

3次元システムによるクラウンの測定法ならびに設計法

根岸 政明*, 神田 俊昭*, 古沢 康仁*, 佐野 裕子, 下河辺 宏功, 内田 安信

財団法人歯友会 歯友歯学会附属医療機材研究所*

明倫短期大学 歯科技工士学科

Three Dimensional Measurement and CAD-Design of Dental Crown

Masaaki Negishi*, Toshiaki Kanda*, Yasuhito Furusawa*, Yuko Sano, Hirokata Shimokobe, Yasunobu Uchida

*The Shiyuukai Foundation, The Medical Machinery and Materials Laboratory attached to Shiyuu Academic Dental Circles,***Department of Dental Technology, Meirin College*

非接触式3次元測定機による高精度の歯冠形態の測定方法と、得られたデータによるクラウンのCAD設計について検討をおこなった。今回の測定法では、従来の一般的なXまたはY座標のいずれか1方向のスキャンデータを入力する1方向方式に対して、2方向3分割方式を試行した。すなわち測定領域を歯冠の中央部と左右側面部に3分割し、中央部はY座標方向スキャン、左右はX座標方向スキャンにより入力してこれらを後に合成する方法である。この方法により1方向方式では粗くなっていた左右側面部の測定精度が向上した。精度を比較すると1方向方式では $\pm 150 \mu\text{m}$ の誤差を生じたのに対し、2方向3分割方式での誤差は今回使用した3次元測定機の機械精度 $\pm 25 \mu\text{m}$ と同等であった。またCADによるクラウン設計では支台歯に適合する模型を制作するのではなく、一般的な人工歯形態を前記の2方向3分割方式により測定して得たデータをデータベースとし、これに変形、修正を加える流用設計により任意の支台歯に適合できるかの検討をおこなった。歯冠形態の最適位置、サイズの決定は隣接歯とのコンタクトポイントの設定、咬頭高さの合わせ込み、マージンラインと最大豊隆線との相対位置バランス等によりおこなった。また対合歯との咬合関係はFGPデータを用いて重複部を修正した。その結果、データベースを使用する流用設計によりクラウンモデルをCAD上に作成することができた。

キーワード：歯冠形態，3次元測定，測定精度，3次元CAD，データベース

To digitize dental crown contours more accurately, two methods of noncontact three dimensional measurements were reviewed and the CAD-design of a crown was carried out based on the data obtained. Two methods were adopted in the study: one was the conventional method, i. e., a one direction scanning system (System-1); the other was a two direction and three division scanning system (System-2) newly developed by the authors. In the former, the crown contour was built up by the data input from a one directional scanning of the X or Y coordinate, while in the latter the contour was formed by combining these three data obtained by a Y-directional scanning of the occlusal surface including the labial and lingual surfaces, X-directional scanning of the mesial surface, and X-directional scanning of the distal surface.

As a result, accuracy in System-2 was markedly improved compared with that in System-1, i. e., error in System-1 showed $\pm 150 \mu\text{m}$, while it was $\pm 25 \mu\text{m}$ in System-2. It was found to be equivalent to the accuracy of the digitizer used. CAD-design of a dental crown (tooth number 46) was performed by superimposing its 46 data on the CAD-design of the abutment of a stone model. The most suitable position, size, and contact points of the crown model were adjusted by extension, contraction, parallel translation and rotation of the crown contour data. The occlusal relation to the opposing teeth was determined by adjusting the Z-coordinate after superimposing the FGP data on the occlusal surface of 46 data. Thus the CAD-design of crown was completed. The study suggests that the CAD-design procedure for crowns using System-2 will be applicable for any tooth crown by selecting arbitrary crown data from data base input in advance.

