

Postoperative Three-dimensional Assessment of CT Image for Osteotomy

Ryosuke KITA¹⁾, Shigeaki MORIYAMA²⁾,
Yasuaki IWASAKI²⁾, Yoshitsugu TANAKA³⁾,
Yoshinari NAKAMURA³⁾, Masatoshi NAITO³⁾,
Toshihiro KIKUTA¹⁾

¹⁾ Department of Oral and Maxillofacial Surgery, Faculty of Medicine, Fukuoka University

²⁾ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Fukuoka University

³⁾ Department of Orthopaedic Surgery, Faculty of Medicine, Fukuoka University

Abstract: The purpose of this study was to evaluate Le Fort I osteotomy, sagittal split ramus osteotomy and rotational acetabular osteotomy using a new technique that superimposes pre- and post-operative three-dimensional CT images (3D-CT images).

The coordinate system and the origins of the x, y, z-axis were respectively set, and pre- and postoperative three-dimensional CT images were superimposed by using a six degrees of freedom search.

The distance of displacement and the amount of the angle of rotation from the origins in maxillary and mandible images were quantified by using the 3D-CT DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine) DATA. The same result was also obtained in the hip joint.

Therefore, this new technique of superimposition is considered to be a practical method for evaluating postsurgical bone fragment displacement and it could potentially be applied regardless of the type of osteotomy.

Key words: Osteotomy, Superimposition, Three-dimensional CT image, Six degrees of freedom search

骨切り術における CT 画像の三次元的評価

喜多 涼介¹⁾, 森山 茂章²⁾, 岩崎 泰晃²⁾,
田中 祥継³⁾, 中村 好成³⁾, 内藤 正俊³⁾,
喜久田利弘¹⁾

¹⁾ 福岡大学医学部医学科歯科口腔外科学講座

²⁾ 福岡大学工学部機械工学科

³⁾ 福岡大学医学部医学科整形外科学講座

要旨: 口腔外科領域, 整形外科領域の骨疾患に対して骨切り術が用いられる。骨切り術前後の評価法は, 一般的に X 線写真像による二次的な方法である。しかし, 術式の特徴から三次元的評価が必要と考えられる。そこで顎顔面・寛骨を対象として座標系の設定をするとともに術前後の三次元画像の重ね合わせにより三次元的評価を行った。

対象術式は Le Fort I 型骨切り術, 下顎枝矢状分割術, 寛骨臼回転骨切り術とした。頭蓋, 股関節それぞれで x 軸, y 軸, z 軸の設定及び原点の決定を行い, 6 変数を用いた同時変換行列による 6 自由度探索法で三

次元画像 (3D-CT 画像) の重ね合わせを行った。重ね合わせた結果、上顎骨、下顎骨の原点の移動量、回転量を定量化することが可能であった。股関節でも同様の結果が得られた。術前後の画像を重ね合わせるにより、三次元的な骨の移動を 6 変数で定量的に表現でき、有用な評価法であると考えられた。

キーワード：骨切り術、重ね合わせ、三次元画像、6 自由度探索法

はじめに

口腔外科領域における顎変形症や整形外科領域における股関節形成不全の治療において、骨切り術が施行される。この骨切り術では、術前後の骨格形態や骨格の安定性の評価が不可欠であり、通常は X 線写真像 (セファロ分析、CE 角計測など) により二次元的に行われている。近年、CT などの三次元画像を用いて評価する試みがなされているが、一般的な評価方法には至っていない^{1)~4)}。その理由として、二次元 X 線写真像のように術前後の画像の重ね合わせが容易にできないことと座標系の設定法が確立していないことがあげられる。しかし、実際の骨切り術において、骨は三次元的に移動するため、三次元評価が必要であると考えられる。三次元空間上の剛体は 6 自由度を有し、その状態を表現するためには、位置 3 変数と姿勢 3 変数の 6 変数が必要となり、画像の重ね合わせを手作業で行うことは困難である。そこで我々は、三次元画像を正確に重ね合わせられるよう全自由度に対する 6 自由度探索法を考案した。これは、術後画像を位置および姿勢の全 6 変数に対してそれぞれ座標変換し、術前後の骨の重なりを全ての位置および回転で調べる手法である。

