

論文題目「穿刺ロボットによる脊椎体穿刺に関する研究」は従来X線透視下で手技にて行なわれていた経皮的椎体形成術をより確実かつ安全に実施するために開発が期待されている椎骨穿刺ロボットの開発にあたり、ロボットに必要な構造的強度および出力の推定 2) 適切な穿刺を行うための針の刺入方法の検討を行ったものである。

本論文は8章からなり、第1章では本論文で取り扱う脊椎体穿刺が必要となる経皮的椎体形成術について説明し、その課題を分析しロボット技術導入の必要性を論じ、脊椎体穿刺を安全に行うためには、穿刺針にかかる軸方向反力が小さい、経路の計画に対するずれが小さい、穿刺に要する時間が短いという3条件を満たす穿刺が求められるとしている。第2章で本研究の目的を示している。第3章では実験に使用する椎体形成術用椎骨穿刺ロボットの要求使用ならびに設計について論じ、その機能を説明している。第4章では、ホルマリン保存ヒト椎骨の穿刺実験による椎体骨穿刺過程における穿刺反力の解析、針回転角度、針回転数等の諸条件と軸反力の関係を実験的に検討した結果を述べ、第5章ではポリウレタン製の模擬骨試料を用いて、穿刺ロボットの駆動条件を変えながら、穿刺条件の検討を行い椎体骨のロボットによる適切な穿刺方法を提案している。第6章では、専門医による穿刺動作の解析結果と本論文で提案するロボットのよる穿刺動作の比較検討を行いその差異を論じている。第7章では本研究で得られた成果とその意義を考察し、第8章で結論を述べている。

経皮的椎体形成術における椎骨穿刺従来X線透視下で手技にて行われており、椎弓根という非常に限られた経路にそって穿刺するという作業自体が困難であり、また、作業中のX線透視により穿刺針を持つ術者の手が連続的に被曝するという問題が存在する。これらの問題解決方法としてロボットによる椎骨穿刺が考えられる。

ロボットに必要な構造的強度および出力の推定にあたっては、ホルマリン保存された椎骨をロボットで穿刺し、送り速度や回転速度を変えながら軸方向反力を測定し、さらに穿刺後X線CT撮影により穿刺経路を確認した。その結果、軸方向反力は経路に沿った密度分布にしたがって増減するが、刺入初期の最大値は約50Nであったと述べている。従って、刺入開始直後のみ骨表面付近の高密度部分を通過するような理想的な経路に沿って針を刺入することを想定した場合、ロボットには50N前後の軸方向反力に対抗し得る構造的強度と穿刺力が必要であると述べている。

試作した椎骨穿刺ロボットでは針刺入開始点および刺入方向を決定した後、軸回りに連続回転させながら針を送る方式を採用し、椎骨周辺の血管や神経の巻き込みの危険を軽減するため正逆2方向の針回転を交互に繰り返す設計としている。

次にファントムを試作ロボットで穿刺し、針先端形状の選択、および針の軸回り回転振幅・送り速度・軸回り回転速度の調整方法を検討している。ファントムには骨密度分布を模擬し、高密度の表面部分と低密度の内部からなるポリウレタンファントムを使用している。針先端形状に関しては使い捨て使用に適した単純な形状として三角錐および四角錐に限定し先端の頂角を変えながら検討し、隣接面のなす挟み角が小さくエッジ部分が長いことで回転による骨切削を効果的に行う頂角の小さな三角錐型で、軸方向反力および斜刺入時の穿刺経路ずれが小さくなること述べている。針の軸回り回転振幅については、針のエッジ部分で針軸回りを限なく切除するだけの十分な振幅を持つ回転を行うことで軸方向反力を低減できることを示している。針の送り速度・回転速度について検討した結果では、小さな軸方向反力、小さな経路の計画に対するずれ、短い穿刺時間という3条件を満たす送り速度・回転速度の調整方法は相反するが、穿刺の進行の段階ごとに優先順位を付け、1) 穿刺開始から針が2-4mm刺入されるまでの

段階では経路の横ずれ量を低下するために送り速度を大きくし回転速度を小さくする，2)以降高密度層を完全に通過するまでの段階では軸方向反力を低下するために送り速度を小さくし回転速度を大きくする，3)以降穿刺終了までは所要時間を短縮するために送り速度を大きくし，軸方向反力が過大にならないよう回転速度をも大きくする，という調整方法により解決されることを示している。

専門医による手技穿刺時の穿刺反力および針動作を測定し，手技では刺入初期段階では横ずれを防ぐため主に針の押し込み動作を行っており回転が小さく，初期段階以降回転を積極的に行い針の刺入抵抗を減少させていることを示している。これは上述したロボット穿刺における針送り速度・回転速度の調整方法とおおよそ一致するものであった。また，ロボット穿刺においては，手技穿刺よりさらに大きな軸回り回転振幅および回転速度により組織切削を効果的に行い軸方向反力を低下できると述べている。

本論文の成果は、経皮的椎体形成術における椎骨穿刺を対象とした専用のロボットを開発し，ロボットに必要な構造的強度および出力の推定と適切な穿刺を行うための針の刺入方法についての工学的な検討を実際にヒト骨などを用いて行っており，得られた結果は椎体骨穿刺をはじめとする安全な骨穿刺を行う整形外科手術支援ロボット開発に有用な内容であると判断する。

なお，本研究は日立製作所の桃井康行，大阪大学の小山毅，菅野伸彦，越智隆弘，国立大阪南病院の米延策雄，田村裕一，東京大学の佐久間一郎，稲田紘との共同研究であるが，本論文の内容は，論文提出者が主体となって実験システムを作り上げ，適切な穿刺条件の検討を行ったもので，論文提出者の寄与が十分であると判断する。よって，本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。