Key words : Dental crown contour, Three dimensional measurement, Accuracy of digitizing, Three dimensional CAD, Data base

緒 言

歯科補綴物は用途に合わせ多種の素材が使われており、それぞれの諸物性に応じた製作加工がなされている。製作上、現状ではクラウンやブリッジなどの加工法として金属の鋳造が主流となっているが、特に生体親和性に優れたチタンについては難鋳造材とされており、製作物の物性の均質化や工程の短縮には限界がある。これらの問題を解決するためには新しい技術開発を進めていく必要がある。

工業界においては、従来、鋳造法によって製作していた部品は小、中型部品を中心としてほとんどが機械加工でおこなわれるようになり、鋳造の問題の解決、強度向上の安定化など、NC 機械加工による自動化で目覚ましい改善がなされている。さらにコンピュータ支援による CAD (Computer Aided Design), CAM (Computer Aided Manufacturing), CAE (Computer Aided Engineering) により部品強度の改善、工程および工数の短縮化に成功を治め低コスト化へも寄与している。

近年、これらの技術を歯科医療の分野にも適応するための研究開発が、国内外で活発になってきている。^{1~13)}

3次元測定の方法としてはタッチプローブを用いる接触式と、レーザ光による非接触式の2通りがあるが、接触式では測定時間が長い欠点がある。また、従来一般的におこなわれている測定方式である1方向スキャン方式^{14,15)}は、スキャン方向に対して平行に位置する側面の測定精度が低下する。そこで本研究では実験1として非接触式3次元測定法を採用して、新たに2方向3分割スキャン方式を考案し、部位ごとにスキャン方向を変えて計測、合成することによって3次元測定機の精度を十分引き出した測定方法を試行した。

また実験2としてデータベースに登録済みの歯冠形態データを基に、3次元CAD上で変形、修正を加える流用設計によるクラウン設計方法について併せて検討をおこなった。

実験方法

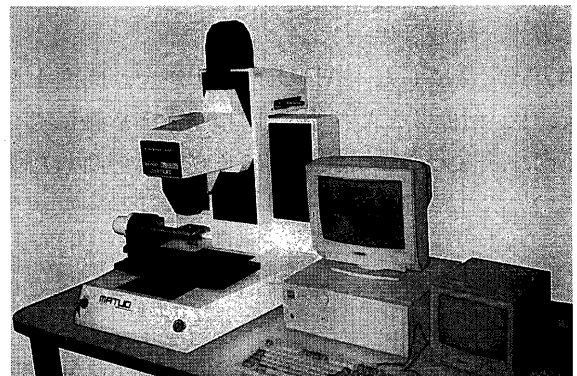
1. 実験1 3次元測定

1) 測定装置

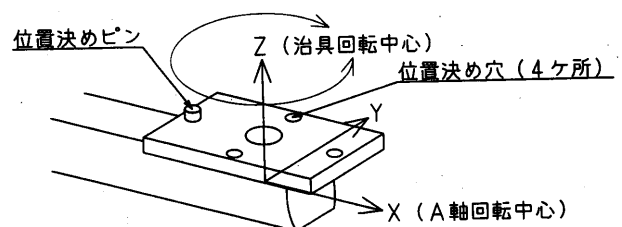
本実験で使用した3次元測定機 (SURVEYOR 1000, マツオ) は、レーザによる非接触式の測定機であり図1-aに示すように左より測定機本体、制御用パソコン、計測部監視モニターで構成されている。本

体中央のレーザヘッド部より下方に向かってレーザスポット光を投光し、反射光を左右に15°傾けた CCD センサー2台で受光、三角測量法の原理によりレーザスポット点位置のXYZ座標値を入力することができる。座標系は向かって右方向にX軸、奥行き方向にY軸、上方向にZ軸の正方向で構成されている。又、図1-bにレーザヘッド部の下に位置する測定テーブルの構成図を示す。この測定テーブルはX軸を中心に回転させるA軸機構があり、これを回転させることにより測定テーブル上の被測定物のYプラス方向、及びYマイナス方向のアンダーカット部を計測することが可能である。更に今回我々が製作したこの測定テーブルは回転治具であり、Z軸を中心に90°毎、4位置で回転位置決めが可能な構造としており、被測定物のXプラス方向、及びマイナス方向のアンダーカット部について本治具をZ軸を中心に90°回転位置決めし、A軸を回転することにより計測を可能とした。