今回、6 自由度探索法の精度を検証するとともに、顎顔面および寛骨を対象とした術前後の臨床画像の重ね合わせ、三次元評価を行ったので報告する。

対象および方法

以下の 3 症例 (3 術式) を対象に術前後の評価を行った。

(1) 上顎後退に対する Le Fort I 型骨切り術

術式：上顎歯肉を切開し上顎骨を広く露出させ、上顎骨を梨状口側縁から翼突上顎結合部にかけて水平に骨切りして自由度をもたせる。手術前に予定していた位置に上顎骨を移動しチタン製ミニプレートまたは吸収性ミニプレート 4 枚で頭蓋骨に固定する。

(2) 下顎前突に対する下顎枝矢状分割術

術式：下顎臼歯部外側の歯肉に切開を加え、下顎枝前縁を露出させて、下顎を矢状面に分割していき下顎骨体部と顎関節のついている下顎枝部分に切離する。左右で

行う事で、下顎骨体部の自由度を得る。予定の咬合の位置で、Le Fort I 型骨切り術と同様にチタン製ミニプレートまたは吸収性ミニプレートで固定する。

(3) 寛骨臼蓋形成不全に対する寛骨臼回転骨切り術

術式：股関節前側面を約 15 ~ 20cm、後面の皮膚を約 10cm、計 2 カ所切開し、骨盤の腸骨・坐骨・恥骨を骨切りする。臼蓋が切離された状態にし、この臼蓋を骨頭が包み込まれるように回転させる。回転された臼蓋は、鋼線で固定する。

CT 撮影は本院放射線科に導入されている Aquillion 64DAS (TSX-101A/4A) (東芝メディカルシステムズ社製) で行い、撮影条件は、管電圧 120kV、管電流 130mA、スライス厚 0.5mm、スキャン速度 1.0sec/rot、Pitch 0.641、再構成関数 FC03、ガントリチルト 0° とした。

(1) では、頭蓋を A 部、上顎骨を B 部の 2 つの部位に分割し、(2) では、頭蓋を A 部、下顎骨を C 部、右側下顎枝を R 部、左側下顎枝を L 部の 4 つの画像に分割した。また、(3) では、患側の寛骨臼部分を P 部、P 部以外の寛骨を E 部の 2 つの部位に分割し、術前と術後で三次元画像の重ね合わせを行った。

座標系の設定について (図 1)、頭蓋においては、左右の骨外耳道上縁の midpoint と左右の眼窩骨縁最下点の中心を結んだ線を y 軸、左右の骨外耳道上縁 (左: PoL 右: PoR) の midpoint と左右の眼窩下縁最下点 (左: OrL 右: OrR) で得られる平面上で y 軸に対して垂直上向きを z 軸、y 軸と z 軸に対して垂直な向きを x 軸とした。また、B 部の原点を上顎中切歯間歯槽突起 (Mp)、C 部の原点

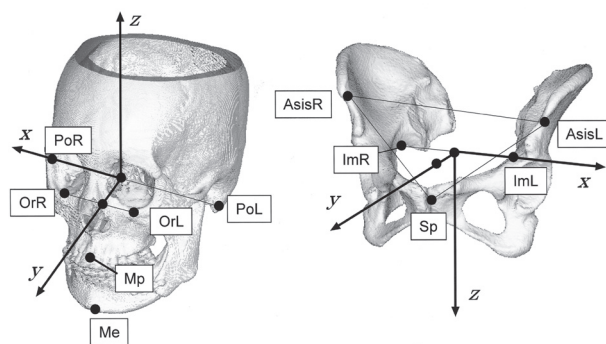


図 1 座標設定のための基準点

を下顎の最下点 (Me), L, R 部の原点を下顎頭の最長線の中点とした。股関節においては, 左右上前腸骨棘 (左:AsisL 右:AsisR) と恥骨結節の重心点 (Sp) を求め, その重心点と左右の大坐骨切痕 (左: ImL 右: ImR) の 3 点を結んだ平面を求めた。左右の大坐骨切痕の中点と重心点を結んだ線を y 軸とし, 求めた平面上で y 軸に対して垂直下向きの線を z 軸, y 軸と z 軸に対して垂直内側を x 軸とした。また, 大腿骨頭形状を球と仮定して, 骨頭表面の座標から骨頭中心を求め, 原点とした。以上で得られる座標系を図 2 に示す。なお, 3 変数による姿勢表現としてロール (Roll)・ピッチ (Pitch)・ヨウ (Yaw) 角を用いた。

