

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月21日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22700515

研究課題名（和文） 術空間再現シミュレータを用いた手術支援ロボットの設計開発手法の構築

研究課題名（英文） Design method of surgical robot using surgical workspace reproduction simulator

研究代表者

川村 和也（KAWAMURA KAZUYA）

早稲田大学・理工学術院・助手

研究者番号：50449336

研究成果の概要（和文）：手術支援ロボットの設計段階において、操作者である医師の感じる操作性や操作軌跡などの検証・評価を導入した、より使いやすく早期の臨床応用を臨める手術支援ロボットの設計開発手法の構築を目的とした。(1)術空間再現シミュレーションの構築、(2)空間を効率よく利用する機構検証手法の構築、(3)医師による操作性検証を行った。構築したシミュレーションシステムを用いた操作実験により、操作時におけるロボットの構造の変化に伴う操作の変化を確認し、評価指標の策定に向けたデータを蓄積した。

研究成果の概要（英文）：To assist the design of a surgical robot that is user-friendly in terms of surgeon's operation, we propose and construct a system that considers the operation manner of surgeon during the design phase of the robot. We mainly addressed the development and evaluation of the surgical workspace simulator in this project. Especially, we studied (1) construction of surgical workspace simulator, (2) verification of mechanism of a surgical robot based on the operation manner of surgeon, (3) evaluation of operability and trajectory by surgeon.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

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、設計支援、操作性評価、手術手技シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

低侵襲な手術の実現に向けて、ロボット技術が導入されてきている。その一例として da Vinci® Surgical System (Intuitive Surgical, Inc.) がある。全世界で約120万台臨床稼働しており、日本においても薬事審査が進められている。この手術支援ロボットには、臓器ごとに変化する形状や周辺の環境、臓器ごと

に複数存在する症例と治療法への対応が要求されることから、千差万別なすべての手術に対応でき手術支援ロボットの開発は不可能である。このため、一つの症例ごとに適合させた手術支援ロボットを開発していくことが必要となる。しかし、それぞれの症例ごとに合わせた手術支援ロボットの設計開発を進めていく設計指針・手法が明確にされて

いないのが現状である。手術支援ロボットを開発段階から、臨床へと迅速に応用していくためには、開発当初から適用症例を想定した機構の設計が求められ、そのためには、術式だけではなく、対象となる臓器の特性や想定される術具を挿入可能な空間等の、要求仕様を同時にかつ詳細に検証する手法が必要不可欠である。使用環境を想定した検証は手術支援ロボットの開発、およびその利用の双方の観点から重要な課題である。

2. 研究の目的

ロボットを用いた新しい術式では「ロボットだからこそ可能な手技動作」を行うことになるため、医師の手技動作等、開発前の要求仕様の検証に必要な基礎データを得ることが困難であった。そこで本研究では、これまで開発を進めてきた数理シミュレータ（術具を再現するシミュレータ、臓器の挙動を再現するシミュレータ）と実物の操作入力システムを統合し、限られた術空間を効率的に利用するロボットの自由度、機構を検証するシステム構築ならびに操作性の評価指標の確立とそれを利用したロボット自由度・機構の検証・評価を目的とした。実物の操作入力機器とシミュレータを統合し、開発前に医師の手技データや操作間の評価を可能とし、確度の高いロボット開発を可能とする方法論を構築する。

3. 研究の方法

手術支援ロボットの操作性を評価するために、術空間を再現するシミュレーションシステムを構築し、それを利用して、医師に操作試験を行ってもらい、その時のロボットの機構、動作の正確性などを評価した。具体的には、手術手技の中から縫合動作に含まれる針掛け動作に着目し、針を対象に掛け、引き抜く動作に対して、手術支援ロボットの先端の機構が異なる場合に、操作に与える影響を検証した。

4. 研究成果

(1) 術空間再現シミュレーションの構築

提案した手法を実現していくためには、手術対象の臓器の力学的な挙動、手術対象によって異なる境界条件、適用を想定する手術支援ロボットの機構や自由度構成を任意に設定する必要がある。加えて、限られた術空間を効率的に利用するロボットの自由度や機構を検証するシステムとして、操作性に基づく操作者の評価が必要となる。そこで、次に示す3つの要素で構成するシステムとして術空間再現シミュレーションシステムを構築した (Fig. 1, Fig. 2)。申請者らはこれまでの研究において、(B)と(C)の開発してきているため、本プロジェクトにてコアとなる要素

