

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24700505

研究課題名(和文)手術支援ロボットのシミュレーション規範型設計手法の構築

研究課題名(英文)Mechanical Design Method using Robot Simulation for Surgical Robot

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) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、手術支援ロボットの設計段階において操作性に基づく評価を導入するためシミュレーションを利用した設計手法の提案を行った。これまで開発を進めてきた術空間再現シミュレーションを利用し、術具先端部において異なる機構を有する術具マニピュレータを対象に、医師の操作の下で、その機構の変化に応じた操作精度や操作範囲に与えられる影響の検証を実施した。結果として、狭小空間における手技を想定した場合に、術具先端における屈曲関節間距離に応じた作業の精度と空間の大きさの変化にトレードオフの関係が生じた。狭小空間で高い精度確保するため、最適化問題として検証し、適した機構の設計パラメータの一部が得られた。

研究成果の概要(英文)：Surgical robots have required applying many medical areas. However it is difficult to adjust all the surgical conditions with complex task or with too small workspace. In our study, we proposed a design method that mechanisms of surgical robots could be determined based on surgeon's operation. Using this system, we investigated the effect on the accuracy of the surgical task by changing robot mechanism. And we verified the constraint condition which is required a task using surgical robot in narrow workspace. We used some instruments with mechanisms that differed with respect to the length between bending joints and measured the accuracy of the suturing and working volume. The result shows that the change in the visible area of the forceps tips affect the accuracy of suturing technique in an environment assumed the narrow workspace. From the result, it was possible that the workspace constraints and visibility of tip of the forceps were effective for the design of surgical robot.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・医用システム

キーワード：医用ロボット

1. 研究開始当初の背景

ロボット技術を利用した低侵襲な手術が行われてきている。その一例に da Vinci® Surgical System (Intuitive Surgical Inc.)が挙げられ、2009年に日本においても薬事承認があり、臨床利用されている。手術支援ロボットは、治療対象となる症例に応じて、手術室内環境や体腔内環境が異なるため、動作可能範囲などが大きく変化し、要求される機能が千差万別になる。このため、症例ごとに適した機能を有するロボットとして開発する必要はある。

しかし、医師の操作指示に従ってリアルタイムに動作することが求められることから、どのように動作させるのか・どのような動作範囲を有するのかなどの評価が難しい。これは、関連分野において、術具の幾何学的な動作範囲の検討や、ロボットの可動範囲を患者視点での評価がなされていることから重要な課題と言える。

症例ごとに適した設計開発指針を確立するとともに「使いやすさ」を工学的に捉えた評価手法の明確化が必要となるが、操作者である医師の操作感が定性的な側面でのみ評価され、実際の使用者にとって使いやすい機器としての開発が行われていないのが現状である。実際の使用環境を想定した機器の設計開発を進めていくためには、

- ・適用症例を想定した環境での機構設計
 - ・設計された機構の動作性能評価
 - ・操作者の視点からみた動作性能評価
- を同時に検証することが必要不可欠になる。

2. 研究の目的

自動車や航空機などの設計開発において、事前の検討を行うためにシミュレーション技術が利用されており、設計仕様の検証や運転者の安全性の定量化、事故発生時の挙動予測を行っている。設計の段階から実際に利用する段階に至るまでの一貫したプロセスで詳細な検証を可能とするシミュレーションシステムは、設計開発に与える効果は非常に大きい。さらに、任意に術空間を再現できることから、手術支援ロボットの設計開発プロセスにおいて医師の操作感が重要な要素として捉え、使いにくさを感じる場合に迅速な設計仕様への反映することが可能となる。一方でロボットを利用する手術では、ロボットだからこそ可能となる手術手技動作を行うため、操作感などを工学的に捉えて要求仕様としてデータ化することが困難であった。

本研究では、術空間の再現を可能とするシミュレーションシステムを利用し、医師にとっての使いやすさを工学的に捉え、操作者の使いやすさを追求可能な手術支援ロボットの設計・開発・評価を支援するシステム構築を目的とした。実機開発前にシミュレーションを利用して動作性能を検証し、その評価手法の定量化を通じて機構・操作感の両側面から「使いやすい」ロボットの開発・評価プロ