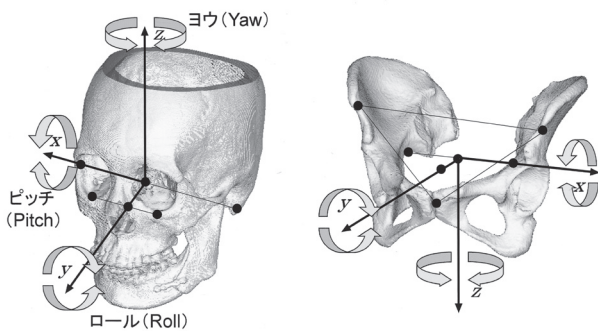


図 2 座標の設定

三次元画像の取得は, CT の撮影条件を一定として術前および術直後に三次元画像を撮影した。また, (2) 下顎枝矢状分割術に対しては, 術後 1 年に撮影を行った。次に, 再構築した三次元画像の余剰な部分をトリミングし, 対象となる領域を抽出した後, 骨の CT 値で二値化した。術前後の三次元的な状態を表現するためには, 3 方向の位置および 3 つの回転角の合計 6 変数が必要となる。本報告における三次元画像の重ね合わせの手法は, 術後の三次元画像における全 6 変数をそれぞれに変化させ, 術前画像に重ね合わせを行う全探索法を用いた。

実際には, ピッチ (移動・回転間隔) を 4mm, 4° から 0.0625mm, 0.0625° まで半減し, 重ね合わせを行う。また, 重ね合わせを行った画像に対して, 所定のピッチで画像を移動及び回転させることにより, 術前後画像の重ね合わせの精度を検証した。臨床画像の評価においては, 全ての状態に対して臨床評価に要求される小さなピッチで座標変換を行うことは, 計算時間から困難である。そこで, 探索ピッチを 4mm, 4° から開始し, ピッチを半減することで, 0.125mm, 0.125° まで探索した。

結 果

図 3 に同一画像を所定のピッチでずらした場合の画素の重なる割合を示す。同一画像を用いているために, 完全に画像が重なっているピッチ 0 mm においては, 割合は 100% であり, 位置および姿勢のずれを大きくしていくと割合は減少した。図 4 に頭部を対象に術前後の画像を重ね合わせた場合の各ピッチにおける重なる割合を示す。ピッチ 4mm, 4° で探索を行った場合は術前後の画像が重なる割合は 78% 程度であるが, 探索ピッチを半減していくと割合は上昇した。

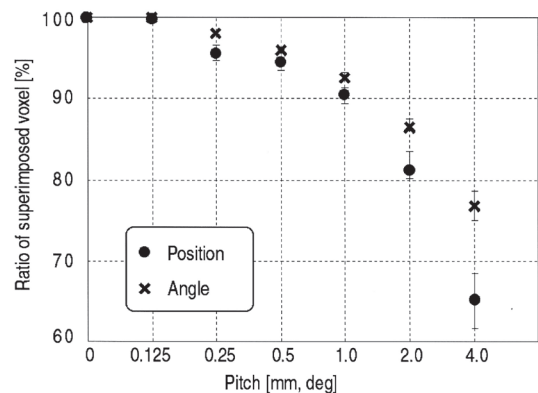


図 3 所定のピッチでずらした場合の画素の重なる割合

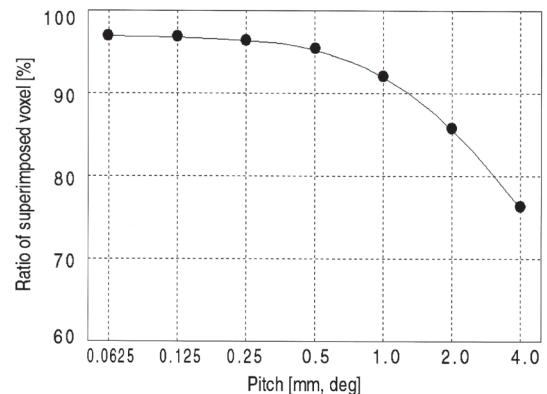


図 4 各ピッチにおける A 部の画素の重なる割合

(1) Le Fort I 型骨切り術において術前画像に術後 1 か月の上顎画像を重ねた状態を図 5 に示す。この図より, 灰色の術前に対して白色の上顎が前方に移動していることが確認される。術前と術後 1 か月時画像の全探索法により得られた上顎 B の移動は, x 方向に -3.5mm, y 方向に 2.7mm, z 方向に 0.2mm および z 軸回りの回転が 4.3°, y 軸回りの回転が -0.8°, x 軸回りの回転が -0.9° であった (表 1)。図 6 に (2) 下顎枝矢状分割術における, 術前と術直後の下顎を重ね合わせた三次元画



