

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01273

研究課題名（和文）聴触覚融合データの幾何学的解析による骨切り手術支援システムの開発

研究課題名（英文）Development of an osteotomy surgery support system by geometric analysis of auditory-tactile fusion data

研究代表者

中野 寛 (Nakano, Yutaka)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：70433068

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、切削工具を用いて顎骨を切削する顎変形症手術において、切削工具が海綿骨に到達する際に手元を感じる感覚の変化を可視化し、安全に骨切り手術を行えるシステムを開発した。ハンドピースの振動加速度および切削音の周波数スペクトル密度変化に切削力変化を考慮に入れた判定指標を提案し、模擬骨および豚の下顎骨を使用した骨切試験による到達判定精度を評価した。その結果、スペクトル密度がピーク値をとる時刻と熟練医師の海綿骨到達判定時刻とで高い相関があることを明らかにした。また、手術未経験の研修医による海綿骨到達判定精度を評価した結果、海綿骨到達を感知しやすくするハンドピースの操作方法を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

機械特性が異なる2つの材料の境界を切削するとき起きる動力学的変化の要因を解明し、感覚の変化を定量的に評価する方法を提案した点に学術的意義があると考えられる。本研究で提案する判定システムを用いることで、より安全に手術を行える医療器具の開発、熟練医師と同等に切削工具の軟質層到達を判断するためのハンドピース操作方法を具体的・定量的に提示する教師データを明らかにすることで、後進の医師を育成する医療シミュレータの開発につながることを期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a system for safe osteotomy surgery by visualizing changes in the sensation felt in the hand just when a cutting tool reaches the cancellous bone in jaw deformity surgery in which the jaw bone is cut using the cutting tool. We proposed the evaluation index focusing on the peak value of the frequency spectral density of the handpiece vibration acceleration and the cutting sound taking into account the change in cutting force for judging the accession of the cutting bar at the cancellous bone. Osteotomy tests using an artificial bone and a pig mandible evaluated the accuracy of the proposed index. We found a high correlation between the time of peak spectral density and the time at which a skilled oral and maxillofacial surgeon determines the cancellous bone reaching. In addition, it was clarified a handpiece operation method which helps surgeon judge the cancellous bone reaching.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：振動モニタリング 時系列解析 顎変形症手術 骨切削

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

顎変形症治療のための口腔外科手術において、切削工具を用いて顎骨を切断分離し、適切なかみ合わせとなる位置で再固定する手術法がある。人の顎骨の表層部は皮質骨(硬質層)、内部は海綿骨(軟質層)で形成されている。皮質骨との境界近傍における海綿骨内部に血管や神経が存在し、皮質骨を抜けて海綿骨内部に到達した工具切れ刃が血管や神経を損傷すると、術後の回復の遅れや麻痺などの後遺症につながる恐れがある。血管や神経の損傷を回避するため、骨切り手術では皮質骨のみを除去する手術が求められる場合がある。骨切り手術時に使用される切削器具には、刃物を超音波で往復運動させて切削する超音波振動切削工具とハンドピースに取り付けた工具(切削バー)を高速回転させ、前後に小刻みに動かしながら骨を切削する回転切削工具がある。超音波振動切削工具は、熱の発生が少なく周辺組織への損傷が少ないという利点があるが、除去量が少なく手術に時間がかかり、患者、医師ともに負担が大きいという欠点がある。一方、回転切削工具は切削除去量が多く手術時間が短い特徴があるが、削り過ぎによる神経や血管の損傷に注意を要する。手術時間が短い回転切削工具を用いた骨切り手術では、熟練医師は手元を感じる感覚の変化を捉えて海綿骨到達時に切削終了位置を判断しているが、高度な技術と豊富な経験が必要となる。

近年、医療工学分野で注目されておりロボット手術支援システムに関する研究では、骨の加工特性を調べた研究、超音波振動ドリルを用いた皮質骨穿孔時のトルクや切削力の変化を実験的に調べた研究、ドリルによる骨切削時のスラストとその微分成分を使ってドリルが骨を貫通する瞬間を検出する研究などが行われている。また、回転切削工具を用いた皮質骨貫通の有無検出に関する研究として、ハンドピースモータの電流値と回転数の変化から、機械学習によってドリルの貫通を検知するシステムが提案されている。一方、回転切削工具を用いた骨切り手術では、ドリルが被削材を貫通する穿孔時と異なり、硬さや加工性が異なる材料境界を切削するため一定送り方向と送り速度で工具を動かすドリル加工とは切削抵抗や振動の変化と異なる。また、手で把持されたハンドピースを前後に小刻みに動かし、目詰まりを防ぐように工具押し付け力や切削面を調整しながら切削し、工具を前後に動かす周期や振幅は規則的ではないため、工作機械を用いた切削加工における切削メカニズムよりも複雑である。

### 2. 研究の目的

本研究は、顎変形症治療のための口腔外科手術において、医師が回転切削器具を用いて顎骨の骨切り手術を行う際、切削工具が皮質骨層(硬質層)から海綿骨(軟質層)に到達する際に手元を感じる感覚の変化を定量的に評価する方法を提案し、安全に骨切り手術を行える手術支援システムを構築することを目的とする。