セスの構築を行った。

3. 研究の方法

本研究では Fig. 1 に示すような実機デバイスによる操作を可能とし、手術支援ロボットの機構を任意に設定可能なシミュレーションシステムを構築している。このシミュレーションシステムを利用し、医師の操作のもと、鉗子先端部における機構の違いによる作業への影響を検討した。具体的には、鉗子先端部の自由度構成とその関節間距離が操作に強く影響を与えると考え、小児外科に代表されるような狭小な空間を想定し、鉗子先端部の機構が異なる場合に、操作にどのような影響がでるのかを検討した。

鉗子先端に配置されている屈曲関節における関節間距離を検証対象の設計パラメータとした。手技としては、針掛け動作に与える影響の検証を行った。針掛け動作において針を掛ける点(刺入点)と針を取り出す点(刺出点)が手技の効果に直結するため、刺出点ならびに刺入点での位置精度や操作範囲を計測した。また、狭小空間における手術支援ロボットの設計値を評価する指標の検討も行った。

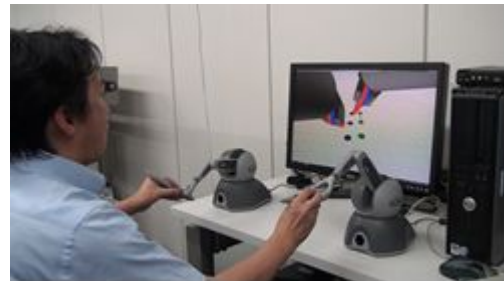


Fig. 1 Proposed simulation system

4. 研究成果

術空間再現シミュレータの評価可能手技と術環境設定の拡張

(1) 手術支援ロボット設計における検証対象とするパラメータ

本研究では手術支援ロボットに一般的に用いられる、任意の位置・姿勢を決める6自由度ならびに把持動作を実現する1自由度の構成を対象とし、体腔外に位置3自由度、体腔内に姿勢3自由度を配置した機構を対象とした。ロボットの機構を表記するための手法の一つである DH 法により表記される第5関節の d の値および第6関節の a の値 (Fig. 2) を変化させた複数の機構を用いて実験を行った。具体的には、第5関節の d を $0[\text{mm}]$ から $5[\text{mm}]$ まで $1.25[\text{mm}]$ ずつ、第6関節の a を $0[\text{mm}]$ から $10[\text{mm}]$ まで $2.5[\text{mm}]$ ずつ変化させた計 25 種類の機構を本研究の対象として選択し、検証実験を行った。なお、第5関節の d 及び第6関節の a 以外の DH パラメータの値については固定値として設定した。また、術

具の径は、現在、小児内視鏡下手術で用いられている一般的な術具の径の値を参考に5[mm]とした。

(2) 手技・条件の拡張

本研究では対象疾患として小児外科領域における先天性食道閉鎖症に代表されるような狭小空間で実施することを想定した手術を対象とすることとした。先天性食道閉鎖症では40[mm]×40[mm]×50[mm]の極めて狭小な空間で治療を行う必要がある。狭小空間での治療は術者の操作にも大きく制限されると考えられる。従って、実験を行う仮想環境下にも狭小な空間を再現する必要がある。そこで、本研究における実験では仮想環境下に茶色の壁により40[mm]×40[mm]×50[mm]の空間を再現した(Fig. 3)。これまでは、術具を挿入する際に生じる拘束点(ピボット点)のみによる動きの制限を与えてきたが、狭い環境での操作が本研究では重要な要素となることから、シミュレーションによる仮想空間で狭さを再現することとした。