図5 上顎骨 術前, 術後1か月重ね合わせ

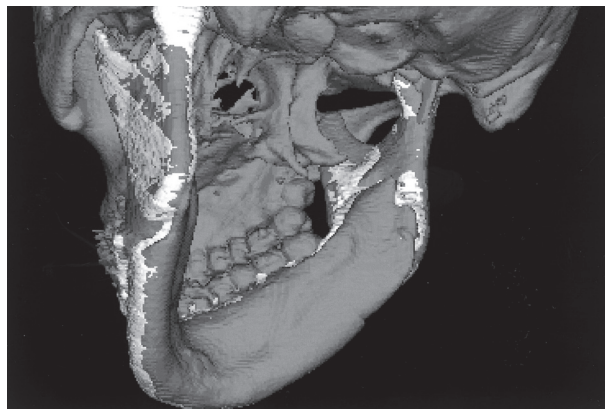


図7 下顎骨 術後1か月, 術後12か月重ね合わせ

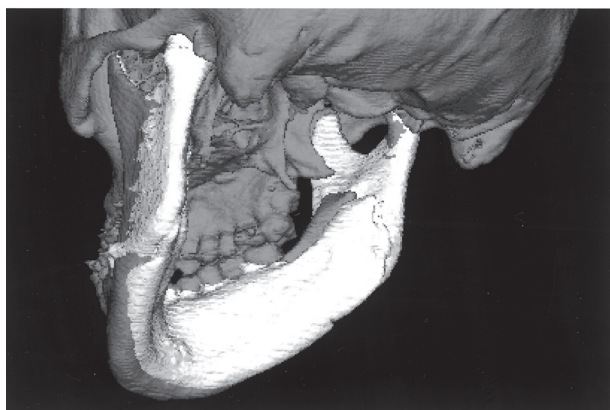


図6 下顎骨 術前, 術後1か月重ね合わせ

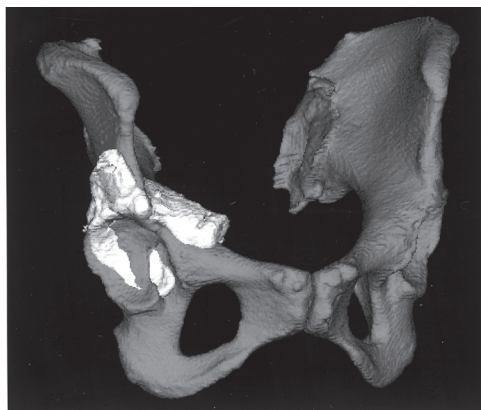


図8 寛骨 術前, 術後重ね合わせ

像を示す。突出したC部を後退させる手術を行ったため、C部で術直後の白色部分が術前の灰色部分より後ろにある。また、術前および術後1か月の重ね合わせを行った結果、表1に示す様に下顎Cはy軸負の方向に3.0mm移動しているのが確認された。同様に、下顎枝L、Rに関しても、術前後に対する術後の位置および姿勢を求めることが可能であった。

図7に(2)下顎枝矢状分割術において、術後1か月と術後1年の下顎を重ね合わせた三次元画像を示す。術

後1か月と術後1年の間では骨の移動はないが、C部で1年後の白色部分が術直後の灰色部分より前にある。これは、術後1年経過して、後戻りが生じたためである。図6と図7を比較すると、後戻りは、L、R部の骨切り部分のリモデリング、軟組織による牽引等によりC部が押し出されるためだと考えられる。術後1か月と術後1年を比較するとC部でy方向に1.0mm移動し、前方に戻っているのが確認された。