本機の測定速度は10~200点/secであるが今回は高精度測定をおこなうため15点/secで設定した。測定精度は幾何形状試験片を測定しCAD上で確認したところ $\pm 25 \mu\text{m}$ であった。



a. 測定機全体の外観



b. 回転位置決め機構付き測定テーブル

図1. 非接触式3次元測定機

2) 歯冠形態の測定

従来より一般的に行われている1方向スキャン方式と、今回我々が試行する2方向3分割スキャン方式と

の精度比較をおこなうため、同一のモデルで計測をおこなった。

被測定物は下顎右側第1大臼歯（以下右下6番と表す）の人工歯（レーニング人工歯 ST-L, 東伸洋行）とし、計測時のレーザ光乱反射防止のため微細粒子の灰色スプレー（オールマイティープライマー, Standard Brands Paint Co. USA）にて艶消し処理を施した。

(1) 1方向スキャン方式による測定

CAD 上にモデルを得るため人工歯の舌側を X 座標プラス方向、頬側を X 座標マイナス方向となるように測定テーブル上に設置し Y 方向スキャンにて点間ピッチ 0.1 mm, 線間ピッチ 0.2 mm で計測をおこなった。

(2) 2方向3分割スキャン方式による測定

今回試行するモデルを作成するため、測定テーブルである回転治具を Z 軸を中心に 90° 回転し、さらに A 軸を ±60° 回転し点間ピッチ 0.1 mm, 線間ピッチ 0.2 mm で計測後、前記の 1 方向スキャンモデルへ合成した。

(3) 2方式の精度評価

両方式で作成した CAD 上のモデルを、断面 1 として咬頭頂、断面 2 として中心小窩付近で X 軸に対し垂直方向、すなわち頬舌側方向に 2 カ所で切断した切断面について比較および精度的評価をおこなった。

2. 実験2 ク라운の設計

1) 石膏モデルの測定

右下6番をクラウン設計の対象として支台歯形成し、上下顎の石膏モデルを製作した。支台歯の形態はシャンファータイプとし、図2に示すように支台歯の頬側面を X プラス方向、近心側面を Y プラス方向になるよう測定テーブル上に下顎石膏モデルを固定した。クラウンの設計に必要なデータとして右下6番支台歯、右下5番、7番の両隣接歯隣接面、上顎対合歯の顎運動軌跡である FGP (Functionally Generated Path) 記録モデル、以上4つのデータを先の3次元測定機によって点間ピッチ 0.1 mm, 線間ピッチ 0.2 mm で計測した。なお、各隣接面を計測する際、隣接歯がレーザ光を遮らぬように石膏モデルは右下3～5番、6番、7番がそれぞれ単独で着脱が可能になるよう製作した。

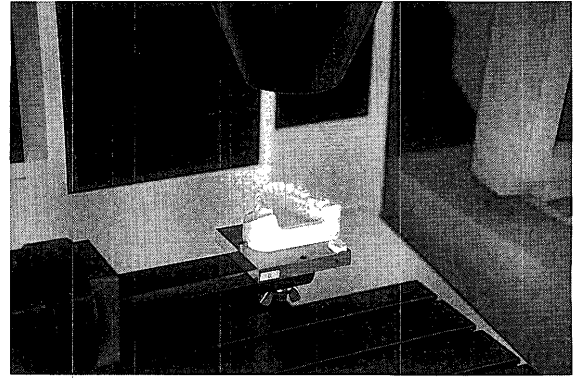


図2. 測定テーブルに固定された下顎石膏モデル

2) ク라운の設計

3次元測定により得られた支台歯データ上へデータベースに登録済みの2方向3分割スキャン方式による歯冠形態データを配置し、隣接歯とのコンタクトポイントの設定、咬頭高さの合わせ込み、マージンラインと最大豊隆線との相対バランス、隣接歯との位置関係により最適な位置とサイズを決定した。

また対合歯との咬合関係については FGP 記録モデルデータを用いて重複部を修正し調整をおこない、完成した歯冠形態データと支台歯データをマージンラインで結合しクラウンモデルを作成した。