### 3. 研究の方法

人工皮質骨シートと海綿骨ブロックで構成した人工骨および豚下顎骨を用いた顎変形症手術における骨切り手術を模擬した実験装置を製作し、手術熟練医師と研修医(手術未経験)による切削試験を行う。人工骨を切削するハンドピースは実際に手術で使用するハンドピースと切削バーを使用し、ハンドピースに3軸加速度計を取り付けて、手元の振動加速度を測定するとともに、人工骨を切削動力計に固定して切削力を測定する。また、切削音を精密騒音計で測定する。海綿骨到達前後で、ハンドピースの振動加速度および切削音の回転周波数成分近傍の数スペクトル密度や切削力が変化することを実験により明らかにし、スペクトル密度がピークを取る時刻を海綿骨到達指標として提案し、術者の海綿骨到達判断時刻と比較する。また、人工皮質骨シートと海綿骨ブロックの間に電気回路を挿入し、海綿骨到達を正確に検出できる装置を構成し、提案指標の判定時刻と術者の判定時刻の比較を行う。手術熟練医師と研修医(手術未経験)の海綿骨到達判定精度を比較し、手術熟練度の違いによる感覚の得やすいハンドピースの操作方法(切削バーの掃引周期や押し付け力)を調査する。

### 4. 研究成果

#### 顎変形症治療のための骨切り手術シミュレーション用実験装置の構築

顎変形症手術を含め豊富な口腔外科手術の経験を有する熟練医師(研究分担者)の監修のもと、骨切り手術シミュレーション用実験装置を構築した。実験に使用した人工骨被削材は、皮質骨厚さが既知の人工皮質骨シートと人工骨海綿骨ブロックを使用した。海綿骨到達を正確に判定可能にするために、皮質骨シートと海綿骨ブロックの間に一定電圧をかけた回路を挿入して貼り合わせ、皮質骨から海綿骨に到達し、回路が切断されたときの電圧の変化から海綿骨到達を判定した。また、手元の感覚の変化を感じて海綿骨到達を判断したときに手元のボタンを押して術者の感知時刻を記録した。回路切断時刻を正解の海綿骨到達時刻として、次項の指標から判定した到達推定時刻と術者の感知時刻とを比較して判定精度を評価するシステムを構築した。

### 海綿骨到達評価指標

人工骨被削材切削時のハンドピースの振動加速度および切削音データを STFT によって時間周波数解析し、工具回転周波数成分の整数倍成分（バーの歯数倍）近傍のスペクトル密度の時間変化を算出し、海綿骨到達時の回路切断時刻および手元感覚変化判定時刻がスペクトル密度が最大値を取る時刻と良い相関を示すことを明らかにした。切削時のバーのブレやつまりが原因となって振動加速度や切削音の振幅が増加し、スペクトル密度による海綿骨到達の誤判定が発生する場合の対処法として、軟質層到達時、切削バー押し付け方向における切削力が増加する傾向に着目し、スペクトル平均と切削力の増加を同時に考慮することで誤判定を回避し、判定精度が向上することを確認した。

人工骨被削材を使用した切削試験に続き、人の下顎骨と被削性が近い豚の下顎骨を用いて切削試験を行い、提案する評価指標の有効性を評価した。その結果、押し付け方向の切削力の増加を考慮したスペクトル密度のピーク時刻を評価指標に使用することで、豚の下顎骨においても海綿骨到達を精度よく判定できることを確認した。

### 手術熟練度の違いによる感覚の得やすいハンドピースの操作方法

研究分担者の所属機関の臨床医（顎変形症手術熟練医師）や研修医の協力を得て、顎変形症手術熟練医師（研究分担者 + 口腔外科専門臨床医）と研修医（手術未経験）の切削試験データを取得し、熟練医師と非熟練者でハンドピースの操作方法（切削バーの掃引周期や押し付け力）および海綿骨到達判定指標の精度を比較した。本研究で提案するスペクトル密度変化に着目した海綿骨到達判定指標と比較して、非熟練医師は海綿骨到達時刻と判定指標に相関が見られないのに対して、熟練医師は高い相関を確認した。また、海綿骨到達を正確に感知するためには、被削材に対する切削バーの掃引角度、押し付け力が海綿骨到達判定に影響することを明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>中野 寛、吉田 尚史、大井 一浩、高原 弘樹                                   |
| 2. 発表標題<br>回転切削器具の振動モニタリングによる顎変形症手術支援に関する研究（スペクトル平均による軟質層到達判定精度の評価） |
| 3. 学会等名<br>Dynamics and Design Conference 2023                      |
| 4. 発表年<br>2023年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                     | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)               | 備考 |
|-------|---|-------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 大井 一浩<br><br>(Ooi Kazuhiro)<br><br>(90451450) | 金沢大学・附属病院・講師<br><br><br><br>(13301) |    |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

|         |         |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|