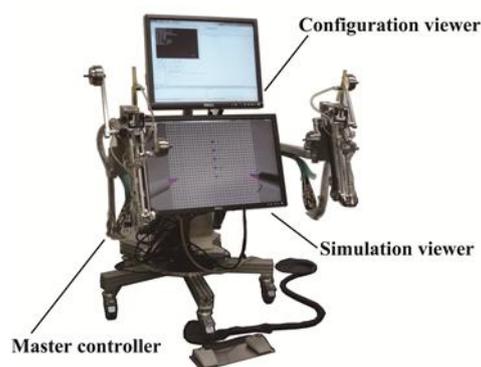


Fig.1 Overview of workspace reproducing Simulation

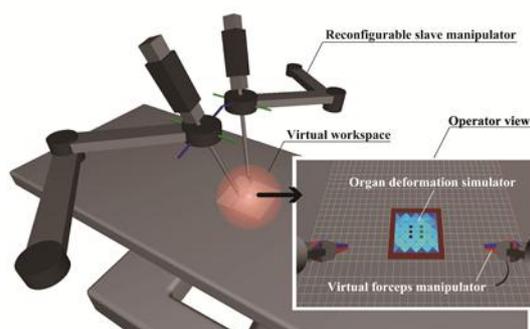


Fig.2 Simulated workspace and operator's view

(A) について中心的に構築した。以下では(A)の構築について述べる。

- (A) 機構パラメータに応じた挙動を生成するロボットシミュレータ
- (B) 実時間臓器変形計算シミュレータ
- (C) 操作入力用マスタコントローラ

限られた空間で効率良く手術を行うためには、術具の挿入位置やロボットの機構として、自由度構成、各アームの長さ、可動範囲、初期配置、視点位置が大きく影響を与える。そこで、本シミュレータでは、自由度設定、関節タイプ、DHパラメータ、内視鏡姿勢、ピボット点の位置、ロボット初期配置、鉗子先端位置・鉗子先端姿勢を初期設定した後、操作者がタスクを実行し、関節位置・姿勢、可操作度、駆動範囲などロボットの評価と、操作時における操作感を評価した。特に上記のロボットに関するパラメータを簡便に変更し、各構成において機構、挿入位置を検証できるシミュレータとした。これにより、実物の操作入力機器を用いた操作が可能となり、その機構を医師の操作感から検証できるシステムを構築した。計算周期は臓器変形計算を含め 30Hz を満たしており、リアルタイムな操作が可能とした。

(2) 空間を効率よく利用する機構検証手法の構築

位置姿勢を決める 6 自由度と把持の 1 自由

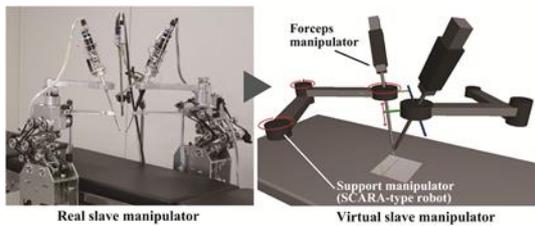


Fig. 3 Experimental set up to verify of the configuration of the surgical robot

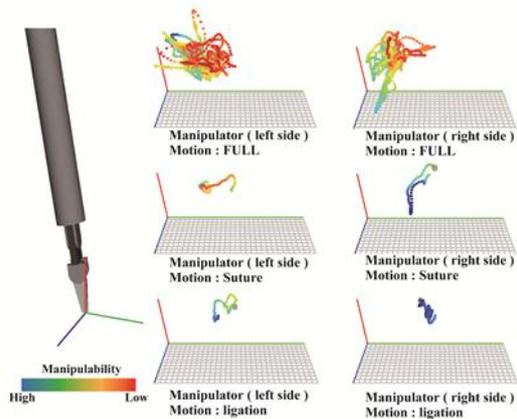


Fig. 4 Experiment condition to evaluate manipulability

度を有するロボットを対象として針掛け動作を行った際のロボットの軌跡ならびにそのときの可操作度を検証した。本実験では Fig. 3 に示す機構を有するロボットを対象とし、そのロボットにて針掛け動作を行った際の入力データをもとに、ロボットの動作中の状態を検証した。結果として針掛け動作中における可操作度から、針を掛ける動作中よりも糸を結ぶ際に可操作度が悪化することが確認でき、本シミュレーションシステムを用いて、ロボットの状態を評価していくことが可能であることが確認された。

(3) 医師による操作性検証

① 針掛け動作の鉗子先端軌跡に関して
 使用者の操作情報を設計に導入する有効性を検証する実験を行った。本実験では6自由度を有するスレーブマニピュレータにおける機構の一部を変化させ、針掛け動作を対象とした術具の軌跡を計測した。このとき、変化させたパラメータとしては術具先端の屈曲関節間距離 L (Fig. 5)を選択し、 L が0mm、5mm、10mmと異なる3つの機構を用いた。ただし、 L 以外のパラメータは全て同値とし、初期位置・姿勢も同一とした。針掛け動作についてはA点 (Fig. 6) から針を挿入し、B点 (Fig. 6) から針を取り出す動作とした。マスタマニピュレータからの入力は、次の2種類の方法を用いた。まず、全ての機構に対して $L=10\text{mm}$ の時のもの共通に利用し、各機構に対する入力が一定となるようにした。次に、

