

[寄稿]

Tuned-Aperture Computed Tomography による Tomo-Synthesis の臨床応用

早川 吉彦, 光菅 裕治, 佐野 司, 山本 一普[†], Allan G. Farman^{††}

東京歯科大学歯科放射線学講座・〒261-8502 千葉県千葉市美浜区真砂 1-2-2

[†]山本歯科クリニック・〒923-0811 石川県小松市白江町ワ 11

Clinical Study of Dento-Alveolar Tomo-Synthesis with Tuned-Aperture Computed Tomography

Yoshihiko HAYAKAWA, Yuji KOUSUGE, Tsukasa SANO, Kazuhiro YAMAMOTO[†]
and Allan G. Farman^{††}

Department of Oral and Maxillofacial Radiology, Tokyo Dental College,
1-2-2, Masago, Mihama-ku, Chiba 261-8502 Japan

[†]Yamamoto Dental Clinic, WA11, Shiroe-Cho, Komatsu, Ishikawa 923-0811 Japan

^{††}Div. of Radiology & Imaging Sciences, School of Dentistry, The University of Louisville,
501 South Preston Street, Louisville, Kentucky, 40292 USA

1. はじめに

Tuned-Aperture Computed Tomography[®](TACT)は、コストをかけずに、低線量で実現でき、インタラクティブな操作を可能とするユニークな tomo-synthesis 法である。

TACT は、1990 年代半ばに Dr. Richard L. Webber (Wake Forest University, USA) によって発表された [1,2]. Webber は、かつて NIH の歯科部門 NIDR に在籍したことがあり、tomo-synthesis だけでなく、subtraction 法あるいは diagnostic decision making などにも多大な業績を残した [3,4]. その豊富な経験が生んだ技術である。それほど高性能ではない PC でも効果的に利用することができ、理解しやすいデータ・サンプリングと画像表示技術が統合されている。プロトタイプの段階で既に三次元的な描出を即時に表示できるようにした。

ここでは任意断面の再構成・表示法である TACT を歯および周囲組織の三次元的画像診断に応用した我々の研究を解説する。口内法 X 線撮影はほとんどの歯科診療所で行われているが、口腔内挿入用に開発された「小型の FPD」とも言える X 線センサーを用いた。そこで、TACT のセオリー・手法を簡単

に解説するとともに、歯科における応用に限らない TACT に関する研究をレビューして紹介する。

2. TACT の特徴

口腔内挿入用のセンサーの開発は 1980 年代末から始まった。先駆的な発明者はドイツの歯科医師 Mouyan である [5]. 1998 年、ピクセルサイズが約 20 μm のセンサーが発売されて、高画質化・高感度化・低ノイズ化の競争が高まった [6]. 最新のセンサーを Fig. 1 に示す。

そのような状況で、インタラクティブな多断面再構成法である TACT は、歯と顎骨のイメージングにおいて臨床応用可能な手法となってきた。我々の研究では、口腔内に小型の X 線センサーを挿入して、異なる方向から X 線を複数回照射して (Fig. 2), 歯と顎骨の任意の tomo-synthesis 画像を得ている [7-10].

TACT に必要な X 線量は、関心領域の三次元的な描出を可能にするにも関わらず、口内法撮影用 X 線フィルムを使う場合とほとんど変わらない。

なお、TACT の技術は、Instrumentarium Imaging 社 (<http://www.instrumentariumimaging.com/>) Tuusula,



Fig. 1 口内法 X 線撮影用のセンサー。口腔内に挿入して撮影を行う。RVG-ui(左, Eastman Kodak/Trophy 社, 日本では株ヨシダ)と CDR wireless(右, Schick Technologies 社, 本邦未発売)

