

## 論文の内容の要旨

論文題目 ジャミング転移現象を用いた医療装置の体表固定に関する研究  
氏名 別宮 彰

コンピュータ支援外科(Computer Aided Surgery: CAS)において、手術支援システムと患者の固定は重要な課題の一つである。手術支援システムにおいては、システム座標上で対象患部の位置が既知であることが、システムが精確な動作を行うための一つの条件となる。手術支援デバイスと患部を金属ピンで固定する場合は、急な体動によるピン挿入部への応力集中で過負荷が生じ、骨折などの傷害につながる危険性がある。手術支援システムと患部の相対位置関係は、位置合わせ(レジストレーション)により求められる。レジストレーションにおいては、X線画像が繰り返し撮影されることが多く、被曝量が問題となる。手術支援デバイスが小型軽量でかつ固定が十分に強固な場合において、物理的固定方法は、急な体動にも追従し、過負荷の可能性も少ないため、有効な選択肢として考え得る。しかしながら、従来法では侵襲量と固定性能は二律背反であり、両立は困難であった。本研究では、手術支援システムと患部の固定を低侵襲かつ強固に行う手法を提案した。具体的には、医療デバイスに固定され患者体表に吸着するパッドを開発した。開発したパッドは、固定力を向上するためにジャミング転移現象<sup>1)</sup>を利用した。パッドは軟質容器とそれに内包された粉体で構成されており、パッドの外形は吸盤形状となっている。開発したパッドは固定の初期段階において患者体表を転写した後、ジャミング転移現象を利用して硬さを制御することで、術中において患者体表を転写した吸盤となる。以上の機能により、開発したパッドは低侵襲かつ強固な医療用固定装置として機能する。

ジャミング転移現象は、粒子系の流体様と固体様の間における相転移現象である。粒子系の充填率を高くした場合、ジャミング転移現象により隣接する粒子間に拘束がかかり、粒子系が全体として剛体として振舞う。本研究ではこの現象を、パッドの硬さの制御に利用する。しかし、粒子の充填率が高い場合においても、せん断応力が許容量を超えて大きい場合、粒子間の拘束が解けて、固体様から流体様へと逆の相転移を起こす<sup>2)</sup>。よって、固定装置の実装を行う場合、必要な剛性を確保するために、せん断応力による装置の変形量を抑える必要がある。そのためには、粒子間摩擦力を大きくすることが必要である。

せん断応力による粒子系の変形に対する反力としての粒子間摩擦力の大きさは、粒子形状により異なる。そこで、固定装置を構成する適切な粒子形状を決定するため、異なる4種類(Sphere, Rod, Triangle, Tetrahedron)の粒子について、数値計算により粒子形状と粒子間

摩擦力の関係性を評価した。粒子間接触力及び摩擦力は、フオークト・モデルと Hertz の接触応力を用いて算出した。粒子はヤング率 0.8 GPa, ポアソン比 0.3, 体積  $6.82 \text{ mm}^3$ (球体積相当半径 1.295 mm), 比重が  $0.002 \text{ g/mm}^3$  であり,  $100 \times 20 \text{ mm}^2$  の断面積をもつ容器内に 2445 個を充填した状態を初期条件とした。充填状態で粒子間での拘束を発生させ, 粒子間摩擦力を評価した。数値解析の結果, Tetrahedron 形状が最も粒子間摩擦力が高いことを確認した。

次に, 粒子形状と粒子間摩擦力の関係性について, 1 軸せん断試験による評価を行った。3D プリンタ(ZPrinter650, 3D Systems, Inc.)を用いて石膏材料(zp150, 3D Systems, Inc.)で粒子を作成し, 異なる 4 種類(Sphere, Rod, Triangle, Tetrahedron)の粒子について 1 軸せん断試験によりせん断面に生じる摩擦力を計測した。粒子の球体積相当半径は 1.5 mm とし, せん断面の面積は  $1500 \text{ mm}^2$ , せん断速度は  $0.25 \text{ mm/sec}$  とした。せん断試験機内の真空圧は  $50.0 \text{ kPa}$  として, 大気圧により試験機のシリコンゴム部を変形させて粒子を圧縮し, 粒子系を固体様状態とした。せん断面の摩擦力は 6 軸力センサ(IFS-67M25A50-I40, NITTA Corporation)を用いて計測し, 試験回数は 25 回とした。せん断試験の結果として, Tetrahedron 形状粒子の粒子間摩擦力が最も高いことを確認した。

体表固定装置を導入するにあたり, 目標とする固定面に対して適切な装置の設計は重要である。本研究においては, 人体背面から手術を行う脊椎穿刺手術支援ロボットを対象として, 提案固定装置を開発した。固定対象となる人体体表形状は AIST/HQL 人体寸法・形状データベース 2003<sup>3)</sup>を用いて解析した。提案する固定装置は, 患者の体表に密着することで機能する。よって, 装置厚み方向にパッドの変形マージンが必要となる。しかし, 装置厚みが不必要に大きい場合, 患部から手術デバイスまでの距離が増加し, 手術精度低下の原因となる。よって, 装置厚みについて, 適切な値の検討が必要である。厚み  $d$  の固定装置を患者背面に固定する場合, 患者体表の凸部を避けずに固定する場合と避ける場合においては, 固定装置における接触可能面の割合が異なる。凸部を避けずに固定を行った場合, 固定装置全体の 75%が接触するのに必要な固定装置の厚み  $d$  は男性が平均で 28.12 mm, 女性が 29.68 mm であった。凸部を避けて選択的に固定を行った場合, 男性が 20.45 mm, 女性が 22.95 mm であった。よって, 提案する医療用体表固定装置のパッドは, 厚みを 25 mm とした。また, 患者体表の凸部を選択的に避けることを可能とするため, パッドは 3 脚型とし, 任意に選択した位置で患者体表に安定に固定されるよう設計した。

