

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：14603

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26560259

研究課題名(和文) 物理シミュレーションと統計学習に基づくカテーテル法の知能モデル構築

研究課題名(英文) Computational modeling of catheterization procedures based on physics simulations and statistical learning

研究代表者

佐藤 嘉伸 (Sato, Yoshinobu)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：70243219

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：カテーテル法は、血管に細い管を通して薬剤等を患部に到達させる、患者に負担の少ない医療手技です。しかし、その操作は、熟練を必要とし、経験のある医師でも難しい場面に遭遇することがあります。本研究では、医師が行うべきカテーテル操作を自動推定する問題に取り組みました。あらかじめ、患者の血管形状から、カテーテルの手技を行う際に起こりうるあらゆる状況をシミュレーションし、その結果に基づいて最適な操作を導きます。この技術は、将来の自動手術にもつながるものです。

研究成果の概要(英文)：Catheterization is a minimally invasive procedure. However, its manipulations need various expertizes and even experienced surgeons may encounter difficult situation during the procedures. In this study, we addressed the problem of automated prediction of the optimal manipulation of catheterization. Simulations of all possible patterns which can happen during the catheterization are performed using the patient vessel shapes beforehand. Based on the comprehensive simulation results, the optimal manipulations are derived. This study will be a potential technology needed for future automated surgery.

研究分野：生体医用画像

キーワード：医療人工知能 臨床意志決定支援 生体シミュレーション 手術支援 低侵襲医療 ガイドワイヤ 統計形状モデル 最適手術操作

1. 研究開始当初の背景

カテーテル法では、カテーテルと呼ばれる細い管を血管内に挿入し、カテーテル先端を体内の患部に到達させることにより、カテーテルの管を通して薬物や治療器具を患部に到達させる。低侵襲での(患者の体に負担が小さい)治療が可能になるが、一方で、カテーテルを体内深部にある患部に到達させることに特別な技量が必要となり、それを支援するシステムの研究が行われてきた。これまで、マイクロロボットによる能動カテーテル、医師のトレーニングを目的とするカテーテルシミュレーションシステム、カテーテル先端位置を血管マップ上に示すナビゲーションシステムが研究されてきた。しかし、目的とする患部に到達するための最適なカテーテル操作を予測する研究は行われてこなかった。

2. 研究の目的

本研究では、カテーテルの最適操作を予測する問題に取り組む。特に、技量を要するのは、血管分岐部における操作である。分岐部の形状によっては、目的とする血管枝にカテーテルを挿入することが難しい場合がある。本研究では、患者の血管形状が与えられて、血管分岐部でカテーテルをどのように操作すれば、(他方の枝ではなく)目的とする枝にカテーテルを進めることができるか?という点に着目する。

医師の手元で行うカテーテルの操作は、カテーテルの押し引きによる平行移動1自由度、および管の方向に沿った軸周りの回転1自由度の計2自由度である。加えて、カテーテルを誘導するために用いるガイドワイヤ(細くて柔らかい針金)の先端形状を可変にできる自由度がある。

当初、これらの自由度をすべて予測することを計画していた。しかし、予測に必要なシミュレーション計算は、予想以上に莫大な計算時間がかかり、ハイパフォーマンスコンピューティングを利用できる環境が十分に整備されている必要があることがわかった。そこで、より重要な部分問題である“ガイドワイヤ先端形状可変性の自由度”の予測に研究の焦点を絞ることにした。ガイドワイヤ先端形状によって、目的とする血管枝に円滑に入ることができるかどうかが大きく変わってくる場合があり、その最適形状を事前に血管分岐形状から予測することは、カテーテル法を円滑に進めるために効果的な支援となる。そこで、本研究では、分岐を含む血管内腔形状が与えられ、最適なガイドワイヤ先端形状を予測することを目的とする。

3. 研究の方法

3.1 予測方法(アルゴリズム)

予測方法については、(1)ガイドワイヤ先端形状の自由度の表現法、および(2)カテーテル挿入シミュレーションに基づくガイド

ワイヤ形状の適切性の評価、の2段階からなり、以下にそれぞれの段階について説明する。

(1)ガイドワイヤ先端形状の自由度の表現法: 統計的形状モデルの手法を用いてガイドワイヤ先端形状を表現した。実際に熟練医師が患者の血管形状に基づいて作成したガイドワイヤ先端形状を多数の患者で準備して学習データとした。その平均形状からの変動を、主成分分析で求めた直交基底で表現した。直交基底の係数の値を変化させることで形状変化を表現した。本研究では、第1主成分のみで、必要とされる形状可変範囲をカバーできるとみなして、第1主成分のみを用いた。すなわち、ガイドワイヤ先端形状可変性を統計学習で得られた基底関数の係数による1自由度で表現した。

(2)カテーテル挿入シミュレーションに基づくガイドワイヤ先端形状の適切性の評価: 物理シミュレーションで必要となる材料パラメータ(血管壁およびカテーテル、ガイドワイヤ)は既知の仮定の下で、個々のガイドワイヤ先端形状パラメータに対して、医師の手元の操作(押し引き、回転)の2自由度を網羅的に変化させて、多様な操作に対して、目的血管枝に確実に到達でき、かつ、血管壁を損傷する危険性のない安全なガイドワイヤ先端形状が適切と考えた。