Finland)にライセンスされていて, digital mammography (and /or biopsy) system Delta 32 series に搭載機種がある。同社は Instrumentarium Corp. (<http://www.instrumentarium.com/> Helsinki, Finland) の division であるが, 2003 年 10 月 General Electric 社によって買収され, 現在は GE Healthcare の division である。RSNA でも展示を行っていて, 雑誌「Innervation」における RSNA 特集に掲載される真田茂先生の報告に何度も取り上げられている。

3. TACT の原理

TACT を含めた, 不完全な投影データ (sparse projection data) による tomo-synthesis 法 (unfiltered backprojection) に関する数学的な解析をレビューし, さらに確率的画像処理 statistical (Bayesian) inversion によって TACT 像の画質を向上させる手法に関する論文が, 最近 Instrumentarium Imaging 社の研究開発者によって発表された [11,12]。数方向から投影して得た X 線画像から画像再構成を行う。投影方向の calibration は, 被写体内に “reference object” を置き, 画像上の投影位置を入力して行う。

我々の研究では, Fig. 2 のように, 小型 X 線センサー (CompuRay®, 本邦ではヨシダ, Eastman Kodak/Trophy) を口腔内に保持した状態のまま異なる方向から撮影する。component projection または TACT base images と表現する 4~6 枚の画像を得る。三次元データを構築し一連の任意断面像や擬似ホログラムを作る。原理的には tomo-synthesis と aperture theory に基づく [1,2,11,12]。参照点となるマーカー (直径 1.5 mm の X-Spot® 鉛ペレット, Beekley, USA) を被写体に貼付して撮影し, 再構成アルゴリズムにその画像上の座標を入力する。

ソフトウェア TACT workbench の一画面を Fig. 3 に示す。base images を収集しスタックさせて, マーカー投影位置を入力して再構成アルゴリズムを働かせる。CT などの一般的な 3D 画像の作成時には, 画像データの収集時に幾何学的な投影関係の連続性

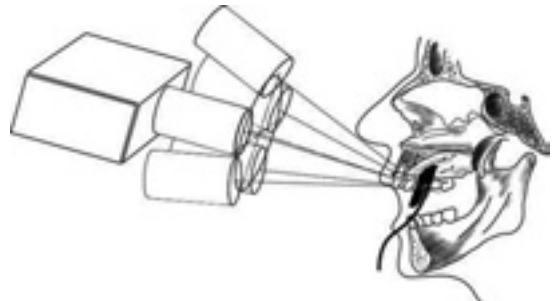


Fig. 2 TACT の component projection を示すシェーマ。リファレンス・マーカーを歯肉の頬側面に貼付して, 異なる方向から 4~6 回の X 線撮影を行う。小型 X 線センサーは口腔内に保持する。

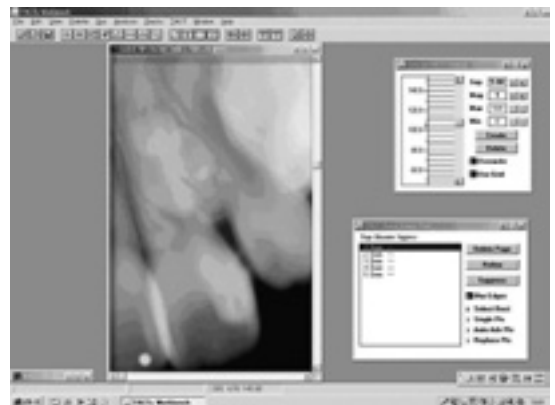


Fig. 3 ソフトウェア TACT workbench の一画面。

を保つための安定性が必要である。しかし、TACTはマーカーを使うことで投影方向の自由な設定ができる。任意の幾何学的関係の投影データから再構成ができる。そして、重ね合わせ理論による断面再構成操作をインタラクティブに行い、診断タスクに応じた一連の被写体深度の画像再構成を容易に実現する。

4. TACT 研究の概要

TACT のアルゴリズムを利用した tomo-synthesis の研究は、イメージングの様々な領域に及ぶ、digital mammography・scinti-mammography、整形外科への臨床応用研究が行われている [13-19]。