結果および考察

1. 3次元測定

(1) 1方向スキャン方式による測定

Y 方向の 1 方向スキャンにて図3-aのデータを得た。中央部は咬合面、左部は A 軸を 60° 回転し計測した遠心側面、右部は A 軸を -60° 回転し計測した近心側面を示す。図3-bに、近遠心のそれぞれの側面を CAD 上で X 軸を中心に角度回転補正をおこない正規の位置に戻す操作をおこなった結果を示す。左右側面の近遠心部はレーザヘッド方向より見た際のアンダーカット部であったが A 軸を回転することによって正確にデータが入力されているのが確認できる。図3-cで咬合面、近遠心側面を結合することによって従来方式である 1 方向スキャンモデルが完成した。

(2) 2方向3分割スキャン方式による測定

回転治具を用いて頬舌側面を計測した結果が図4-aである。図4-bでは左部は頬側面、右部は舌側面のデータを表わし、正規の位置に戻すためそれぞれを CAD 上で X 軸を中心に ±60° 回転補正し、さらに Z 軸を中心に -90° 回転補正をかけた結果を示す。Z 軸の回転補正により、スキャン方向が Y 座標方向から X

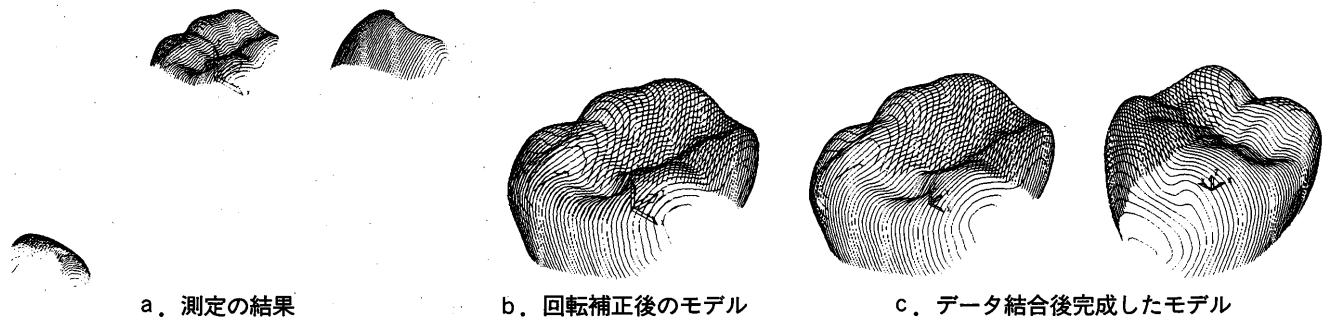


図3. 1方向スキャンモデルの作成

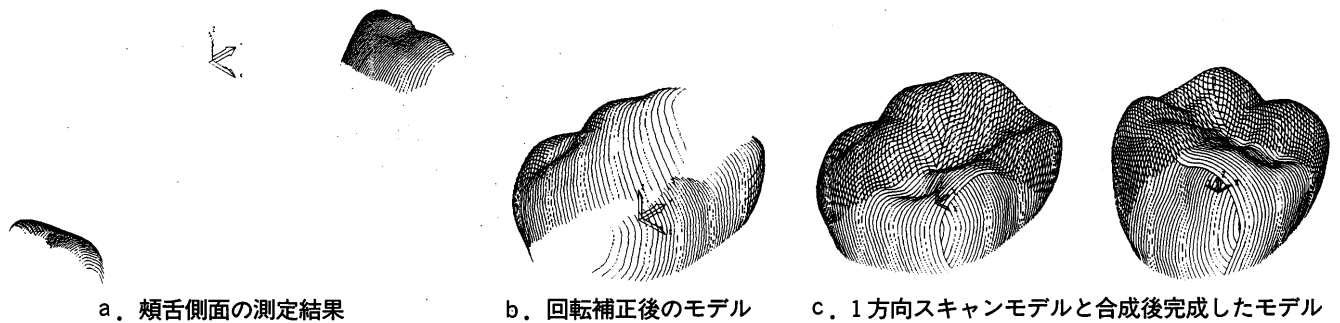


図4. 2方向3分割スキャンモデルの作成

座標方向へ変化したことが確認できる。図4-cは本データを先に作成した1方向スキャンモデル(図3-c)へ合成し2方向3分割スキャン方式として完成したモデルを示す。スキャン方向としてはXとYの2方向であり、モデルを3分割で構成しているため本稿では2方向3分割スキャン方式と呼んでいる。

