学・フロンティア医工学センター・

教授

研究者番号：70302544