歯科画像診断における TACT の基礎・臨床研究も活発に行われてきた。

歯の齲蝕(カリエス)：ノースカロライナ大学の研究者が、齲蝕検出能に対する、個々の投影の条件、逐次近似法による計算の有無あるいは再構築アルゴリズムの選択による影響を研究した [20-25]。1999 年の Abreu M Jr et al. の報告 [23] は、TACT による検出能はフィルムやデジタルセンサーによる単純口内法 X 線画像に比べて向上したわけではないとするが、TACT によって齲蝕を検出能するために最適なパラメータを求めた。1997 年の Tyndall DA et al. の報告 [25] は、口腔内挿入用のセンサーの画質が上昇すれば TACT の診断能を向上させるだろうと述べた。その後 1998 年に、画素 20 μ m のセンサーや、C-MOS 型センサーが発表された。1998 年 Nair MK et al. [24] は、二次齲蝕の検出において、単純口内法 X 線画像より TACT の方が優れているとした。

歯周疾患：Chai-U-Don et al. [26-27] は、in vitro で歯槽骨・歯槽硬線の変化の検出能を評価し、TACT とデジタル・サブトラクションの組み合わせは、技術的にはまだ最良の設定が確立していないにもかかわらず sensitivity が高くなると報告した。Nair, M.K. et al. [28-29] も、TACT が骨欠損の治癒過程における骨量の変化を定量化する手段として有効で正確であると報告した。Ramesh et al. [30] は、実験的歯槽骨欠損の検出で TACT を調べてみると、弱く逐次

近似法で処理したとき最も検出能が高いと報告した。Nair et al. [31,32] の in vitro 研究では、外傷による顎骨の骨折や歯牙の破折の検出能において TACT は優れていたと報告した。

歯科インプラント：歯科インプラントを植立予定部位を示すステントを立てて TACT を撮ると、頬舌方向あるいは唇口蓋側方向の位置関係を示すことができる [33]。Liang et al. [34,35] の研究は、顎骨への歯科インプラント(人工歯根)の植立の術前検査として TACT は一般断層撮影にとって代わる価値があるとした。R.D. Morant, et al. [36] は、下顎骨における歯根と下顎管の位置関係を把握において、単に偏心投影を適用する(buccal object rule)より連続的な多断面再構成像の観察を可能にする TACT は正確であるとした。

5. 我々の TACT 研究の概要：埋伏歯の位置と形態のアセスメント

さて、1998 年以来、Yamamoto et al. は、発明者 R. L. Webber との共同研究も含めて、TACT に関する basic study の成果を発表してきた [37-40]。その研究では、特有のアルゴリズムに基づいた tomo-synthesis 法である TACT における depth discrimination の accuracy を追究した。その結果、component projection の回数・角度の影響を解析すると、4~6 回の投影を被写体から見て角度 30 度の円周上の位置から行えば十分であるとした。