(3) 2方式の精度評価

従来法である1方向スキャンモデル(図3)と今回試行した2方向3分割スキャンモデル(図4)を比較すると頬舌側面のデータに関して、2方向3分割スキャンモデルがデータが密であり全周にわたり被測定物を忠実に再現していることが確認できた。

また断面を比較するため断面1を図5-a, bに、断面2を図5-c, dに示しており、図5-a, cにおいて1方向スキャンモデルでスキャンラインの切断端点を結んだ断面線を作成、また図5-b, dは2方向3分割スキャンモデルで断面線を同様に作成、表示した。本図からわかるように、1方向スキャンモデルは2方向3分割スキャンモデルの断面線より傾斜角度の大きい部位で非常に粗いデータになっている。また断面2の断面線のみを表示したのが図6であり断面線の構成点をそれぞれ表示した。図6-aの1方向スキャンモ

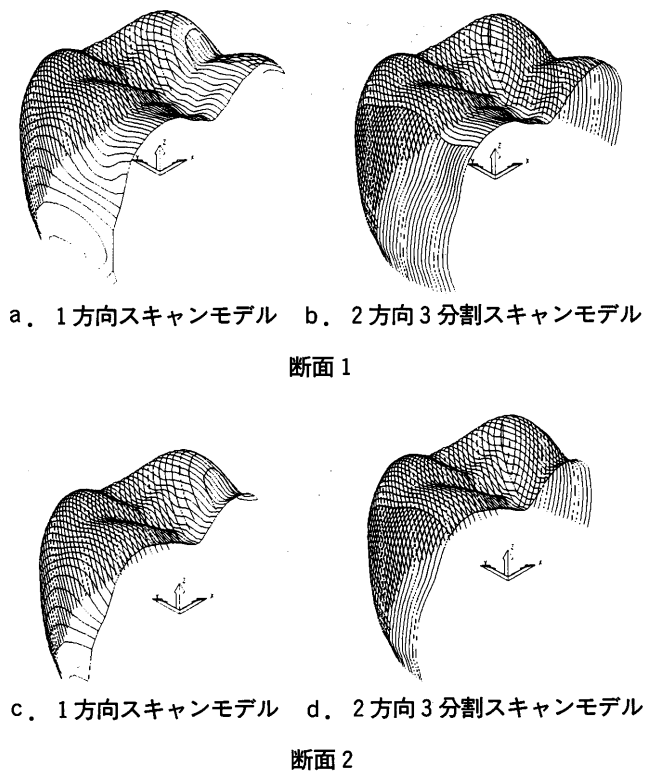
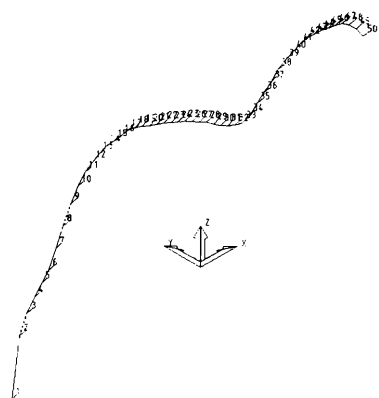
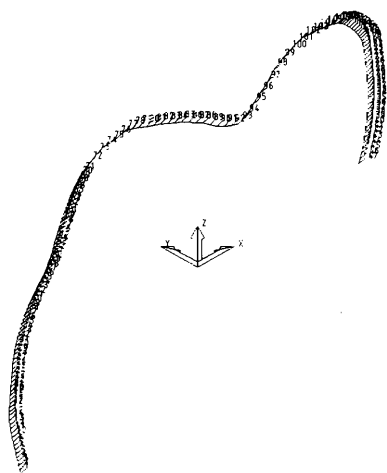


