

論文審査の結果の要旨

氏名 鄭 常賢

本論文は6章から構成され、第1章では本論文で扱う骨折整復という手術手技について述べ、求められる工学的支援の内容、ロボット工学技術を応用する意義ならびに、従来研究を紹介し、ロボット技術を骨折整復に応用する場合の課題を論じている。第2章では本研究の目的を、骨挿入ピンを直接骨片に挿入し、このピンを保持するリングを牽引・回旋することで骨折整復を行う骨折整復ロボットシステム（直達式骨折整復支援ロボットシステム）の実現に関して、危険源の分析に基づく安全性を考慮した骨折整復ロボットシステムの設計、その動作制御方法の提案と実装、手術ナビゲーションシステムの統合を行うこととしている。

第3章では従来の手術支援ロボットの安全性に関する議論をふまえつつ、本骨折整復ロボットシステムに存在する危険源を分析・整理している。直達式骨折整復支援ロボットシステムでは、直接骨にピンを挿入し骨片を操作することから正確な骨折整復が可能である反面、筋肉などの軟部組織に対する過剰な牽引・回旋トルクの付加による損傷を与える可能性や、過大な力を挿入ピンを介して骨に加えることによる骨組織損傷の可能性を指摘した。これらの議論から一般的な手術支援ロボットの安全性要件に加え、直達式骨折整復支援ロボットシステムにおいては牽引力・回旋トルクを許容範囲に抑制すること、骨折した近位骨片と遠位骨片の距離を過大にしないこと、整復操作中に挿入ピンに加わる力を推定し許容範囲に抑えることが重要であることを示している。また骨折した骨片の整復軌跡を術前計画する際に、筋弛緩された状態での受動的な筋肉特性を用いた筋骨格モデルにより、あらかじめ整復時に必要となる牽引・回旋トルクを見積もる手法を提案し、この解析を整復中の過剰な牽引力検知に応用することを提案している。

第4章では直達式骨折整復ロボットの要求仕様を論じ、実現したロボットシステムの構造・機構設計、ロボットシステムと骨挿入ピンを保持するリングを接続する治具の構造を説明している。また過剰な牽引力・回旋トルクをロボットシステムが骨に加えることを防止するために設置する機械式のフェイル・セーフ機構の構造を示し、その基本特性の評価を行っている。骨折挿入ピンに加わる軸力・トルクを測定するために力センサを骨挿入ピン付近に設置することは、滅菌性の確保の観点からは臨床的には現実的ではない。骨挿入ピンを保持するリングに加わる力・トルクをロボットアームに設置した力センサによって計測することは可能であるが、この計測値から骨挿入ピンに加わる力を計算する問題は、ピン等の構造部材の変形を考慮しなければならない不静定問題となる。あらかじめピンが骨片に対して強固に固定されているという仮定の下で有限要素法にて挿入ピンとリングの変形解析を行うことで、骨挿入ピンに加わる軸力に関しては推定が可能であること実験により示した。また、本ロボットシステムの動作速度を牽引力・牽引トルクの値に依存して制御する手法の実装と基本性能の評価結果を示し、ロボットが

発生する力によって安全側に速度制御がなされることを示した。また手術ナビゲーションシステムとの統合方法を示している。

また、直達式骨折整復ロボットの動作制御方法として、先行研究によりその有効性が示されている直感的に術者がロボットシステムを動作させるパワーアシスト制御に関して、直達整復にて求められる骨片と骨片の間隔や移動方向や回転方向を解剖学的に適切な方向に制限する機能を付加する拘束パワーアシスト手法を提案し、その基本特性を実験により求めている。

第5章では骨折させた模擬骨の周囲に筋肉を模擬したゴム帯を設置した反力発生可能な骨折ファントムを用いた模擬骨折整復実験結果を述べている。パワーアシストによる骨折整復実験では模擬実験において骨に加わる力を制限の有無による動作結果を比較し、提案する骨折力制限方法は整復力を自然な形で一定以下に抑制できることを示している。骨からの反力がある状態での拘束パワーアシスト制御の評価では、回転拘束を加えた場合に回転中心の変位が4mm以下であったことを示している。また手術ナビゲーションシステムとの統合を行い骨折の自動整復を試み、骨の機能軸 (Mechanical Axis) に対する偏角ならびに整復後の骨の機能軸長で評価した値で、標準的な値に対して3度、3mm以下の精度で整復が可能であったとしている。

第6章では本論文の結論と今後の課題を述べている。

本論文の成果は安全な骨折整復支援ロボットシステムの実現手法を提案しており、骨折整復治療の正確性・安全性の向上に寄与する成果である。したがって、博士(科学)の学位を授与できると認める。