その後、このような特徴を有する TACT が、臨床応用できる可能性はないかと検討してきた。東京

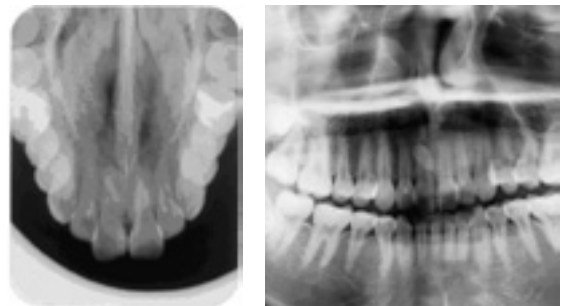


Fig. 4 上顎前歯部に埋伏歯が認められる症例の咬合法 X 線写真(左)と回転パノラマ X 線写真(右)。

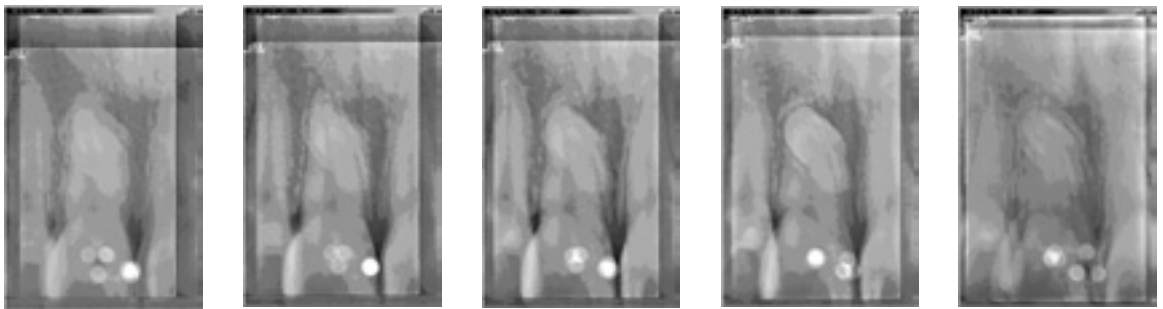


Fig. 5 Fig. 4 と同一症例の上顎前歯部埋伏歯の TACT 像. TACT 像は唇—口蓋方向に連続的に断面の位置を変化させて得られる. その一部として, 唇側の断面, 中切歯の歯根が明瞭に観察される断面, 中切歯と埋伏歯の中間的な面, 埋伏歯の歯冠が明瞭に観察される断面, そのさらに口蓋側の断面を, 左から右へ並べて示した.

歯科大学小児歯科学講座の関口は, 上顎前歯部の埋伏歯の診査に使えないかと提案した. そこで, 我々は共同研究を行い, TACT の画像が, 埋伏歯と周囲組織の関係や埋伏歯の頬側—口蓋側方向の位置を明瞭にし, clinical decision making に影響することを示した[7-10].

上顎前歯部における埋伏歯は, 咬合と審美の観点からその扱いは重視されている. 画像診断による埋伏歯とその周囲組織の形態学的関係の把握が処置法の選択に影響を与えるため, 幾つかの X 線検査が併用されている.

Fig. 4 と Fig. 5 に症例を示す. 患者は 13 歳女児. 上顎前歯部に埋伏歯が認められる. 埋伏歯とそれに近接する中切歯との位置関係を精査するために TACT 像を得た. 単純投影では偏心投影法が応用できる症例であるが, 埋伏歯と歯が近接するとうまく把握できない場合もある. この症例では埋伏歯の歯根部と隣接歯の位置関係および埋伏歯が周囲骨におおわれて存在する状態が詳細に観察できた. なお Fig. 5 の TACT 像には逐次近似法(iterative restoration)によるボケの除去処理を行うこともできる.

我々は, このような上顎前歯部に埋伏歯のある 20 症例について, 単純投影(口内法, パノラマ法, 側方向撮影)のみで診断した場合と TACT 像を加えた場合の臨床判断を比較した. 16 名の歯科医師で次のように 9 つの観察項目を設定して評価を行った.

・各項目(1-7)の埋伏歯とその周囲組織の描出の明瞭度(The Clinical Evaluation of Anatomical Structure

Depiction)に関して.

