

Use of an inertial measurement unit sensor in pedicle screw placement improves trajectory accuracy

馬場, 覚

<https://hdl.handle.net/2324/7157409>

出版情報 : Kyushu University, 2023, 博士 (医学), 論文博士
バージョン :
権利関係 : Creative Commons Attribution 4.0 International

氏名： 馬場 覚

論文名： Use of an inertial measurement unit sensor in pedicle screw placement improves trajectory accuracy

(角速度センサーを併用することで椎弓根スクリュー設置の正確性は向上する)

区分： 乙

論文内容の要旨

Boucher による脊椎椎体間固定術の発表以降、椎弓根スクリュー (PS) を用いた脊椎固定法の適応領域は拡大し、頸椎に応用されるまでに至っている。一方で、椎弓根スクリューの設置不良は動脈や神経根、脊髄損傷などの重大な合併症を引き起こす可能性があるため、その軌道の精度を把握することは重要である。PS 挿入を安全に施行するためには挿入起点の位置情報と椎体に対する PS の相対的角度情報両方の精度が重要である。

そこで本研究ではまず、人間の角度弁別能の曖昧さの検討を行った。方法としては、任意の角 ($0-90^{\circ}$) を被験者 (10 名) に対してランダムに画像提示し、その角度を読み取りデジタル分度器で再現させ、それらの差分を検討した。結果として、角度再現性に関して 0° から 60° 程度までは提示角度が大きくなればなるほど、提示角度と再現角度の誤差が大きくなる傾向を認め、人の角度推定能力はその表示角度により変化することが判明した (図 1)。その結果を元に、すでに多くの産業領域において安価に供給されており角度情報を手軽に得られる角速度センサー (IMU) を手術器具に設置することで角度のモニタリングが行える環境下で、IMU の補助が有益となる状況を特定することを目的とした。PS 挿入実験では、豚の腰椎を含む死体標本を使用した。CT 画像を PS 挿入前後に確認し、フリーハンド群と IMU 補助群における PS の計画軌道と設置軌道の誤差を分析した。PS の皮質骨穿破は、Gertzbein and Robbins classification system (GRC) に従って分類した。

PS の挿入精度を評価した結果、すべての挿入された PS において、術前に計画された PS の設置角度と術後に測定された PS の設置角度の頭尾側方向の平均誤差は、フリーハンド群で $4.00 \pm 0.50^{\circ}$ であったのに対し、IMU 補助群では $2.99 \pm 0.39^{\circ}$ (平均±標準誤差) であった ($p=0.0811$) (図 2. A)。この結果は、IMU の使用は PS 頭側への偏位を有意に減少させることができなかったことを示した。一方、術前に計画された内外側方向への誤差と術後に測定された PS の内外側方向への設置角度の平均誤差は、フリーハンド群で $8.93 \pm 0.95^{\circ}$ 、IMU 補助群で $3.29 \pm 0.42^{\circ}$ であり、PS の内外側方向への挿入はフリーハンド法よりも IMU 補助法の方が有意に優れていた ($p<0.00001$) (図 2. B)。この結果は、IMU の使用は PS の内外側方向への偏位を有意に減少させたことを示した。GRC によると (図 2. C)、フリーハンド群では、グレード A (椎弓根の皮質骨穿破なし) およびグレード B (椎弓根の皮質骨穿破 $\leq 2\text{mm}$) の割合は、それぞれ 55.8% (24/43) および 18.6% (8/43) であった。一方、IMU 補助群におけるグレード A および B の割合は、それぞれ 79.1% (34/43) および 20.9% (9/43) であった。グレード C、D、E の症例は IMU 補助群で観察されなかったが、グレード C ($2\text{mm}<$ 骨皮質穿破 $<4\text{mm}$) およびグレード D ($4\text{mm}<$ 骨皮質穿破 $<6\text{mm}$) はフリーハンド群でそれぞれ 16.3% (7/43) および 9.3% (4/43) で観察された。フリーハンド群におけるグレード C および D においては、外側方向への穿破を高い確率 (91%, 10/11) で認めた。両群とも、頭尾側方向の椎弓根壁を穿破する PS はなかった。フリーハンド法と比較して、IMU 補助群では許容される PS 位置の割合 (: the Rate of Clinically Acceptable PS positions: 以下 RoCA) であるグレード A および B の割合が有意に高かった (カイ二乗値: 12.6, $p<0.001$)。

頭側傾斜負荷を加えた実験 (図 3) では、全ての挿入された PS のうち、術前に計画された PS と術後に測定された頭尾側方向の角度の平均誤差は、フリーハンド群で 9.93 ± 1.16 ($p<0.000001$)、IMU 補助群で $3.08 \pm 0.42^{\circ}$ ($p<0.000001$) であった (図 4. A)。この場合、IMU は、頭尾側方向の術前後での角度誤差を低減するのに有用であった。