図5. スキャンモデルの断面
断面1：咬頭頂付近での断面
断面2：中心小窩付近での断面

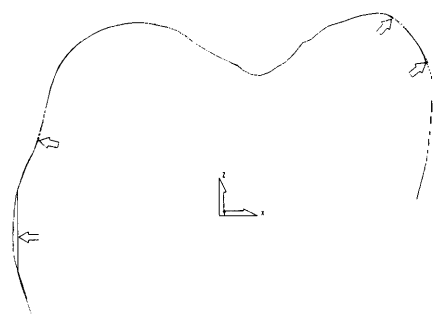


a. 1方向スキャンモデル

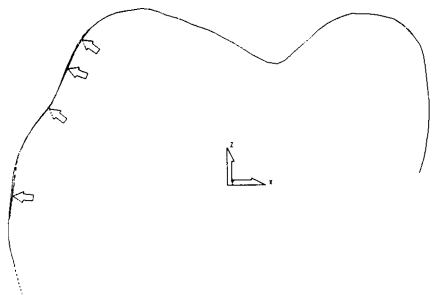


b. 2方向3分割スキャンモデル

図6. 断面2の断面線



a. 断面1



b. 断面2

図7. 2方式断面線を重ね合わせ精度比較
矢印：断面線を重ね合わせ後 30~130 μm の
位置ズレ発生箇所

デルの断面線の構成ポイントは50ポイントに対し、図6-bの2方向3分割スキャンモデルの断面線の構成ポイントは147ポイントで定義点数の密な滑らかな曲線になっている。

つぎに精度的な評価をおこなうため、断面1と断面2をそれぞれ図7-a, bに1方向スキャンモデルと2方向3分割スキャンモデルの断面線を重ね合せて表示した。3次元測定機は試験片を用いた精度テストにより $\pm 25 \mu\text{m}$ であることを確認しているので、2方向3分割スキャン方式では全測定箇所傾斜に沿った計測をおこなったことになり、機械精度の $\pm 25 \mu\text{m}$ が確保されていると考えてよい。

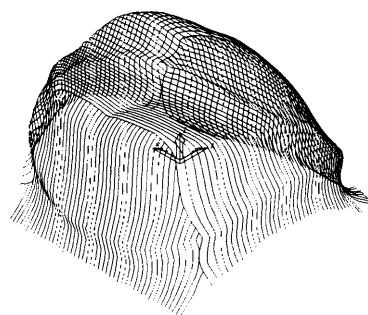
一方、1方向スキャンではCAD上で2方向3分割スキャンの断面に対して30~130 μm のズレが生じている部位が2断面中8カ所(矢印マーク部)発生しており測定機精度を考慮すると被測定物に対して精度上50~150 μm の誤差が生じていた。

2. クラウンの設計

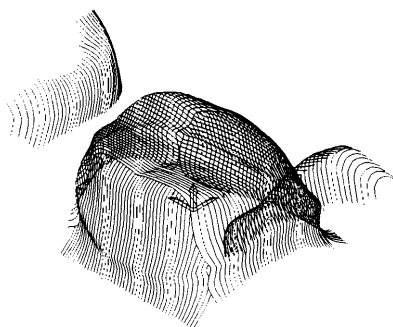
1) 石膏モデルの測定

図8-aに石膏モデルの右下3~5番, 7番歯を取り外して2方向3分割スキャン方式で計測して得られた支台歯データを示す。

図8-bは、右下6, 7番歯を取り外し隣接歯右下5



a. 支台歯の計測



b. 近遠心隣接歯の各隣接面の合成

図8. 設計対象部の計測

番遠心側面，および右下3～6番歯を取り外し右下7番近心側面をそれぞれ計測し，支台歯データ上に合成した図である。これによって支台歯付近の設計に必要なモデルデータが完成した。次に対合歯との咬合関係を見るために，咬合器上で上下顎石膏モデルによって製作したワックスによるFGP記録モデルを石膏に置き換えて，これを右下6番支台歯上に固定し3次元測定を行ないFGP記録データを得た。