1. 埋伏歯歯冠部の外形(An outer contour of the impacted tooth : dental crown)
 2. 埋伏歯歯根部の外形(形態) (An outer contour of the impacted tooth : dental root)
 3. 埋伏歯歯根部の(発育)状態(The developmental status of the dental root of the impacted tooth)
 4. 埋伏歯の唇—口蓋的位置関係(Buccal/Palatal position of the impacted tooth)
 5. 埋伏歯の上下的位置関係(Upper/lower position of the impacted tooth)
 6. 埋伏歯の近遠心的位置関係(Mesial/distal position of the impacted tooth)
 7. 埋伏歯と隣接する歯牙との関係(とくに永久歯胚) (Relationship between the impacted tooth and adjacent teeth)
- ・この画像から得られる埋伏歯の情報(Subjective assessments for clinical decision making)について, 次の基準(8,9)で.
8. 治療方法の選択に関して(Estimate how useful you consider the existing radiographic information to be when considered only with regard to its potential for altering clinical treatment options)
 9. 治療後の経過・予後の予測に関して(Estimate the extent to which you feel that you have all the information you need to be confident in your clinical assessment of the patient's surgical prognosis)
- 観察者には, 連続確信度法による無段階評価を行った. 全症例について各項目ごとに 50mm のバー

を用意して、そこに確信度に応じたチェックを入れた。項目1~7は、unclear~clear, 項目8と9では、not sufficient~sufficientとした。得られたデータの統計処理は、StatView (Abacus Concepts, Berkeley, Calif. USA)で行った。有意差の検定(*t* test)は、危険率(*a priori*) 0.05で行った。

項目1と2では、TACTの評価が有意に低下した($p < 0.05$)。センサーの画像化面積が狭く十分に關心領域が描出されなかったと思われる。しかしながら、項目4「唇-口蓋側方向」と7「埋伏歯と周囲組織の関係」の把握ではTACTは有意に優れていた($p < 0.0001$)。およびふたつの subjective assessmentsでもTACTのスコアが有意に上昇し、口腔外科的あるいは歯科矯正の処置の判断における信頼性および予後の予測可能性についても、TACT像を用いたときに有意に優れていた[8-10]。

この研究に用いた個々の症例を検討すると、水平的すなわち唇-口蓋側方向に埋伏歯がある症例では、TACTスコアが上昇しなかった。我々は、そのようなケースでは、「三次元擬似ホログラム表示像」が有用ではないかと考えている。ディスプレイに表示された座標上で疑似ホログラムを回転させることにより立体的に観察できる。インタラクティブに立体像を観察すれば有用性があると考えられた[7,9,41]。

6. TACTの魅力と可能性

このような我々のTACT臨床応用研究は、開発者であるWebberによって行われた *in vivo* 研究に次ぐものである[42]。Webberらも、単純投影によるX線写真に比べて、TACTは診断的情報が多いとし、治療法の選択にインパクトを与えたとした。既に引用した幾つもの *in vitro* 研究でも、TACTは齲蝕、歯槽骨変化等の診断タスクにおいて高感度あるいは単純投影X線写真と同等に描出すると報告している。

TACTに特別なハードウェアは必ずしも必要ではない。口内法X線撮影用イメージャーに「小型FPD」を使うからこそ臨床に生かされる可能性が生じた3次元的手法といえる。最近では、TACTのデータをサブトラクション法の定量的な解析のため

の三次元的なデータとして使う研究[43]、TACTのアルゴリズムの診断タスクに応じた最適化に関する研究[44-47]がある。またTACTをユーザーフレンドリーにするための「ハンドヘルド照射装置」なるものの開発も行われている[48]。器用な我々は必要としないのだが、将来このような小型X線源が利用できたらいいなと感じさせる。

