

博士論文（要約）

顕微鏡下微細手術支援ロボットの
自律支援に関する研究

田中 真一

顕微鏡下微細手術は、手術顕微鏡を用いることで1 mm程度の小さな臓器を対象として治療を行う手術である。対象となる臓器が非常に小さいことに加えて、振幅がおよそ100 μm の振戦とよばれる生理的な手の震えの影響から、手技では高い熟練度が必要とされている。このような特徴を持つ顕微鏡下微細手術に対して、近年ではロボットの持つ高い位置決め精度や信号処理技術を用いて支援を行う手術支援ロボットの開発が行われている。これらのロボットでは、信号処理技術を用いて振戦を取り除きつつ、医師の動作を縮小して再現することにより震えのない細かな動きを容易に実現することを目的としている。一方で、どのような手術器具の操作を行うかという点に関しては医師がどのようにロボットを操作するかということに依存しているため、手術の結果に関しては医師の熟練度・経験に依存しているのが現状である。そのため、手術支援ロボットを用いることで必ずしも良好な手術成績を残せるとは限らず、自動化や動作のガイダンスといったより自律的な支援を行う必要がある。

顕微鏡下微細手術において自律的な支援を行なうためには、手術の状況を把握するための環境認識技術と、その情報をもとに実際に支援を行なう支援技術の双方が必要不可欠となる。環境認識技術としては、手術中にある機器や臓器の配置を認識する技術や、医師がどのようなタスクを行っているかを認識する技術が支援のために必要となる。また、支援技術ではより適した動作を行なうことが出来るようにするために、手術支援ロボットをいかに制御するか、という技術が要求される。そこで、本研究においては、環境認識技術の物体認識のうち、そのベースとなる術具の手術顕微鏡画像からの認識技術、および顕微鏡下微細手術の手術動作の中でも複雑とされる吻合動作におけるタスク認識の開発に取り組み、支援技術においてはその吻合動作を構成するタスクの中でも、最も臓器に対して負荷をかける可能性があり、手術成績に与える影響が大きいと思われる運針動作に対して、動作ガイダンスにより支援を行なう手法を提案する。

手術顕微鏡画像からのロボット術具の認識では、立体視を行なうことが可能な手術顕微鏡から得られるステレオ画像を元に、手術支援ロボットに取り付けられた術具の位置や姿勢といった状態の推定を行った。提案手法では、事前にロボット術具の色に関するモデルと形状に関するモデルを構築して状態推定に用いる。色に関するモデルは事前にサンプリングした色をガウス分布に当てはめることにより構築し、形状に関するモデルは術具の様々な姿勢および開閉の状態における輪郭形状を保存することにより構築する。実際に状態推定を行なう際は、手術顕微鏡から得られたステレオ画像に対して色モデルを利用することで術具の輪郭を抽出し、形状モデルに保存された輪郭と比較することにより、現在の顕微鏡画像に最も一致する位置・姿勢および開閉状態を推定する。画像のみから状態を推定した場合、画像処理特有のノイズや右手と左手の術具が重なった場合等に誤差が非常に大きくなる恐れがある。そこで、提案手法では手術顕微鏡画像に基づいた状態推定に加えて、手術支援ロボットに取り付けられたエンコーダからロボットの機構学を利用して計算される位置・姿勢情報に、顕微鏡-ロボット間の座標変換を

適用することにより機構学情報を元にした術具の状態推定も行う。顕微鏡画像を元にした術具の状態推定、および機構学情報をもとにした術具の状態推定は粒子フィルタを用いることにより統合され、最終的な術具の状態推定結果とする。また、前述のように機構学情報をもとに状態推定を行なう場合は顕微鏡-ロボット間の座標変換を求める必要があり、通常は状態推定を行なう前にキャリブレーションを行なうことでこの座標変換を明らかにする。一方で、手術においては顕微鏡の位置を移動させることで視野を調整することがあるため、事前のキャリブレーション結果を利用することができない。そこで、状態推定により得られた術具の位置・姿勢を利用し、拡張カルマンフィルタを用いて術具の状態推定と並行して顕微鏡-ロボット間の座標変換を推定する。微細手術支援ロボットを用いた評価実験により、提案手法を用いることで手術顕微鏡から得られる画像を元に術具の状態を推定可能であること、および左手と右手の術具が重なり画像のみによる推定が困難な状況においても、運動学情報を利用することにより状態推定を行なうことが可能であることが確認された。

