

論文の内容の要旨

論文題目 手術における術中画像認識による
自律的支援に関する研究

氏 名 黒瀬 優介

近年、手術支援システムは世界中に普及しており、すでに珍しいものではなくなっている。その代表格としてあげられるのがIntuitive Surgical社のda Vinci Surgical Systemである。da Vinci Surgical Systemは1999年に上市され、2000年にU. S. Food & Drug Administration(FDA)に承認された。医師が自分の手でやるよりも手術支援システムを使用した方が優れた精度を持つことが示され、臨床の現場において優秀な成績を収めてきた。da Vinci Surgical Systemはマスタ・スレーブ型を採用しており、操作者である医師がマスタマニピュレータを操作し、患者側にあるスレーブマニピュレータがその動作を縮小して再現する。これによって精密な動作を可能としている。

しかし、そのような手術支援システムにも問題点が存在する。現在の手術支援システムはマスタ・スレーブ型の場合は医師の動作をロボットが忠実に再現する、手持ち型の場合は医師の動作を忠実に実行できるように支援するといったものである。それぞれ手の振戦の除去や軌道を縮小することなどは行うが、ロボットが作り出す軌道は医師の意図と動作の上に成り立っている。このことは手術における医師の動作は絶対であり、もし ヒューマンエラーが起こった場合にもロボットは忠実にその動作を実行してしまうということである。また、現時点ではロボットが自動で医師の動作の何かを支援する機能は搭載されてはいない。もし、医師の動作をロボットが自動で支援することが可能となれば、医師の負担や疲労の軽減に繋がる可能性があり、それに加えてまだ手術経験の浅い医師にとっては手術自体の難易度を下げる可能性もあり、大きな可能性を秘めていると考えられる。

手術支援システムにおける自動化には様々な技術的な課題が存在するが、そのほとんどが安全性の確保と異なる環境への対応に関するものである。手術支援システムは手術によって患者に外科的な処置を施すという性質上安全性の確保は最重要項目に位置づけられる。また、実際に手術を行う体内の環境というのは患者個々によって異なるものであり、手術支援システムはそれらを判断し対応することが求められる。しかし、安全性の確保と異なる手術環境への対応というのは1つの技術的課題に集約される。それは、手術支援システムの情報処理能力の不足によるものである。ここでいう情報処理能力というのは、演算速度や情報処理量といった計算機環境のものではなく、手術支援システムの手術環境における環境認知能力のことを指す。安全性の問題は、手術支援システムが現在の手術の環境を正しく理解することなく動作をすることによって引き起こされる。一方、異なる手術環境への対応の問題は、手術支援システムが患者個々の異なる環境や状況を正しく理解していないことによって引き起こされる。現状の手術支援システムは操作者である外科医に情報を提示することはできるが、システム自身がそれを理解し、利用するということはできていない。体内環境という厳しい条件をクリアすることができ、環境認識能力向上に寄与できる可能性のあるものは、現在の手術支援システムでも使用されている内視鏡や顕微鏡から得られる術中画像である。

本研究では術中画像を利用して手術タスクを自動化することを目指してその要素技術の開発に取り組む。対象とするタスクには、繰り返し動作が得意であるロボットの特性を鑑みて、血管吻合術を採用した。より実際の手術環境に近い環境での手術タスクの自動化を目指すため、術中画像情報を利用して術具を認識する。次に術中画像中の血管の位置を自動認識し、システムに縫合針の理想的な刺入、刺出点を提示する。そしてそれらを利用して血管への自動刺入を実現するためのシステムを構築する。具体的には、先端に自由度を有する鉗子のトラッキング手法、顕微鏡下での血管吻合の自動化に向けた血管認識手法、顕微鏡画像情報を用いた血管刺入タスクの自動化の3つの技術開発に取り組む。また、本研究では血管認識手法と血管刺入タスクの自動化に関しては、脳神経外科手術の中でも難易度の高い顕微鏡下微細血管吻合術を対象として研究を進める。

まず、エンドエフェクタの機構学による誤差を補正するために術中画像中からエンドエフェクタの正確な位置・姿勢を取得する。これまでも画像中のエンドエフェクタの位置・姿勢を推定する手法は存在したが、それらは手術支援システムのエンドエフェクタ先端の自由度を考慮していないか、考慮している場合でもカメラの機構学も用いて推定している。しかし、現状の様々な手術支援システムにおいては、カメラシステムは手術支援システムから独立しているものがほとんどである。そのため、先端の自由度に対応したカメラの機構学を必要としない術具トラッキング手法を開発した。そのようなトラッキング手法の実現のため、本手法においては2ステップ・パーティクルフィルタを開発した。トラッキングの対象はda Vinci Needle driverとする。提案手法においてはまず、ステレオペアの入力画像に対してランダムフォレストによる色情報ベースのセグメ