2) クラウンの設計

図9-aに，右下6番支台歯の石膏模型の形状をCAD上に再現表示したモデル(図8-a)の各スキャンライン上のマージンラインと思われる曲率の大きいポイントを順次結んで作成した閉曲線を示す。この閉曲線は曲率が全周に渡り激しく乱れているため，加工データ作成時に問題の発生が予想されるので，滑らかな曲線に変更しなければならない。したがって，図9-bに示す通り支台歯への食い込みを避けるため全てのポイントで支台歯データより外側へ向かうようスムージング処理をおこない，これをマージンラインとした。なおマージンラインの変形に伴い支台歯データも

マージンライン上へ合わせ込み処理を完了している。

図10はデータベースに登録してある歯冠形態を支台歯上へ配置しているところで，歯冠形態データを移動，回転，拡大縮小をXYZ軸方向それぞれに対してインタラクティブに修正を加え最適位置を決定した。変形，設定の方法として近遠心的位置関係とサイズに関しては，5番，7番の隣接面に対するコンタクトポイントの設定によって決定した。高さ的位置関係は両隣接歯との咬頭高さの合わせ込み，頬舌方向の位置関係は上方より見た場合の支台歯上のマージンラインとクラウン上の最大豊隆線との相対位置のバランスと両隣接歯との位置関係を考慮し決定した。図11-a, b, cにそれぞれ咬合面，舌側面，舌側遠心側面から見た図を示す。

図12-aはクラウンの咬合関係についての修正をおこなうため，クラウンデータ上にFGP記録モデルデータを配置したところである。クラウン咬合面とFGP面との咬合重複の有無を視覚的に調べるため，それぞれの点群データを面データに変換し3次元CADのカラーシェーディング(面データへの色付け陰影処理)機能を用いてクラウン咬合面を淡色，FGP面を濃