TACTは、低コスト・低線量な手法である。我々の歯科臨床における応用例は、FPDの特徴を生かしたTACT三次元表示の有用性を示している。

参考文献

- [1] Webber RL, Horton RA, Tyndall DA and Ludlow JB : Tuned-aperture computed tomography (TACT): Theory and application for three-dimensional dentoalveolar imaging. *Dentomaxillofac. Radiol.* 26, 53-62, 1997.
- [2] Webber RL, Horton RA, Underhill TE, Ludlow JB and Tyndall DA : Comparison of film, direct digital, and tuned-aperture computed tomography images to identify the location of crestal defects around endosseous titanium implants. *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol. Endod.* 81, 480-490, 1996.
- [3] Zeichner SJ, Ruttimann UE and Webber RL : Dental radiography : efficacy in the assessment of intraosseous lesions of the face and jaws in asymptomatic patients. *Radiology* 162, 691-695, 1987.
- [4] Webber RL : Computers in dental radiography : a scenario for the future. *J. Am. Dent. Assoc.* 111, 419-424, 1985.
- [5] Mouyen F, Benz C, Sonnabend E and Lodter JP : Presentation and physical evaluation of Radio VisioGraphy. *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol.* 68, 238-242, 1989.
- [6] Farman AG and Farman TT : RVG-ui : a sensor to rival direct-exposure intra-oral x-ray film. *Int. J. Comput. Dent.* 2, 183-196, 1999.

- [7] 山本一普, 早川吉彦, 小林紀雄, 光菅裕治, 和光衛, 関口浩, 薬師寺仁, Farman AG: Tuned-Aperture Computed Tomography (TACT[®])による歯および周囲組織の三次元画像診断の有用性. 映像情報 MEDICAL, 34(10), 1026-1031, 2002.
- [8] Yamamoto K, Hayakawa Y, Kousuge Y, Wakoh M, Sekiguchi H, Yakushiji M and Farman AG : Diagnostic value of tuned-aperture computed tomography versus conventional dentoalveolar imaging in assessment of impacted teeth. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 95, 109-118, 2003.
- [9] 早川吉彦, 山本一普, 小林紀雄, 光菅裕治, 和光衛, Farman AG : 新たなFPDシステムの研究・開発動向, トライアルレポート: 歯科用小型 FPD 臨床試用. INNERVISION 18(4), 88-91, 2003.
- [10] Hayakawa Y, Yamamoto K, Kousuge Y, Kobayashi N, Wakoh M, Sekiguchi H, Yakushiji M and Farman AG : Clinical validity of the interactive and low-dose three-dimensional dento-alveolar imaging system, Tuned-Aperture Computed Tomography. The Bulletin of Tokyo Dental College, 44(3), 159-167, 2003.
- [11] Siltanen S, Kolehmainen V, Jarvenpaa S, Kaipio JP, Koistinen P, Lassas M, Pirttila J, Somersalo E : Statistical inversion for medical x-ray tomography with few radiographs : I. General theory. Phys. Med. Biol. 48, 1437-1463, 2003.
- [12] Kolehmainen V, Siltanen S, Jarvenpaa S, Kaipio JP, Koistinen P, Lassas M, Pirttila J, Somersalo E. Statistical inversion for medical x-ray tomography with few radiographs : II. Application to dental radiology. Phys Med Biol. 48, 1465-1490, 2003.
- [13] Fahey FH, Rhyasen KL, Harkness BA, Meltner MA, Webber RL : Angular disparity in ETACT scintimammography. Med. Phys. 29, 1980-1983, 2002.
- [14] Fahey FH, Grow KL, Webber RL, Harkness BA, Bayram E and Hemler PF : Emission tuned-aperture computed tomography : A novel approach to scintimammography. J. Nucl. Med. 42, 1121-1127, 2001.
- [15] Suryanarayanan S, Karellas A, Vedantham S, Baker SP, Glick SJ, D'Orsi CJ, Webber RL : Evaluation of linear and nonlinear tomosynthetic reconstruction methods in digital mammography. Acad. Radiol. 8, 219-224, 2001.
- [16] Suryanarayanan S, Karellas A, Vedantham S, Glick SJ, D'Orsi CJ, Baker SP and Webber RL : Comparison of tomosynthesis methods used with digital mammography. Acad. Radiol. 7, 1085-1097, 2000.
- [17] Webber RL, Underhill HR, Freimanis RI : A controlled evaluation of tuned-aperture computed tomography applied to digital spot mammography. J. Digit. Imaging 13, 90-97, 2000.
- [18] Fahey FH, Webber RL, Chew FS, Dickerson BA. : Application of TACT to the evaluation of total joint arthroplasty. Med. Phys. 30, 454-460, 2003.
- [19] Duryea J, Dobbins JT 3rd, Lynch JA : Digital tomosynthesis of hand joints for arthritis assessment. Med. Phys. 30, 325-333, 2003.
- [20] Abreu MJr, Tyndall DA, Ludlow JB and Nortje CJ : Influence of the number of basis images and projection array on caries detection using tuned aperture computed tomography (TACT) . Dentomaxillofac. Radiol. 31, 24-31, 2002.
- [21] Abreu MJr, Tyndall DA and Ludlow JB : Generation of TACT image slices using different reconstruction algorithms : Effects on natural caries detection. Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol. Endod. 92, 576-581, 2001.
- [22] Abreu MJr, Tyndall DA, Ludlow JB and Nortje CJ : The effect of the number of iterative restorations on tuned aperture computed tomography for approximal caries detection. Dentomaxillofac. Radiol. 30, 325-329, 2001.
- [23] Abreu M Jr, Tyndall DA, Platin E, Ludlow JB