図1に最適先端形状予測過程の模式図を示す。そのために、2自由度の操作パラメータ空間という表現を導入し、そのパラメータ空間において、(ガイドワイヤ)到達可能範囲、(血管壁)と損傷なく安全に挿入できる範囲を求め、“到達可能かつ安全な範囲”の“操作空間の全範囲”に対する比を“適切度”と定義した。これらの値は、0~1の正規化された値をとる。

適切度の値が小さいということは知恵の輪をはずすような(マージンがほぼ無い)ピンポイントの操作が必要であることを意味する。この値が大きいと簡単な(マージンの大きな)操作であることを意味する。本研究では、以上の概念を数理的に定式化した。詳細はここでは省略する。

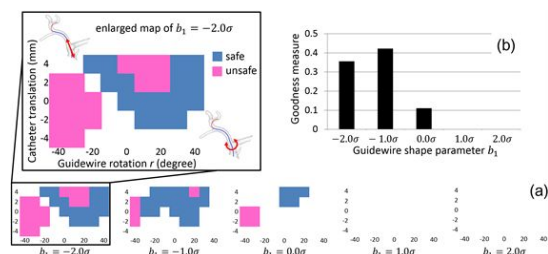


図1 2自由度操作パラメータ空間による最適先端形状の予測過程。(a)5つのガイドワイヤ先端形状に対するパラメータ空間。(b)各形状の適切度

3.2 検証方法(実験)

検証実験の方法については、8症例の患者CT画像から復元した血管形状に基づき作

成したシリコン製ファントムを用いて、実際のカテーテル挿入実験を行い、ガイドワイヤ先端形状の最適予測の結果と一致するかどうかを検証した。対象として、大動脈から肝臓の左葉を養う左肝動脈枝にカテーテルを挿入することを目的とした。特に、右肝動脈との分岐において、左肝動脈への挿入に手間取ることが多いことからこの対象を選んだ。

以下では、(1) 材料パラメータのキャリブレーション、(2) Ground truth データの作成、(3) 予測結果の検証、の3項目について順に説明する。

(1) 材料パラメータのキャリブレーション：シリコン製血管ファントムの材料パラメータとカテーテル・ガイドワイヤの材料パラメータを、実際にカテーテル・ガイドワイヤをシリコン血管ファントムに挿入した状態でCT撮影し、カテーテルとガイドワイヤの挿入時の3次元形状を復元した。図2に示すように、シミュレーションの結果がこれらの形状に一致するように材料パラメータを定めた。

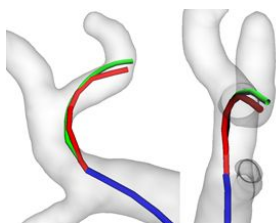


図2 ガイドワイヤ材料パラメータのキャリブレーション。緑：CT画像からの再構成。赤：シミュレーションによる推定。

(2) Ground truth データの作成：実際に、血管ファントムに対して、統計形状モデルで生成可能な5種類の先端形状のガイドワイヤを挿入して、目的血管枝（左肝動脈）に血管壁に引っかかることなく安全に到達できるかどうかを評価した。

(3) 予測結果の検証：ガイドワイヤ先端形状の適切度のうち、到達度と安全度に分離した0~1の間の値を定義した。Ground truthを用いて、到達度、安全度の有効性を検証した。図3に示すように、2つの尺度は、Ground truthの到達/非到達、安全/危険の2つの状態に対して有意差を示すことがわかった。

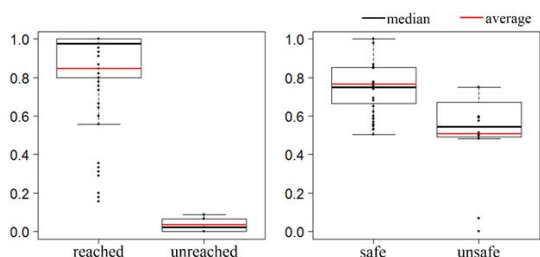


図3 到達度と安全度の検証。右図：到達度。左図：安全度。Ground truthにより到達可能/不可能、安全/危険と判定された先端形状について、それらの値の分布をプロットした。双方で、優位水準1%で有意差がみられた。

4. 研究成果

当初の研究計画では、カテーテル操作の自由度（ガイドワイヤ形状の自由度および手元の操作の自由度）に加えて、物理シミュレーションにおける血管壁材料パラメータをも網羅的に変化させてシミュレーションを行い、画像から患者固有の血管壁材料パラメータを推定するとともに、最適な手元操作も予測することを考えていた。しかし、前に述べたようにそれに必要な莫大な計算パワーを利用できず、カテーテル操作の自由度のみ網羅的に変化させてシミュレーションを行い、最適なガイドワイヤ形状を予測する方法を定式化するにいたった。

8症例の患者CT画像から作成した血管ファントムを利用して検証実験を行い、図3に示すように有効性が実証された。以上のように、意義のある成果が得られているが、研究発表を行うにはいたっておらず、現在、投稿に向けて論文準備中である。

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 0件)

〔学会発表〕(計 0件)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 嘉伸 (SATO YOSHINOBU)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学

研究科・教授
研究者番号：70243219

(2)研究分担者

大須賀 慶悟 (OSUGA KEIGO)
大阪大学・医学系研究科・講師
研究者番号：90332741
大竹 義人 (OTAKE YOSHITO)
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授
研究者番号：80349563

(3)連携研究者

()

研究者番号：