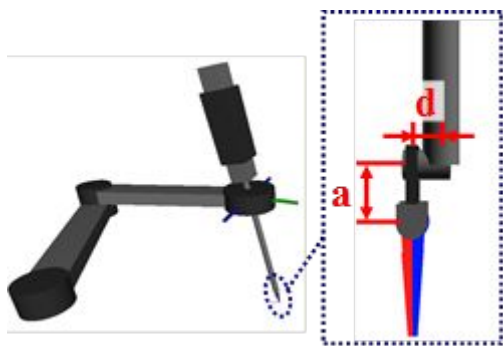


Fig. 2 Target parameter



Fig. 3 Reproducing workspace

さらに、座標系を Fig. 4 のように設定し、座標系原点は目標点間の中心とした。本研究では仮想環境下に示された目標点に対して針を掛ける作業を対象手技とした。なお、Fig. 4 に示す目標点は、右側が針を挿入する際の目標点(刺入点)、左側が針を取り出す際の目標点(刺出点)とした。

目標点に関するパラメータ設定として、目標点の半径 r 、目標点間の距離 L がある。これらの数値は、次のように選択することとした。先天性食道閉鎖症に着目すると、直径約10[mm]の上部食道と直径約5[mm]の下部食道に対して8針~12針の針掛けを行う必要がある。従って、針掛けの間隔が最小で約1[mm]となる。そのため、目標点の半径 r を1[mm]

とした。目標点間の距離 L については、医師とのヒアリングから8[mm]とした。

設定した空間に対する、左右のピボット点座標 $P_R \cdot P_L$ 、左右の術具先端の初期座標・初期姿勢 $M_R \cdot M_L$ 、内視鏡先端の座標 E 、作業平面に対する内視鏡の挿入角度 (Fig. 5) は固定値を使用した。

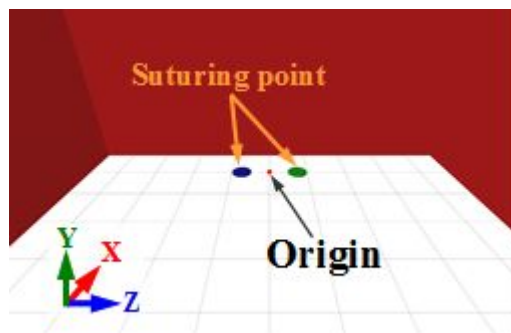


Fig. 4 Coordinate system of workspace

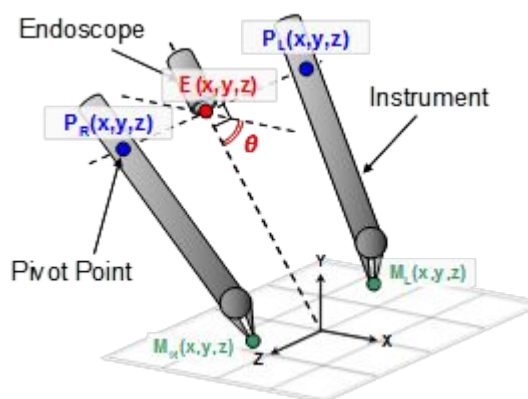


Fig. 5 Experimental parameters to set up surgical condition

タスクベースの定量的操作性能評価手法の構築

狭小な術空間を想定し、機構を変化させたことによる針掛け精度の変動を取得する実験を行った。実験では Fig. 1 に示すように、医師一名に対してシミュレータを用いて、針掛け動作を実施した。その際に Fig. 4 に示す刺入点から刺出点に針掛けを行うこととした。屈曲関節間距離 a を0~10[mm]まで2.5[mm]ずつ、 d を0[mm]から5[mm]まで1.25[mm]ずつ変化させ、各機構につき5回行った。この時、刺出点と実際に針が通った点との距離 D を誤差値として計測した。本実験において、屈曲関節間距離 a 以外の機構パラメータに関しては、実験を通して共通とし、鉗子先端部では6自由度と把持の1自由度を有する機構とした。

本研究では、屈曲関節を構成する機構要素 (Fig. 2 a,d) に対して実験を行ったが、本報告ではそれらの結果のうち、 a のみを変化された場合の結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 では、鉗子先端機構ごとの刺出点における誤差

値(左軸: distance)とそのときの体積量(右軸: moving volume)の平均値を示している。このときの体積は Fig. 7 に示すピボット点から先端にかけての部分に動いた体積とした。Fig. 6 に示すように、針掛け動作を行った際の刺出点の誤差値が、屈曲関節間距離 a が長くなるにつれて小さくなった。これに対して、術空間内で動作する鉗子先端部の動作範囲は屈曲関節間距離 a が長くなるにつれて、増加する傾向が確認された。

