

論文内容の要旨

論文題目 : Image-guided Needle Insertion Instrument Adapted to Organ Motion and Deformation

(画像誘導による臓器運動補償型穿刺マニピュレータに関する研究)

氏名 : 洪 在成

背景

画像誘導手術は開腹せずに低侵襲で安全な手術を可能にする有効な方法で、近年多く用いられている。しかし呼吸、心拍、組織変形等により、術中に患部の位置と形状が変化することがあり、術前の画像だけを参考にして手術を行う場合、正確な治療部位の把握が困難である。そこで、本研究では術中画像を利用し実時間画像処理と制御を行うことによって臓器運動を補償する穿刺マニピュレータの開発を行う。

目的

本研究では移動または変形する対象に実時間対応可能な画像誘導穿刺マニピュレータの開発を行う。具体的には以下の通りである。

- 1) 超音波画処理による同物体と針の認識
- 2) 画像誘導に基づいた実時間フィードバック制御
- 3) 経皮的穿刺用マニピュレータの製作
- 4) 経皮的な穿刺治療のための穿刺経路の自動決定

穿刺の対象としては経皮的胆嚢ドレナージ(PTGBD)下での胆嚢とする。

方法

1) 穿刺マニピュレータ

開発したマニピュレータは皮膚を通過する点が固定点となり、針の穿刺角度と、針の先端とターゲットまでの距離とを調節して穿刺経路を決める2自由度を有する。穿刺角度の調節は機械的に安全性が高い仮想球運動方式を用いている。駆動範囲が $\pm 15^\circ$ で十分であるため、ガイドレールの大型化の問題はない。針の進行は針とシリコンローラの摩擦力を利用し、小型で自由なストロークの確保を可能とした。針のスリップとベンディングの問題は以下で述べる視覚サーボによって補正することができる。

2) 超音波画像認識

超音波画像は特有の劣化のため、対象の輪郭が鮮明でない場合がある。本研究で用いたアクティブコンチュア(Active Contour)とは画像自体の情報だけではなく適切なモデルを想定し、そのモデルの特性を同時に考慮して対象の輪郭を抽出する方法である。しかし、従来の方法は初期輪郭の設定状況によって収束過程に大きな影響を及ぼし、最終結果に誤差が生じる問題があった。本研究ではこの問題点を解決するために新たに運動適応型アクティブコンチュア(Motion-optimized Active-Contour)方法を提案した。これは輪郭の変化に加速と減速ファクター加え、収束速度の増加を図ると共に

初期値の影響を多く受けない特徴を有する方法である。穿刺針の認識のためには穿刺針は超音波画像で直線に近く見えることから着目してハフ変換を用いている。

3) ビジュアルサーボによる制御

本研究ではターゲットの移動または変形に実時間に対応するためビジュアルサーボコントロールを用いて穿刺経路の実時間修正を行った。これによって術中画像から常に穿刺ターゲットと穿刺針の位置を把握し、穿刺経路の修正が実時間に行われる。従って、患者または術者の予測外の動作が発生しても変化したターゲットの位置に合わせて適切な穿刺経路を即時、定め直すことができる。

結果

本システムの評価のためにはファントム実験とボランティアによる胆嚢超音波画像実験、そして動物実験を行った。ファントムとしては直径3cm のゴム風船を用いた。ファントムを動かした際、穿刺針の先端が実時間にその重心を追従するように設定した。この実験で穿刺経路の更新頻度は最大7.7回/秒であった。また最終穿刺精度は3.0mm であった。胆嚢超音波画像実験では実時間胆嚢認識誤差が1.5mm 以下であった。動物実験では、34kg のブタを用いて胆嚢と門脈を穿刺対象とした実験を行った。この実験で穿刺経路の更新頻度は約4回/秒であった。門脈穿刺の場合、穿刺精度は2.0mm であった。三つの実験で穿刺経路の更新頻度の差は主に穿刺対象の移動範囲と移動速度が異なることによるものと考えられる。

考察

本研究では穿刺ロボットの分野で今まで検討されなかった術中に起こる臓器運動による不正確な穿刺問題に対し、画像誘導を用いて臓器運動を補償する新しい方法を提案した。本研究で新たに提案した運動適応型アクティブコンチア方法は呼吸性運動により、移動と変形を持つ胆嚢の実時間認識に有効な方法であることが実験からわかった。画像に基づいて実時間制御は他のセンサーを使うより、単純でありながらより正確な制御ができることを示した。今後の臨床応用のためには臓器の3次元運動に対応することと、針の撓みの問題を考慮する必要があると考える。

結論

本研究では移動または変形する対象に実時間対応可能な画像誘導穿刺マニピュレータの開発を行った。動物実験など評価実験と検証を行った結果、開発したシステムの経皮的穿刺治療への貢献可能性を確認した。