ンテーションを施し、術具を先端部とシャフト部に分割し、それぞれの輪郭を抽出する。その後、2ステップ・パーティクルフィルタによってシャフト部、先端部の位置と姿勢をそれぞれ推定する。2ステップ・パーティクルフィルタにおいては、最初にシャフト部の位置と姿勢を先ほど得られた輪郭との尤度によって推定し、その情報を基にして、先端部の位置と姿勢を同様に先ほど得られた尤度を用いて輪郭推定する。パーティクルフィルタ内での尤度の推定では、各パーティクルを基に3DCADモデルを変形し、それを2次元平面に投影して輪郭モデルを作成することで入力画像中の輪郭との尤度を計算する。提案手法を実験室環境の動画2種類とin-vivo環境の動画の計3種類の動画に適用して評価を行なった。その結果、実験室環境の動画のみでなくin-vivo環境の動画についても高い精度でトラッキングできていることを確認した。

先ほどの2ステップ・パーティクルフィルタによる推定の結果、画像の奥行き方向に大きな誤差が見られた。この誤差を小さくするため、2ステップ・パーティクルフィルタの2次元輪郭同士のマッチングに3次元情報のマッチングを組み込むことで誤差を低減させることを試みた。提案手法の大きな流れは先ほどの2ステップ・パーティクルフィルタと同じであるが、先端部のパーティクルフィルタにおける尤度計算の際に3次元情報のマッチングを組み込んだ。ここでは、まず事前に入力画像のステレオペアの術具上のキーポイントを探索し、ステレオペアで対応する点のマッチングを行う。マッチングにより得られた点を、ステレオキャリブレーションを用いて3次元再構成することにより、3次元点群を得る。これらの点は術具表面の3次元表面を表現している。それらの点群とパーティクルを基に変形させた3DCADモデルとマッチングを施すことによって3次元情報のマッチングを行う。提案手法の有効性を確認するため、本手法を前章と同じ動画で評価を行なった。それによって、ほぼ全てで画像の奥行き方向の誤差が改善した。これは本手法の3Dマッチングが奥行き方向の誤差補正に有効であることを示している。

次に、血管吻合の自動化に向けて顕微鏡画像上で血管を認識する手法を開発した。本研究では、血管吻合に向けた血管認識手法であるため、血管の3次元形状を認識するのではなく、血管上における刺入点・刺出点、刺入・刺出方向を推定する。これらは血管に刺入・刺出する上で不可欠な要素である。提案手法においては、これまでと同様に色情報によるランダムフォレストを用いて入力画像のセグメンテーションを行う。この時血管と推定されたピクセルから血管の輪郭を抽出する。血管の推定においては軸方向を推定することが必要となるため、k-meansクラスタリング手法を用いて、軸方向に並んでいる輪郭を推定する。しかし、血管吻合においては血管上に鉗子などが3オクルージョンとして血管を分断するような形になることがあり得る。このような場合、刺入・刺出点の候補となる血管の端の候補が多くなってしまうため抽出した血管上で刺入点などの推定が困難となる。そのため、セグメンテーションの際に推定されたラベルを用いることで血管の再構成を行う。具体的には、血管間のラベルが背景であればその場所は血管の端である可能性が高く、逆に鉗子であればそれはオクルージョンである可能性

が高いと推定できる．これらの情報を用いることで血管の再構成を行う．その後, Random Sampling Consensus (RANSAC) アルゴリズムにより軸方向の傾きを推定し, それを刺入・刺出方向と推定した．また幾何学的計算により, 刺入点と刺出点を推定する．提案手法の有効性を確認する評価実験においては, 実験室環境と実際の手術動画の両方に適用し, 手法の有効性を確認した．

最後にデモンストレーション学習による微細血管への針の自動刺入の手法を構築した．この手法は事前に術者が複数回のデモンストレーションを行い, それを学習することによって血管の位置や姿勢が変化してもそれに合わせて軌道を変更させる手法である．従来手法では微細血管の刺入に重要な精度の問題をクリアすることはできなかったが, 始点から見た軌道と終点から見た軌道を組み合わせることによって精度を向上させた．また提案手法の有効性を確認するため, 学習の際とは違うデータに提案手法を適用したところ微細血管に自動刺入できることを確認した．

本研究においては, 画像情報を利用するというアプローチによって手術タスクを自動化することを目指して, それに必要な技術の構築を進めてきた．これらの技術は血管吻合の自動化には不可欠な技術であると考えられ, これらを手術支援システムに搭載することで手術支援システムの環境認識能力の向上に寄与することができると考えられる．