各機構に対して実際に人がマスタマニピュレータを操作し、針掛け動作を行った時のものを用いた。入力一定の場合と人が操作した場合で特に特徴的な変化が見られた屈曲関節 (Joint5) と針先端の軌跡を以下に示す。入力一定時の結果を Fig. 8 に、人の操作による結果を Fig. 9 に示す。ただし、示す軌跡は動作開始から針をA点に挿入するまでのものである。入力一定の結果では L の変化がそのまま軌跡に反映されている。しかし、人が操作した際の結果では $L=0\text{mm}$ 、 5mm の機構において $L=10\text{mm}$ の機構では生じない余剰な範囲での動作が見られる。

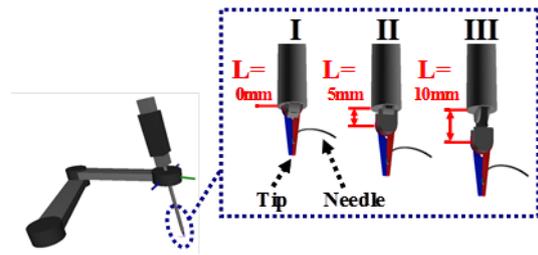


Fig. 5 Target instrument

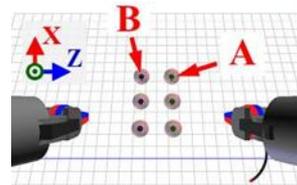


Fig. 6 Operator's view

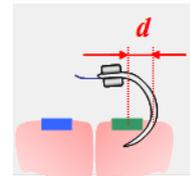


Fig. 7 Distance d

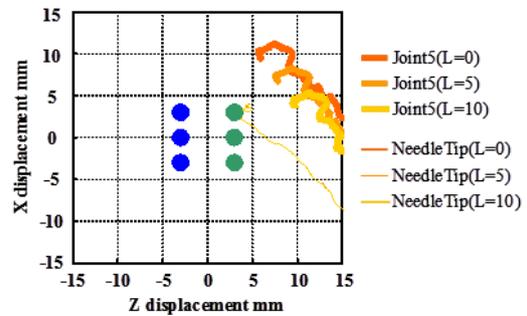


Fig. 8 Trajectory of joint and needle tip (constant)

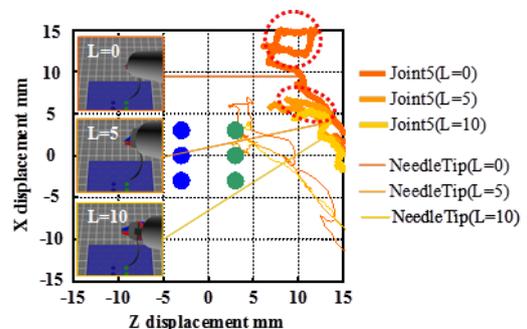


Fig. 9 Trajectory of joint and needle tip (operation)

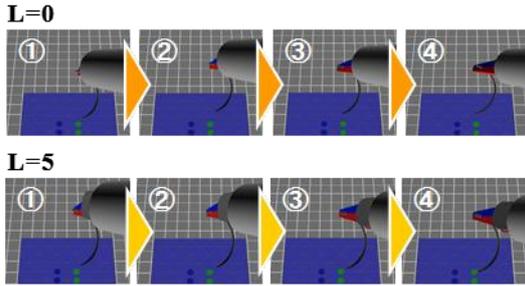


Fig. 10 Operation before suturing

余剰な範囲での動作が発生する直前の各術具の状態を Fig. 9 に示す。Fig. 9 より、 $L=0\text{mm}$ 、 5mm の各機構では術具に隠れて針の状態を確認し難いことが分かる。そのため、Fig. 10 に示すような動作を術者が行い、結果として余剰な範囲での動作が生じたと考えられる。よって、術者の操作は術具の状態や形状によって変化する可能性があると考えられ、手術支援ロボットの開発では設計の前段階で医師による操作を行うことが有効であると示唆された。

②針掛け動作時の精度に関して

本実験では、Fig. 1 に示すシステムを用いて仮想空間内に映しだされた手術支援ロボットを操作した。被験者は医師 1 名とし、Fig. 5 に示す術具先端の屈曲関節間距離 L を変化させた 3 種類の機構を用いて手技を行った。手技には手術の中でも基本的かつ重要な手技である針掛けを行った。この時、仮想空間内に針を挿入する点（刺入点）の目標点（Fig. 6 A 点）と針を取り出す点（刺出点）の目標点（Fig. 6 B 点）を表示し、刺入点・刺出点それぞれに対して目標点と実際に針が通った点との距離 d （Fig. 7）を手技の精度として計測した。針掛けは各機構に対して 6 回行った。刺入点における精度の平均値ならびに刺出点における精度の平均値を Fig. 11 に示す。Fig. 11 において、横軸は対象機構、縦軸は精度（距離 d ）を示している。Fig. 11