頭側傾斜負荷をかけた検体において、術前に計画された PS と挿入された PS の内外側方向の平均誤差は、フリーハンド群で $9.06 \pm 0.76^{\circ}$ であったのに対し、IMU 補助群では $2.92 \pm 0.48^{\circ}$ であり、IMU の補

助はPS挿入に際し、内外側方向の術前後での角度誤差を低減するのに有用であった ($p < 0.0000001$) (図4. B)。この結果は、頭側傾斜負荷をかけた実験では、フリーハンド群と比較して、IMU補助群は頭尾側・内外側方向の両方で精度を向上させることを示した。また、頭側傾斜負荷を加えた検体に対するフリーハンド群のグレードAおよびグレードB (GertzbeinおよびRobbins分類) 率はそれぞれ48.6% (18/37) および16.2% (6/37) であったが、IMU補助群のグレードAおよびグレードB率はそれぞれ67.6% (25/37) および24.3% (9/37) であった (図4. C)。フリーハンド群では、頭側傾斜負荷は傾斜なしの検体と比較してグレードCやDのような臨床上許容できない率を有意に増加させたが (カイ二乗: 4.86, $p < 0.05$)、IMU補助群では許容率に有意差はなかった (カイ二乗: 3.62, $p = 0.057$)。頭側傾斜負荷を加えた検体を用いても、IMUの補助はフリーハンド群と比較して許容率を有意に増加させた (カイ二乗: 7.97, $p < 0.01$)。また、計画したPSの内側および頭尾側方向への角度が大きく、フリーハンドでの再現性ある挿入が困難な場合でも、IMUの補助はPSの軌道精度と位置決め安全性を維持するのに役立つ。PS挿入操作におけるIMUの補助は、特に頭尾側方向や内側方向への挿入角度が大きい場合に、より有益であった。

IMU補助の技術がヒトの脊椎手術において臨床的に導入される前にすべき問題はいくつかあるが、この技術はPS設置のための高コストナビゲーションシステムの導入が困難な発展途上国または施設で有益となる可能性があると考えられる。”

図1: 角度提示の再現における誤差

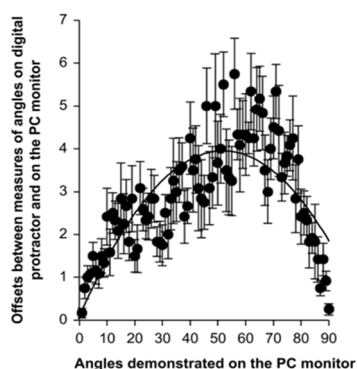
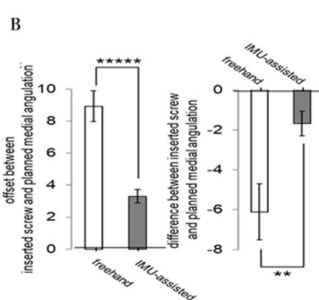
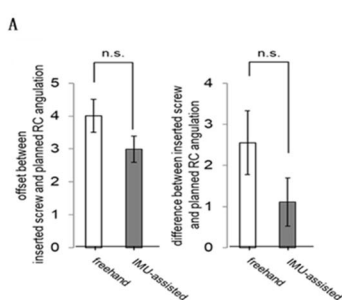


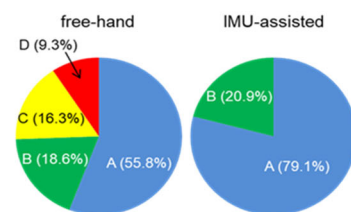
図3: 傾斜負荷を加えた実験



図2: フリーハンド群 vs IMU補助群

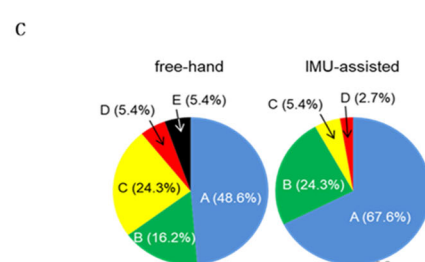
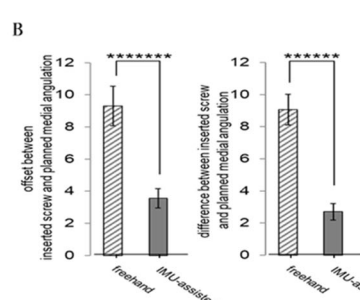
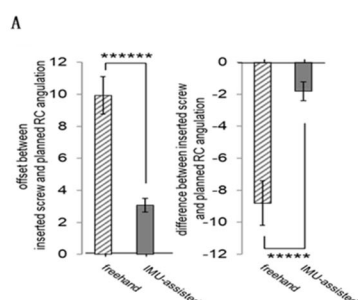


C Gertzbein and Robbins classification system



臨床的に許容されるPS設置 = grade A, B

図4: 頭側傾斜負荷を加えた実験 フリーハンド群 vs IMU補助群



臨床的に許容されるPS設置 = grade A, B