

審査の結果の要旨

氏名：洪 在成

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)の学位論文は、開腹せずに経皮的穿刺治療を行う際、超音波画像を用いてターゲットと針を自動認識し、穿刺を行う外科手術支援ロボットに関する研究論文である。本研究の成果として正確な穿刺の妨げとなりうる臓器運動に対し、実時間画像処理と制御によってその動きを補償し、正確な穿刺を行うマニピュレータの開発に成功している。

本論文は8章からなり、第1章では画像誘導手術において臓器運動の影響とその対策の必要性を述べ、第2章では本研究の目的として超音波画像誘導によって移動または変形する臓器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ことを述べている。第3章では開発したマニピュレータの構造と機構的特徴について述べ、第4章では胆嚢と穿刺針の認識のための画像処理方法について述べている。第5章では画像誘導に基づくマニピュレータの制御について述べている。第6章では開発したシステムの性能評価のために行った実験とその結果について説明しており、第7章では本研究の工学的なまた医学的な効果と意味について考察を述べている。最後の第8章で結論を述べている。

開発したマニピュレータは2自由度を持っており、穿刺角度の調整のためには仮想球運動方式を、穿刺針の挿入のためには針とローラとの摩擦を用いた駆動方式を用いており、二次元平面上での安全で効率よい動作が実現できる構造となっている。

本研究では移動または変形する胆嚢に対し、実時間で精度の高いセグメンテーションを行っている。このために新たな方法である運動適応型アクティブコンチュア方法を提案しており、従来の方法では困難であった同物体に対して高精度の認識を実現し、その効果を証明している。針認識のためには基本的にハフ変換を用いているが、モータ制御用のパルスカウンタから運動学計算による針先の位置推定も同時に行っている。画像と運動学の相互利用により、組織の中に針が挿入され、画像で認識困難な場合でも信頼度の高い認識を実現している。

また、本システムではセンサなどを一切使用せず、画像から制御に必要なすべてのパラメータを求める視覚サーボによる制御を行っている。穿刺対象の移動や変形を画像で確認し、実時間フィードバックに基づいた穿刺経路の自動修正を実現している。

開発したマニピュレータの性能を評価するために三つの種類の実験を行っている。まず、胆嚢のモデルとなるゴムバルーンを穿刺対象として用いたファントム実験では、呼吸性運動に相当するファントムの実時間平行移動に対し、7回/秒以上の穿刺経路の更新に成功している。移動運動のみならず変形を持つ人の胆嚢を撮影した超音波画像を用いたボランテ

ィア実験では、開発した方法による実時間胆嚢認識を確認しており、1.5mmの認識精度を達成している。最後にブタを用いた動物実験では胆嚢と門脈に針先が実時間追従できることを確認しており、門脈穿刺の場合、穿刺経路の自動決定の後、針の手動挿入を行った結果として2mmの精度を達成している。

方法と評価実験の結果から、画像誘導手術において超音波画像処理の有効性が検証されており、臨床的に経皮的な穿刺治療において新たな手段としての可能性を持つと判断できる。次の研究課題として挙げられている臓器運動の3次元的な対応と針の撓み問題に関する対策が今後十分検討されることでさらに活用度が高い装置への発展が予想される。

本論文の結論として、開発した穿刺マニピュレータは術中起こる臓器運動に対し実時間対応が可能であることから、経皮的な穿刺治療において穿刺経路の自動設定と高精度の穿刺が実現でき、経皮的な穿刺治療のための有効な支援装置への発展可能性を述べている。

以上のように本論文では超音波画像を独創的な画像処理方法により処理し、実時間に胆嚢と針の認識を行い、穿刺経路の自動決定と高精度の穿刺を可能とする方法を開発した。開発した穿刺マニピュレータは近年多く行われている低侵襲手術を支援する新たな装置として発展することが期待される。

なお、本論文は、九州大学の橋爪誠 教授、小西晃造 先生、東京大学の土肥健純 教授、波多伸彦 講師との共同研究であるが、論文提出者が主体となって開発及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。
したがって、博士（科学）の学位を授与できると認める。