吻合動作におけるタスク認識では、手術支援ロボットから得られる動作に関する情報を利用することで、吻合動作を構成しているタスクを自動的に認識する手法を開発した。提案した手法では、タスクを認識するための特徴量として、手術支援ロボット先端に取り付けられた術具先端の速度、および角速度の方向を用いている。また、タスクを認識するために吻合動作のモデル化を行っており、そのモデルは各タスクにおける特徴量に関するモデルと、各タスクの時間遷移に関するモデルの2つのモデルから構成されている。特徴量に関するモデルには、クラス分類手法であるランダムフォレストを利用し、時間遷移に関するモデルには、left-to-right構造の隠れマルコフモデルを利用した。また、提案手法ではタスク間で類似した特徴量が得られることによりタスクの遷移が誤って検出されることを抑制することを目的として、それぞれのタスクが最低限継続すると考えられる時間を考慮した。隠れマルコフモデルにおいてタスクが継続すべき最低時間を導入したことにより、隠れマルコフモデルを用いて認識を行う際に通常用いられる動的計画法に基づく手法を利用することができないため、提案手法では粒子群最適化のコンセプトに基づいたタスク遷移の推定手法を採用した。評価実験では、工学部学生2名が実際に手術支援ロボットを用いて0.7 mmの練習用人工血管に対して吻合動作を7回ずつ行い、タスクの認識を行った。吻合動作を「針の把持」、「運針」および「結紮」の3種類のタスクに分類した場合は、14回の試行で平均して約90%の認識率が得られた。また、より細かな10種類のタスクに分類して認識を行った場合では、平均して約80%の認識率によりタスクの認識を行なうことに成功した。

動作ガイダンス手法では、吻合動作の中でも最も血管に対して負荷をかけるタスクであると考えられる運針タスクにおいて、縫合針と血管の接触部分である針穴の変位が抑制されるように手術支援ロボットを制御する手法を提案した。提案手法では、医師がマスタ・マニピュレータと呼ばれるロボットに動作を入力し、その動作をスレーブ・マニ

ピュレータと呼ばれるロボットが縮小して再現するマスタ・スレーブ型の手術支援ロボットを想定している。動作ガイダンスは、マスタ・マニピュレータに入力された医師の動作を、針穴の変位が小さくなるような運針動作が行われるように自動的に修正を行い、スレーブ・マニピュレータを制御することにより行われる。針穴の変位を抑えることにより、針穴に引張方向の力がかかる可能性を低減することができ、臓器の損傷を抑えることが可能となる。提案手法においては、動作ガイダンスの強度を変更出来るようになっており、完全に動作を修正することで針穴に沿った動作のみを許すような支援から、ある程度は医師の動作入力を反映する支援へと切り替えを行なうことができる。また、通常のマスタ・スレーブ制御ではスレーブ・マニピュレータの位置の制御をマスタ・マニピュレータの動作量のみを反映する相対制御、姿勢の制御を両者の姿勢を一致させる絶対制御により行なうことが通例であるが、姿勢に対して絶対制御を行なった状況で動作ガイダンスを行なうと操作性の低下が懸念された。そこで、姿勢に対しても運針タスク中のみ相対制御を行なうことにより、操作性の低下が抑制可能であるかを検討した。評価実験では、手術支援ロボットの機構学誤差等がタスクに与える影響を取り除くため、マスタ・マニピュレータを用いて操作可能なコンピュータ上で動作する運針シミュレータを作成し、評価を行った。評価実験の結果、姿勢に対して絶対制御を行った状況で動作ガイダンスを行った場合、操作性の低下により支援の効果が得られないことが確認されるとともに、相対制御に切り替えた状況では動作ガイダンスを強くかけるほど針穴の変位を抑制可能であることが確認された。加えて、動作ガイダンスを強くかけた場合は支援を行わない場合よりも針穴の変位が統計的に有意に小さくなることが確認された。