以上より, 固定装置の仕様を決定した。パッドは 0.5 mm 厚のシリコンゴム引布で構成し, パッド構造体内部の粒子は 3D プリンタ(ZPrinter 450, 3D Systems, Inc.)で製作した Tetrahedron 形状粒子とした。パッドが患者体表面上で硬化したとき, 吸着部の外縁はゲル材料(CRG-N0505, TANAC Co.,Ltd)により密閉される。負圧発生装置は, エアーコンプレッサー(CP-100, NAKATOMI Co.,Ltd)と真空発生器(VBH07-66P, PISCO Co.,Ltd)で構成した。吸引圧については,  $-50 \sim -20 \text{ kPa}$  に設定する。

提案装置の固定性能は, 固定力および固定時の装置剛性により決定する。提案装置の固定

力を評価するため、平面及び人体形状ファントムに提案装置を固定し、真空吸着部の真空圧から固定力を求めた。平均固定力は平面及びファントム上で  $172 \pm 6 \text{ N}$  及び  $166 \pm 8 \text{ N}$  であった。装置の重量がおよそ  $2 \text{ kg}$  であるため、十分な固定力を確保できることが確認できた。

提案装置の剛性を評価するため、平面及びファントム上固定時に装置に荷重を加え、その荷重に対する装置の変形量を評価した。実験においては、異なる粒子径(2, 3 及び 5 mm)の粒子ごとの剛性の評価と、異なる荷重方向ごとの剛性の評価を行った。Tetrahedron 粒子の直径と装置剛性の関係について、直径が小さいほど剛性が高いという結果が得られた。荷重方向と装置剛性の関係については、提案装置を人体形状ファントムに固定した際、50 N の垂直下向方向の荷重に対して  $0.10 \pm 0.01 \text{ mm}$ 、水平方向の荷重に対して  $0.35 \pm 0.11 \text{ mm}$ 、垂直上向方向の荷重に対して  $0.04 \pm 0.01 \text{ mm}$  の変位量が生じた。提案装置はせん断応力に対しては剛性が下がるが、50 N 荷重に対する変位量が 1.0 mm 以下であるため、十分な剛性を持つことが示された。

脊椎穿刺動作を行う際の、提案装置の固定性能を評価した。手術支援ロボットに提案装置を取り付け、人体形状ファントム上に固定し、ロボットの穿刺ガイドから 5 mm の穿刺針を挿入した。穿刺方向に 25 N の力で穿刺動作を行い、固定装置の固定対象からのずれ量を計測した。結果として、穿刺動作による平均ずれ量は  $0.05 \pm 0.03 \text{ mm}$  であり、1.0 mm 以下の範囲に収まった。以上から、提案装置が十分な剛性と固定力を持って対象表面に固定されることが示された。

提案した固定装置の人体体表上における安定性について評価を行った。固定装置を人体体表に設置した状態で外力を加え、装置の患者からのずれ量を計測した。具体的には、提案固定装置を患者体表上に設置し、装置に対して頭側、尾側、右側、左側、腹側及び背側に 0.5, 1, 2, 5, 10, 20 及び 40 N の外力を加えた際の、装置及び対象軟組織の変形による、初期位置からの相対的ずれ量を評価した。計測は、光学式三次元位置計測装置(OPTOTRAK, NDI)と測定マーカを用いて行った。固定装置の患者体表からの相対的ずれ量は、5 N 以上の外力がかかる場合では、大きくなった。実際の穿刺においては、主に針とロボットの針ガイドの接触によって腹側への荷重がかかり、針のたわみ方向にかかると考えられる荷重量は 0.5 N 程度である。腹側に 0.5 N 荷重がかかった場合の固定装置の患者からの平均ずれ量は 0.66 mm,  $0.46^\circ$  であり、許容範囲内に収まった。

本研究では、ジャミング転移現象を利用した、医療用装置の体表固定方法について研究を行った。提案固定装置のパッドについて、内包する粒子の形状とパッドの厚みについて最適化を行った。また、脊椎穿刺手術支援ロボットを対象として提案固定装置を実装し、評価を行った。結論として、ジャミング転移現象を利用するための粒子は、Sphere 形状は適切でなく、Tetrahedron 形状が至適な形状のひとつであることが示された。また、提案方法を用いた固定装置は、真空吸着部によって固定装置として十分な固定力を発揮し、ジャミング転移現象を利用することにより、対象固定時に高い剛性を示した。また、穿刺動作を行う小型手術デバイスと組み合わせた際に、穿刺時の動作安定性を確保することができた。人体体表

上に固定装置を用いた場合においては、穿刺術で針から伝わる力と想定されている 0.5 N 程度の力で手術支援デバイス上から外力を加えた際、穿刺術補助のための固定装置として有効に機能することを確認した。

#### 参考文献

- 1) Eric Brown, Nicholas Rodenberg, John Amend, Annan Mozeika, Erik Steltz, Mitchell R. Zakin, Hod Lipson and Heinrich M. Jaeger. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material. Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 107, No. 44, 2010.
- 2) A. J. Liu, et al. "Nonlinear dynamics: Jamming is not just cool any more," Nature 396, 21-22 (5 November 1998)
- 3) M. Kawauchi and M. Mochimaru, "AIST/HQL Measure of human body and shape data base 2003," National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, H18PRO-503, 2006.