図8に術前のCT画像と術後の寛骨臼Pを示す。この

表1 顔面骨 術前, 術後1か月重ね合わせ結果

	X[mm]	Y[mm]	Z[mm]	Z[deg]	X[deg]	Y[deg]
上顎中切歯間歯槽突起部	-3.5	2.7	0.2	4.3	-0.8	-0.9
下顎骨最下点(Menton)	-0.7	-3.0	2.7	2.1	-0.7	6.0
右顎関節突起中心点	0.2	-0.4	0.0	2.4	-1.9	0.2
左顎関節突起中心点	-0.3	-0.3	0.3	-2.5	-0.8	-1.4

表2 顔面骨 術後1か月、術後12か月重ね合わせ結果

	X[mm]	Y[mm]	Z[mm]	Z[deg]	X[deg]	Y[deg]
下顎骨最下点 (Menton)	-0.1	1.0	0.1	-0.1	-0.1	-1.0
右顎関節突起中心点	0.4	0.5	-0.1	1.2	-0.1	0.9
左顎関節突起中心点	-0.1	0.2	0	0.3	0.4	0.4

表3 寛骨 術前、術後の重ね合わせ結果

patient	X[mm]	Y[mm]	Z[mm]	Z[deg]	X[deg]	Y[deg]
(1)	5.3	3.2	-2.1	2.2	14.6	-0.4
(2)	3.5	4.1	-0.8	1.1	17.7	4.3

図より、骨切り術によって回転したP部が大きくずれている。また、術前の寛骨臼Pの位置である図中の灰色部分から、y軸回りに大きく回転していることが確認された。表3に臨床で得られた2例の三次元重ね合わせを行った結果を示す。表中のx, y, z, ϕ , θ , ψ は術前後の寛骨臼の移動量と回転角であり、X, Y, Zは骨頭の術前後の移動量である。表3より、他の角度に比べ、臼蓋を外方へ回転させる手術を行ったため、y軸回りに大きな回転が生じている。また、2例とも寛骨臼の移動と同じ方向に骨頭が移動していることが確認された。寛骨臼および骨頭は内側へ移動しており、本術式において、術者が意図した骨頭位置の内側化を実現していることを評価することが可能であった。

考 察

二次元セファロ分析（頭部エックス線規格写真による分析）は1931年にBroadbentによって導入された。この方法は、頭蓋顔面の成長・顎変形症のための矯正や顎顔面手術の評価において、重要な方法のひとつである。非常に有用な方法であるが、不正確な部分も持ち合わせている。例えば、側方セファロでは左右に解剖学的ランドマークや構造物が存在するため、左右非対称症例を評価するときには正面セファロとの併用が必要となる⁸⁾。さらにセファロエックス線における倍率、歪み、構造物の重なり合いにより頭蓋顔面症候群のような重度な奇形を伴う患者の構造物を信頼性高く正確に評価する事は難しい^{9) -13)}。

三次元画像は重なり合いと倍率による問題を回避し、

二次元より精度のよい詳細な頭蓋顔面の評価を行うことが出来る。そのため最近では三次元画像が顎顔面外科や矯正歯科において臨床や研究面で広く用いられてきている^{14) -16)}。

三次元の術前画像に術後画像を重ね合わせるためには、位置3変数と回転3変数の6変数が必要となり、画像の重ね合わせを手作業で行うことは困難である。そのため、術前および術後の画像において座標系を設定し、この座標系を一致させることにより重ね合わせを行う手法が考えられるが、術前後の画像を正確に重ね合わせることはできない。そこで今回、術後画像を位置および姿勢の全6変数に対してそれぞれ座標変換し、術前後の骨の重なりを全ての位置および回転で調べる6自由度探索法を考案した。手動での重ね合わせ¹⁷⁾や設定した座標系を重ねる方法¹⁸⁾と比較して、術前後画像の重なり状態を全探索しているため、正確な評価が可能な手法であると考えられる。二つの画像の表面同士が最も近い距離になる状態を求めるHead and Hat法¹⁹⁾やICP法^{20) -21)}も正確に画像の重ね合わせを行うことができるが、本手法は距離を求める必要がなく、計算手順は容易である。しかし、三次元画像を全て座標変換しているため計算時間が長く、すべての位置および回転評価に要求されるピッチで探索することは困難である。そこで実際には、4mm, 4°という大きなピッチから探索を行い、最も重なった状態の周辺においてピッチを半減させることとした。図3より、同一画像に対して所定のピッチで位置および姿勢を変化させた場合、0.125mm, 0.125°の移動では、画素の重なる値は100%であり、0.5mmにおいても95%である。一方、頭部を対象に術前後の画像を重

