

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

主論文の要旨

論文題目 歯科用コーンビーム CT 画像を用いた下顎骨皮質骨の自動解析に関する研究

氏名 水口 貴詞

論文内容の要旨

1. 緒言

歯科用 Cone Beam Computed Tomography (CBCT) は、歯科領域において、幅広く利用されている。歯科用 CBCT では、医用 CT よりも照射範囲を絞ることで、低被ばく・高分解能だが、不完全投影となり、散乱線や線質効果などの影響も受け、CT 値に信頼性がないと言われている。下顎皮質骨における客観的な指標として、panoramic mandibular index (PMI), mandibular cortical width (MCW), computed tomography mandibular index (CTMI) と computed tomography index (inferior) [CTI(I)] などが知られている。これらは腰椎骨密度と強い相関があり、女性における骨粗鬆症のスクリーニングに有用であるという報告がこれまでに数多くされている。しかしながら、手作業による計測を必要とし、計測に必要な断面の生成にも手間がかかる。また、CTMI や CTI(I) は下顎骨下端のみの計測のため、限局した皮質骨粗造化を評価できず、視覚的な骨質評価との不一致が生じるという問題もある。そこで、オトガイ孔近傍の下顎骨解析断面の生成、皮質骨厚計測、及び、皮質骨の骨質の解析を自動化し、視覚的評価と一致す

2-1 オトガイ孔付近の下顎骨解析断面の自動生成アルゴリズム

本研究では、下顎に沿った環状断様の断面（以下、解析断面）で、特にオトガイ孔を基準にその近傍のみに着目し、解析断面の自動生成を行った。歯科用 CBCT で撮影された横断像を入力画像とし、ボクセル値 800 での 2 値化、3 次元的ラベリング処理から下顎骨を抽出し、オトガイ孔の検出を行った。続いて、オトガイ孔を基準とし、横断像における顎骨の傾きに合わせた矢状断様画像を厚さ 9 mm の slab maximum intensity projection (MIP)画像として生成した。次いで、入力画像の横断像と上述の矢状断像と直行する、オトガイ孔基準点を含む顎骨の環状断様の断面を厚さ 2 mm の slab MIP として生成し、この断面上の顎骨軸の傾きを算出した。3 軸断面上での傾きからロドリゲスの公式を用いて、撮影した空間座標系から、解析断面における空間座標系へと変換をする回転行列を算出した。この回転行列を用いて、オトガイ孔から前後 4 mm の範囲をボクセルサイズ 0.2 mm とし、解析断面 (40 枚) を自動生成した。

2-2 下顎骨皮質骨厚の自動計測

生成された解析断面において、ボクセル値 800 で 2 値化、下顎骨の抽出を行った。次いで、抽出された頬側の下顎骨辺縁を下端から頭側に追跡を行い、オトガイ孔の検出を行った。オトガイ孔開口長が最大となる断面を解析基準断面とし、解析基準断面から前後 2mm の範囲を解析範囲と定めた。解析範囲内の断面において、顎骨辺縁座標ごとに、顎骨辺縁に対する法線方向へのプロファイルを取得し、その半値幅を計測することで、皮質骨厚の計測を行った。法線ベクトルは、顎骨辺縁における周囲 10 pixel 分の座標群から最小二乗法より算出した接線ベクトルから算出した。この時、解析断面内縦軸に対する法線ベクトルの角度 α を皮質骨厚と同時に記録した。

2-3 下顎骨皮質骨の自動解析

皮質骨—海面骨境界が不明瞭な場合においても，前項で得られた，FY 群における正常皮質骨厚のデータを元に，推定される境界候補点をプロットし，候補点の連結を行うことで，境界線を推定した．推定では，正常皮質骨厚の平均±1 標準偏差内におさまるよう半値幅，20% 値幅を利用した．推定された点から，皮質骨辺縁座標との距離が 2mm 未満の点，皮質骨幅が $\alpha \pm 30$ 度における中央値の 8 割未満の点は除外した．皮質骨辺縁と，推定された境界線とで囲まれた領域に対して，縮小処理を行い，皮質骨解析領域とした．さらに解析領域を 4 つに分割し，各解析領域内の，平均ボクセル値，標準偏差，coefficient of variation (CV)，interquartile range (IQR) to median (Med) ratio の計測をした．

2-4 手動計測・主観的評価

Koh 等によって CBCT に適応した下顎骨皮質骨の骨質評価指標を以下に示した．CTCI は，Kelmatti index (KI) を CBCT に適応した指標で，以下の 3 つのタイプに分類される．