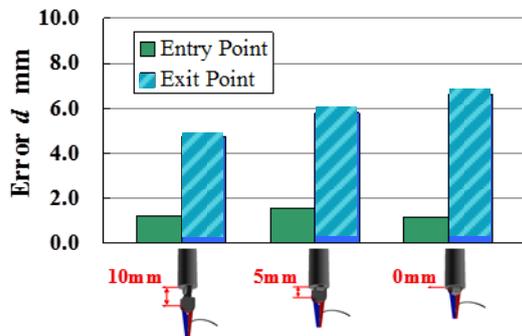


Fig. 11 Experimental result

の結果より、刺入点に対する結果では機構の変化に応じて精度に大きな差異が生じることはなかった。一方で、刺出点に対する結果では、 L の長さが短くなるほど精度が低くなるという傾向が見られた。

刺入点に対する結果に大きな差異が生じなかった理由について検討する。刺入点における精度は、針を挿入する際に針の先端が見えているか否かが影響すると考えられる。今回の実験では、どの機構を用いた場合でも針を挿入する際に針先端が確認できたため、精度に大きな差異が生じなかったと考えられる。次に、刺出点における精度に大きな差異が生じた理由について検討する。刺出点における精度は、針を挿入した際に術具先端の状態を確認できるか否かが影響すると考えられる。術具先端の状態を確認することが困難だった $L=0\text{[mm]}$ の機構を用いて針掛けを行った時の様子を見ると（Fig. 12）、術具先端を確認できるような方向に針掛けを行ったことで目標点の手前側から針を取り出していることが分かる。 L の長さが短くなると、針を挿入する際に術具先端を確認できない量が大きくなったことで、精度が低下したと考えられる。

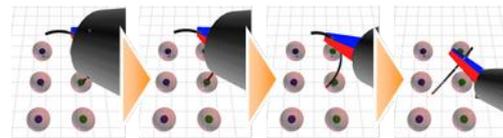


Fig. 12 Time series figure of suturing ($L=0$)

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 3 件）

- (1) Kazuya Kawamura, Hiroto Seno, Yo Kobayashi and Masakatsu G. Fujie, "Pilot Study on Effectiveness of Simulation for Surgical Robot Design Using Manipulability", Proceedings of 33rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp. 4538-4541, August, 2011 (査読あり)
- (2) Hiroto Seno, Kazuya Kawamura, Yo Kobayashi and Masakatsu G. Fujie, "Pilot Study of Design Method for Surgical Robot using Workspace Reproduction System", Proceedings of 33rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp. 4542-4545, August, 2011 (査読あり)
- (3) Hiroto Seno, Kazuya Kawamura, Yo

Kobayashi and Masakatsu G. Fujie, "Study of Design Method for Surgical Robot Using Surgeon's Operation Manner", the 7th Asian Conference on Computer-Aided Surgery (ACCAS2011), Proceedings in Information and Communications Technology (PICT), vol. 3, part 1, pp.10-19, August, 2011 (査読あり)

[学会発表] (計4件)

- (1) 瀬能洸冬, 川村和也, 小林洋, 豊田和孝, 家入里志, 橋爪誠, 藤江正克, "仮想手術環境下における医師の操作情報を規範とする手術支援ロボット設計手法に関する検討", 日本コンピュータ外科学会誌, Vol.13, No. 3, pp.230-231, 2011
- (2) Kazuya Kawamura, Hiroto Seno and Masakatsu G. Fujie, "Pilot Study on a Surgical Robot Simulation System using a Real Master Controller with Manipulability", Proceeding of the 6th Asian Conference on Computer Aided Surgery 2010, pp.93-94, November, 2010
- (3) 川村和也, 瀬能洸冬, 小林洋, 藤江正克, "手術支援ロボットの設計開発を支援する術空間再現シミュレーションシステムの構築", 第19回日本コンピュータ外科学会大会誌, Vol.12, No.3, pp.394-395, November, 2010
- (4) 瀬能洸冬, 川村和也, 小林洋, 藤江正克, "術空間再現シミュレータを用いた手術支援ロボットの設計手法に関する基礎的検討", 第19回日本コンピュータ外科学会大会誌, Vol.12, No.3, pp.406-407, November, 2010

[その他]

- (1) 第19回日本コンピュータ外科学会 講演論文賞受賞

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川村 和也 (KAWAMURA KAZUYA)
早稲田大学 理工学術院 助手
研究者番号 : 50449336

