

審査の結果の要旨

氏名 別宮 彰

本論文は、経皮的椎体形成術に代表される穿刺手術において、手術支援装置と患者の幾何関係を術中に維持することを目的として、術中に患者体表形状に合わせて変形し体表に密着した状態で硬化する体表固定装置をジャミング転移現象と吸着装置を用いて実現し、その性能について検討を行い、成果をまとめたものである。ジャミング転移現象を用いて物体の形状を任意に制御する装置は近年提案されたが、ジャミング転移現象により硬化した装置全体の剛性および固体様から流体様への相転移の起こり易さについて解析した例はない。本論文では、ジャミング転移現象を起こす粒子形状に着目し、数値シミュレーションとせん断試験により、粒子間のすべりによる固体様の崩壊について研究した。また、人体形状に合わせて体表固定装置の設計を最適化し、その固定について装置単体性能および人体体表上での性能の両面から検討した。

第一章は序論であり、術中において患者－手術支援装置間の幾何関係を固定することの重要性、従来の手術支援装置における侵襲的な固定手法および非侵襲的な体表固定における現在の課題について説明している。また、体表に対する固定手法について論じ、ジャミング転移現象を用いた非侵襲的で強固な体表固定装置の有効可能性について述べている。

第二章は提案手法の特徴であるジャミング転移現象について、固体様時の粒子群としての剛性について、粒子間の摩擦力に着目した検討が行われている。ジャミング転移現象により粒子群が固体様となった際、圧縮応力および引張応力に対しては粒子配置が崩れ難いため剛体として振舞うが、せん断応力に対しては粒子間のすべりが生じ配置にずれが生じ易いため、剛性が低く外力を加えた際の変形量が大きいことが課題となっていた。これに対して、粒子の形状に着目し、形状によって粒子間接触力およびすべりに差があり、摩擦力において差が生じることを見かけの摩擦係数の違いとして説明し、この違いが粒子群の剛性を決定することを指摘している。

第三章は異なる形状の粒子において、ジャミング転移現象によって粒子群が固体様となった際のせん断応力に対する剛性について、数値シミュレーションおよび一軸せん断試験による評価を行なっている。結果、球のような粒子形状に対して、突起のある粒子形状、特に粒子の回転を三次元的に拘束するテトラポッド状の粒子形状における見かけの摩擦係数が高いことを示し、ジャミング転移現象を用いた固定装置のための粒子形状の選定におけ

る重要な基準を提示している。

第四章は経皮的椎体形成術のための手術支援ロボットに用いる体表固定装置について、必要な性能および実装の仕様を第三章における粒子の選定基準および手術支援装置の非侵襲的で強固な体表固定の観点から述べている。体表固定装置の設計について、人体体表形状データを解析することで、人体背面の腰椎周辺部に固定するために必要な装置形状および寸法について有効性を確認し、その上での実装手法について説明している。

第五章では、実装した体表固定装置の患者－手術支援装置間の幾何関係を術中に維持する性能の評価が行われている。幾何関係の拘束のためには、固定装置の患者体表への固定力および剛性が、人体体表上に固定された場合において十分に高いことが必要となる。そこで人体体表形状データに基づいた人体形状ファントム上に提案した体表固定装置を固定し、固定力を吸着機構における負圧値から評価している。そして、固定装置の剛性を外力による変形量から評価しており、剛性が十分であることを示している。また、穿刺動作時の体表固定装置の安定性を人体形状ファントム上での穿刺実験において評価し、安定性が十分であることを明らかにしている。さらに人体体表上に提案固定装置を固定した際に、患者－手術支援装置間の幾何関係の維持性能を、外力に対する幾何関係の変化量から評価したことで、穿刺によって手術支援装置にかかる外力の範囲内において十分に維持可能であることが述べられている。

第六章は本論文の総括と今後の展望について説明している。第二章から第五章の研究の理論および成果について述べ、本論文において提案した手法の効果およびその限界について述べている。

第七章では本論文を章ごとに振り返り、全体の総括を行っている。

以上をまとめると、本論文は、手術支援装置を非侵襲的かつ強固に患者体表に固定するために、患者体表形状に追従するように変形し、任意に硬さを制御することが出来る体表固定装置を提案した。体表固定装置への応用のためには、ジャミング転移現象を用いた粒子群の剛性を向上させる必要があるが、その目的において粒子形状が重要な役割を果たすことを確かめた。また、経皮的椎体形成術のための体表固定装置を実装し、実際の手術に近い環境下において人体体表上で安定かつ強固に固定できることを示した。これらの成果より、本研究はバイオエンジニアリング分野に貢献していると判断できる。

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。