- C1: 皮質骨内膜縁は均一で規則的，
- C2: 皮質骨内膜縁の半月状の欠損，または，皮質骨内膜が 1～2 層認められる，
- C3: 皮質骨の層が 3 層以上認められる明らかな粗造化．

CTMI は，Ledgerton 等によって提唱された下顎骨下端の皮質骨厚の計測を CBCT に適応させた指標で，CTI(I) は Buenson 等によって提唱された下顎骨下端の皮質骨厚を下顎骨下端からオトガイ孔までの長さで除した指標を CBCT に適応させた指標である．

これらの指標について，開発したプログラムにより自動生成された解析断面にて，臨床経験 5 年以上の歯科放射線科医が主観的評価 (CTCI)，及び，手動計測 [CTMI, CTI(I)] を

行なった。主観的評価 (CTCI) については、71 例全例 (両側)、手動計測 [CTMI, CTI(I)] については、71 例の中から無作為に抽出した 19 例 (左右関係なく片側のみ) を対象として評価を行った。CTCI の観察者内変動、及び、観察者間変動は重み付け Choen's kappa を用いて評価した。なお、観察者間変動については、全ての観察者の組み合わせによる Kappa 値の平均値とした。2 つの年齢群 FY と FO における CTCI と CTMI, CTI(I), 解析値(VV, CV, IQR/Med)との関係を Bonferroni 補正した Mann-Whitney の U 検定を用いて有意水準 5% に設定し、評価した。CTMI, CTI(I)の手動計測については、Intraclass correlation coefficients (ICC)によって、観察者内変動、及び、観察者間変動を評価した。また、皮質骨厚の手動計測と自動計測との比較においても、ICC を用いて評価した。

3. 結果・考察

71 症例全例の両側において、下顎骨の自動解析断面の生成、CTMI・CTI(I)の自動計測、及び皮質骨の自動解析に成功した。自動処理の平均時間は、解析断面の生成で 31.9 秒、皮質骨厚計測で 1.22 秒、自動解析で 2.9 秒だった。CTCI における観察者内変動、及び、観察者間変動は、共に 0.80 で一致度は良好だった。FY と FO-C3 との間、及び FO-C1 と FO-C3 との間で、有意水準 5%で CTMI, CTI(I)共に優位な低値を示した。一方、VV では、FO-C1 と FO-C2 との間に有意差が認められなかったが、CV, IQR/Med では、FY と FO-C3 との間以外の全ての組み合わせで有意差が認められた ($p < 0.01$)。VV では、ビームハードニングの影響により CTCI との一致度 (重み付けカッパ値) は 0.55 と高くなかったが、CV や IQR/Med では、それぞれ 0.83, 0.74 と高い一致を示した。自動計測と手動計測との比較において、全てのカテゴリで、ICC は 0.81 を上回り、高い一致度を示し、自動計測の信頼性が確認された。パノラマ X 線画像における研究では、CTMI, CTI(I)がそれぞれ、3 mm, 0.3 を下回ると、顎骨の骨量は大きく減少すると言われている。本研究では、CTMI が 3 mm 未満となった症例が、C1 で 10.6%, C2 で 26.5%, C3 で 54.5%となった。CTMI では、単に下顎骨皮質骨の下端の厚みであり、これら 45.5%の症例では、下顎骨下端の皮質骨は正常だが、舌側や頬側に皮質骨の粗造化が認められた。CTMI だけで下顎骨皮質骨の広い範囲の骨質を評価することは難しいと考えられた。一方、皮質骨解析(CV, IQR/Med)では、広い範囲を 4 つの領域に分割することで、ビームハードニングの影響を受けず、CTCI とも高い一致を示す骨質評価を行うことができた。その結果、皮質骨厚の計測 (CTMI) において、FO-C3 の 45.5 % が CTCI との不一致を示したのに対して、CV では、FO-C3 の約 80 % が CTCI と一

致し、本手法による皮質骨自動解析では、CTCI との一致度が大きく改善された。

5. 結論

本研究では、下顎骨の特にオトガイ孔近傍直下の皮質骨厚の計測と皮質骨内部性状を評価する自動処理の開発に成功し、視覚的評価とも良く一致する客観的な皮質骨の骨質評価を行うことができた。解析断面の生成から皮質骨厚の計測・解析までにおよそ 40 秒程度で行うことができ、骨粗鬆症のスクリーニングを自動で簡便に行うことも可能になる。手動計測や視覚評価とも高い一致を示し、自動計測・解析の信頼性が確認された。また、今後、インプラント治療の術後予後のための骨質評価としても利用されることが期待される。