ね合わせた場合は、ピッチが4mm, 4°においては割合が78%である。しかし、ピッチを半減することにより割合は上昇し、0.5mm, 0.5°よりピッチを小さくしても画素の重なる割合はあまり上昇しない。CT画像のスライス厚が0.5mmであることを考慮すると、0.125mm, 0.125°まで探索を行うと、十分な重ね合わせが可能である。また、6自由度全てに対して位置および姿勢を変化させているため、得られた結果は最も術前後の画像が重なった状態と考えられる。

この手法により、図5, 6, 7に示される重ね合わせが可能となった。図4より、探索ピッチが大きい場合は重なった画素の割合は低いが、探索ピッチを半減すると重なった割合は増加する。しかし、0.5mm, 0.5°以下の探索ピッチでは、この割合の変化は小さくなり、術前後の画像の重なり程度は向上しなくなる。これは、CT画像の画素よりも小さな探索ピッチで6自由度全探索を行ったことから、得られた結果以上の画像は存在しない。以上から、0.125mm, 0.125°までの探索で、精度の高い重ね合わせが可能と考えられた。

二次元セファロ分析は術後評価のための有用な方法であり、異なる時期に撮影されたフィルムを重ね合わせて評価を行う。この重ね合わせにはFH平面（フランクフルト平面）やSN平面（トルコ鞍の壺状陰影の中心点と鼻前頭縫合部の最前点を結んだ線）を使用する事が一般的^{22)~24)}であるが、これらの平面は三次元上に存在する平面であり二次元上で表現する事は難しい。二次元重ね合わせの精度を評価した報告では、FH平面やSN平面を使用する重ね合わせは精度、再現性が低い事が示された^{22)~26)}。さらに、トレーシングやランドマークの決定にも経験などの人為的要因が精度に影響を与える可能性があることを示した^{23), 27)}。

本手法において必要となる作業は、術前および術後の座標系の設定である。術後の座標系は探索の初期値のみに影響を与え、最終的な結果には影響を及ぼさないため、本手法は術前の座標系の設定のみで自動的に評価でき、撮影時の体位の変化にも対応可能と考えられる。人為的な操作が介入するのは術前の座標設定のみであるので経験による精度の低下は考えにくい。

以上より、本手法は対象に関わらず、骨切り術の三次元評価ができるとともに、術前の座標の設定のみで、術前後の位置および姿勢を表す6変数を決定することが可能となった。後戻りを含む顎変形症治療における骨格形態の評価にも有用であると考えられる。また、寛骨臼回転骨切り術に対する従来の評価では、寛骨臼および骨頭の内側へ移動の確認が困難であったため、本手法を用いることで寛骨臼回転骨切り術の評価の精度を向上できたと考えられる。しかし、6変数による表現方法は距離と角度が混在しており非常に理解しにくい。二次元評価か

ら三次元評価への移行のためには表現方法の改善も検討課題である。また、時間的な問題点として顎矯正手術患者の多くは矯正器具を装着しており、CT撮影時に出現する金属アーチファクトの除去、そして6自由度探索法による重ね合わせ作業の所要時間短縮なども今後の課題の1つである。

おわりに

顎顔面および寛骨を対象とした骨切り術において、三次元画像の全探索法を用いて術前後の画像を重ね合わせることで、三次元術後評価を行った。その結果、骨の移動および回転を求めることが可能となるとともに、術後の形態変化、骨格安定性も評価できる有用な評価法と考えられた。