- and Philips C : Two-and three-dimensional imaging modalities for detection of caries : A comparison between film, digital radiography and tuned aperture computed tomography (TACT) . Dentomaxillofac. Radiol. 28, 152-157, 1999.
- [24] Nair MK, Tyndall DA, Ludlow JB and May K : Tuned aperture computed tomography and detection of recurrent caries. Caries Res. 32, 23-30, 1998.
- [25] Tyndall DA, Clifton TL, Webber RL, Ludlow JB and Horton RA : TACT imaging of primary caries. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 84, 214-225, 1997.
- [26] Chai-U-Dom O, Ludlow JB, Tyndall DA and Webber RL : Comparison of conventional and TACT (Tuned Aperture Computed Tomography) digital subtraction radiography in detection of pericrestal bone-gain. J. Periodontal. Res. 37, 147-53, 2002.
- [27] Chai-U-Dom O, Ludlow JB, Tyndall DA and Webber RL : Detection of simulated periodontal bone gain by digital subtraction radiography with tuned-aperture computed tomography. The effect of angular disparity. Dentomaxillofac. Radiol. 30, 92-97, 2001.
- [28] Nair MK, Seyedain A, Agarwal S, Webber RL, Nair UP, Piesco NP, Mooney MP and Grondahl H-G : Tuned aperture computed tomography to evaluate osseous healing. J. Dent. Res. 80, 1621-1624, 2001.
- [29] Nair MK, Seyedain A, Webber RL, Nair UP, Piesco NP, Agarwal S, Mooney MP and Grondahl H-G : Fractal analyses of osseous healing using tuned aperture computed tomography images. Eur. Radiol. 11, 1510-1515, 2001.
- [30] Ramesh A, Ludlow JB, Webber RL, Tyndall DA and Paquette D : Evaluation of tuned-aperture computed tomography in the detection of simulated periodontal defects. Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol. Endod. 93, 341-349, 2002.
- [31] Nair MK, Nair UP, Grondahl HG and Webber RL : Accuracy of tuned aperture computed tomography in the diagnosis of radicular fractures in non-restored maxillary anterior teeth-An in vitro study. Dentomaxillofac. Radiol. 31, 299-304, 2002.
- [32] Nair MK, Nair UDP, Grondahl HG, Webber RL and Wallace JA : Detection of artificially induced vertical radicular fractures using tuned aperture computed tomography. Eur. J. Oral Sci. 109, 375-379, 2001.
- [33] 早川吉彦, 太田淑子: デジタル X 線画像診断システム CDR 末次恒次, 松本直之監修, 先端医療シリーズ・歯科医学 1 歯科インプラント, 427~430, 寺田国際事務所/先端医療技術研究所, 東京, 2000.
- [34] Liang H, Tyndall DA, Ludlow JB, Lang LA and Nunn ME : Accuracy of mandibular cross-sectional imaging with tuned-aperture computed tomography (TACT), iteratively reconstructed TACT, and multidirectional, linear, and transverse panoramic tomography. Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol. Endod. 91, 594-602, 2001.
- [35] Liang H, Tyndall DA, Ludlow JB and Lang LA : Cross-sectional presurgical implant imaging using tuned aperture computed tomography (TACT). Dentomaxillofac. Radiol. 28, 232-237, 1999.
- [36] Morant RD, Eleazer PD, Scheetz JP and Farman AG : Array-projection geometry and depth discrimination with Tuned-Aperture Computed Tomography for assessing the relationship between tooth roots and the inferior alveolar canal. Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol. Endod. 91, 252-259, 2001.
- [37] Yamamoto K, Farman AG, Webber RL, Horton RA and Kuroyanagi K: Effects of projection geometry and number of projections on accuracy of depth discrimination using tuned-aperture computed tomography (TACT) in dentistry. Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol. Endod. 86, 126-130,