刺出点における誤差値について考えると、針掛け動作に対して、その精度を上げるためには、鉗子先端部の情報が見えていることが重要となる。このため針を扱う鉗子先端が視認しやすいことから屈曲関節間距離 a が長いほどその誤差値が小さくなると思われる。これに対して、屈曲関節間距離 a が長くなることで、針を掛けるために動作させる先端にある屈曲関節の動作範囲 (Fig. 8) が拡大することとなったと考えられる。以上の結果より、狭小空間において適した手術支援ロボットを開発していくためには、鉗子先端部の情報を視認しやすいことが求められるとともに、その視認性向上に伴って肥大する可能性がある大きさを抑える指標の双方を導入する必要があると考えられる。

d についても同様の結果が得られたため、設計パラメータを操作者の入力に応じて定めるためには最適化処理が必要になることが示唆された。そこで、本結果を用いて、複数のパラメータが存在するためパレート最適解を適用し、 a と d に対して作業精度と空間の大きさを両立する値が領域を持つて存在することを確認した。

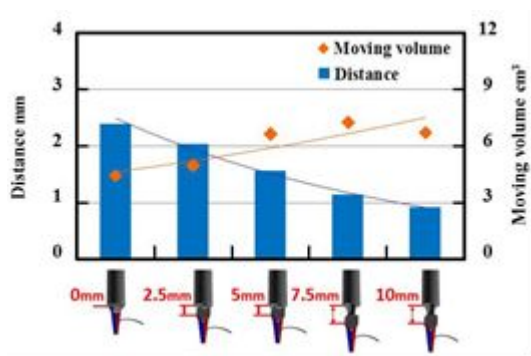


Fig. 6 Experimental results

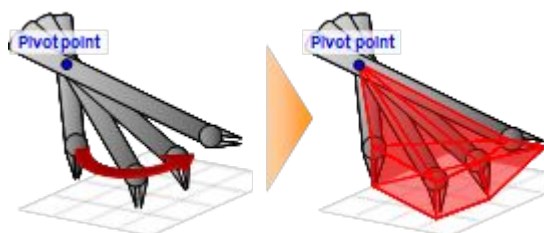


Fig. 7 Definition of volume

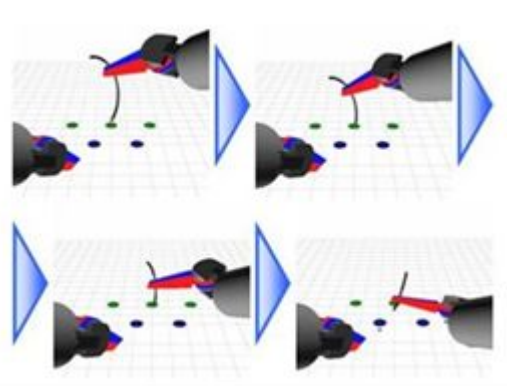


Fig. 8 Trajectory of imitating suturing task

本研究を通して、狭小な術空間を想定し、術具先端の機構の違いによる手技への影響を検証し、狭小な空間に適した機構を選定するための条件を検討した。結果、術具先端の屈曲関節間距離 L に応じた針掛け作業時の刺出点の精度低下を確認した。しかし、同時に動作範囲の拡大が確認されたことから、単に精度のみを検証するのではなく、実際に動かす範囲の検証が必要といえ、実際に操作しながらの評価が重要になることが示唆された。

今後は、より厳密な最適解を求めるため、残りの設計パラメータに対しても同様の実験を実施し、異なる手技への応用展開を進めていく。また、手術支援ロボットの機構に着目したため、制御系についても同様の検討を進めていく。

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)

[学会発表](計 1 件)

1. 川村和也, 瀬能洸冬, 小林洋, 豊田和孝, 家入里志, 橋爪誠, 藤江正克, “狭小な仮想手術環境における医師の操作情報を利用した手術支援ロボット鉗子機構設計に関する検討”, 日本コンピュータ外科学会誌 vol.14, no.3, pp.208-209, 2012

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