参考文献

- 1) 安井常晴, 他.: 顎変形症に対する3D-CTの利用 — 第1報 3D-CTの再現性の評価 —, 日顎変形誌, 7: 18-23, 1997.
- 2) Lucia H. S. Cevidanes, et al.: Three-dimensional cone-beam computed tomography for assessment of mandibular changes after orthognathic surgery, Am J Orthod Dentofacial Orthop, 131: 44-50, 2007.
- 3) Masahito Maeda, et al.: Changes in skeletal asymmetry after sagittal split ramus osteotomy for patients with mandibular prognathism: three-dimensional computed tomographic assessment, Oral Radiology, 23: 10-15, 2007.
- 4) 金成暢, 他.: セファロ分析による三次元的な下顎骨形態の推察の可能性, 歯科学報, 107: 323-330, 2007.
- 5) Michael D. Harris, et al.: Factors influencing condylar position after the bilateral sagittal split osteotomy fixed with bicortical screws, J Oral Maxillofac Surg, 57: 650-654, 1999.
- 6) John J. Craig: Introduction to robotics - mechanics & control, Addison - Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1986, p15-59.
- 7) 吉川恒夫: ロボット制御基礎論, コロナ社, 東京, 2000, p11-24.
- 8) Van Der Meij A: Reliability and reproducibility of the landmarks of posteroanterior cephalometry. Master Thesis, Aarhus, The Royal Dental College, 1997.
- 9) E.H. Hixon, et al.: Cephalometrics and longitudinal research, Am J Orthod, 46, 36-42, 1960.
- 10) A. Bjørk and B. Solow: Measurements on radiographs, J Dent Res, 41, 672-683, 1962.

- 11) S. Baumrind and R.C. Frantz : The reliability of head film measurements. II. Conventional angular and linear measures, *Am J Orthod*, 60 , 505-517, 1971.
- 12) A.M. Whyte, et al.: Radiological assessment of hemifacial microsomia by three-dimensional computed tomography, *Dentomaxillofac Radiol*, 19 , 119-125, 1990.
- 13) D.A. Tyndall, et al: Positional changes of the mandibular condyle assessed by three-dimensional computed tomography, *J Oral Maxillofac Surg*, 50 , 1164-1172, 1992.
- 14) S.L. Brooks: Computed tomography, *Dent Clin North Am*, 37, 575-590, 1993.
- 15) E. Elolf, et al: Three-dimensional computed tomographic reconstruction: planning tool for surgery of skull base pathologies, *Comput Aided Surg*, 3, 89-94, 1998.
- 16) M.A. Papadopoulos et al: Three-dimensional craniofacial reconstruction imaging. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 93, 382-393, 2002.
- 17) Akitoshi Kawamata, et al. : Three-dimensional computed tomography evaluation of postsurgical condylar displacement after mandibular osteotomy, *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 85 :371-376, 1999.
- 18) Yoshiko Sano et al. : Importance of head positioning in cephalometric analysis of 3d-ct stereotaxic images, *J Osaka Dent Univ*, 39 : 47-55, 2005.
- 19) Charles A. Pelizzari, et al. : Accurate three-dimensional registration of ct, pet, and/or mr images of the brain, *J Comput Assist Tomogr*, 13 : 20-26, 1989.
- 20) Paul J. Besl, et al. : A method for registration of 3-d shapes : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14 : 239-256, 1992.
- 21) Reza Arbab Chirani, et al. : Temporomandibular joint: a methodology of magnetic resonance imaging 3-d reconstruction, *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 97 : 756-761, 2004.
- 22) J. Ghafari, F.E. Engel and L.L. Laster, Cephalometric superimposition on the cranial base: a review and a comparison of four methods, *Am J Orthod Dentofac Orthop*, 91 , 403- 413, 1987.
- 23) M.J. Gliddon, J.J. Xia, J. Gateno, H.T. Wong, R.E. Lasky and J.F. Teichgraber, et al. The accuracy of cephalometric tracing superimposition, *J Oral Maxillofac Surg*, 64 , 194-202, 2006.
- 24) H. Pancherz and K. Hansen, The nasion-sella reference line in cephalometry: a methodologic study, *Am J Orthod*, 86 , 427-434, 1984.
- 25) M.S. Cooke and S.H. Wei, Cephalometric errors: a comparison between repeat measurements and retaken radiographs, *Aust Dent J*, 36 , 38-43, 1991.
- 26) S. Baumrind, D. Miller and R. Molthen, The reliability of head film measurements. *Am J Orthod*, 70 , 617-644, 1976.
- 27) M. Santoro, K. Jarjoura and T.J. Cangialosi, Accuracy of digital and analogue cephalometric measurements assessed with the sandwich technique. *Am J Orthod Dentofac Orthop*, 129 , 345-351, 2006.

(平成 23. 10. 8 受付, 平成 23. 11. 30 受理)