- 1998.
- [38] Yamamoto K, Farman AG, Webber RL, Horton RA and Kuroyanagi K : Effects of number of projections on accuracy of depth discrimination using tuned-aperture computed tomography (TACT) for three-dimensional dentoalveolar imaging of low-contrast details. *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol. Endod.* 88, 100-105, 1999.
- [39] 山本一普 : Tuned-aperture computed tomography (TACT)の画像精度に影響する因子について. *歯科学報* 99, 283-288, 1999.
- [40] Yamamoto K, Nishikawa K, Kobayashi N, Kuroyanagi K and Farman AG : Evaluation of tuned-aperture computed tomography depth discrimination for image series acquired variously with linear horizontal, linear vertical, and conical beam projection arrays. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 89, 766-770, 2000.
- [41] Yamamoto K, Hayakawa Y, Kobayashi N, Kousuge Y, Wakoh M, Sekiguchi H, Yakushiji M and Farman AG : Tuned-Aperture Computed Tomography (TACT[®]) to assess impacted teeth using 2D slices and 3D pseudo-holograms. In Lemke, HU, et al. Eds. *The Proceedings of the 16 th International Congress of Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS2002)*, Springer-Verlag, Berlin, 1117, 2002.
- [42] Webber RL, Messura JK : An in vivo comparison of diagnostic information obtained from tuned-aperture computed tomography and conventional dental radiographic imaging modalities. *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol. Endod.* 88, 239-247, 1999.
- [43] Lehmann TM, Hemler PF, Webber RL : Virtual radiographs computed from TACT volume data as a gold standard for image registration prior to subtraction. *Dentomaxillofac. Radiol.* 31, 187-192, 2002.
- [44] Linnenbrugger NI, Webber RL, Kobbelt LP, Lehmann TM : Automated hybrid TACT volume reconstructions. *Methods Inf. Med.* 43, 315-319, 2004.
- [45] Linnenbrugger NI, Webber RL, Lehmann TM : Implementation of a generalized TACT algorithm for arbitrary source-object distances. *Dentomaxillofac. Radiol.* 31, 249-256, 2002.
- [46] Webber RL, Hendrickson JL : A comparison of the effect of task-specific with fixed beam alignment in tuned-aperture computed tomography. *Dentomaxillofac Radiol* 29, 223-229, 2000.
- [47] Webber RL, Bettermann W : A method for correcting for errors produced by variable magnification in three-dimensional tuned-aperture computed tomography. *Dentomaxillofac. Radiol.* 28, 305-310, 1999.
- [48] Webber RL, Webber SE, Moore J : Hand-held three-dimensional dental X-ray system : Technical description and preliminary results. *Dentomaxillofac Radiol* 31, 240-248, 2002.