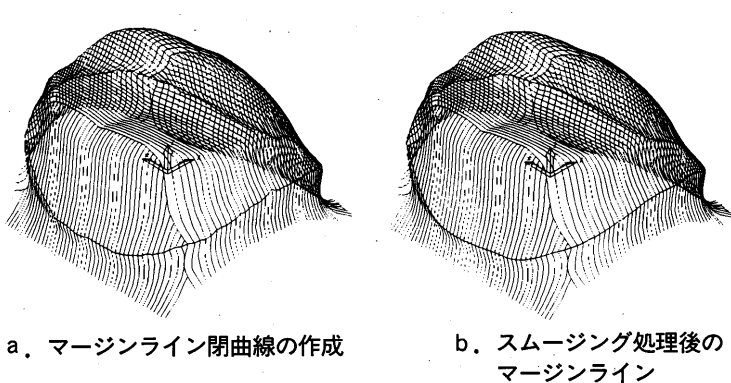


図9. マージンラインの作成

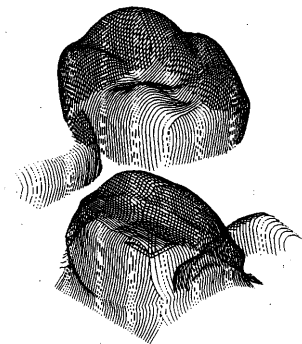


図10. データベースの歯冠形態の支台歯上への配置

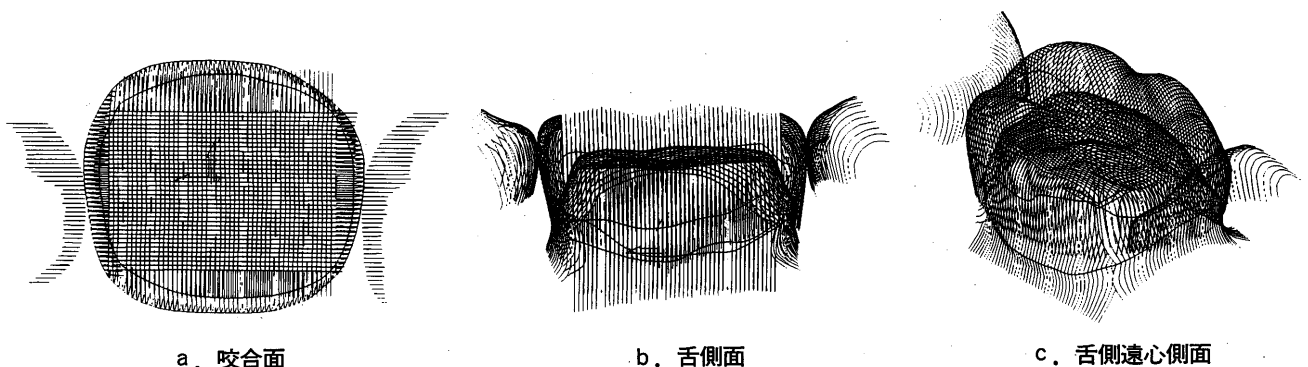


図11. 歯冠形態最適位置の決定

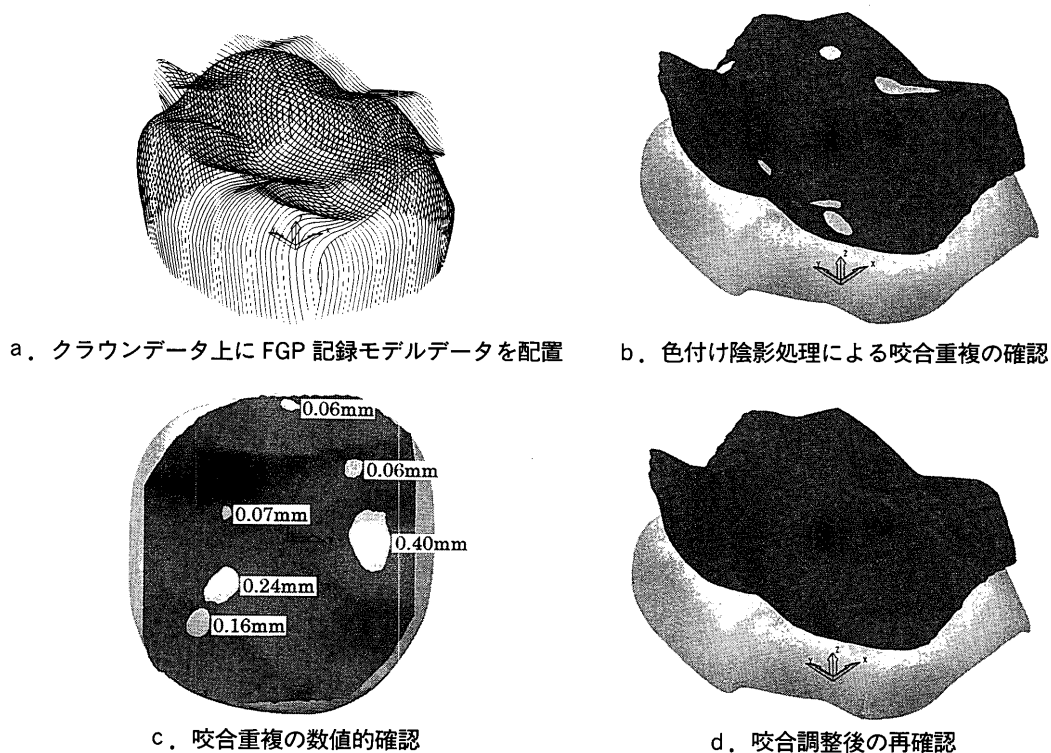


図12. 咬合関係の調整

色で表わした。図 12- b, c に示す通り濃色の FGP 面上に淡色の島状に現れた部分が重複している箇所が 6 カ所あり、数値的にはそれぞれ 0.06~0.4 mm のオーバーラップ量が確認された。これらの重複部位についてクラウンデータの各ポイントをオーバーラップ量分、下方修正を行ないクラウン咬合面の対合歯との咬合調整をおこなった。色付け陰影処理を再度繰り返して完了したのが図 12- d である。咬合関係が改善されたことが確認できた。

図 13- a は隣接歯と対合関係の調整を完了したクラウン外冠形態を示しており上方に位置する外冠形態周回線は最大豊隆線、下方に位置する周回線は支台歯上のマージンラインを表わしている。図 13- b はマ-

ジンライン上へクラウンの各スキャンラインを合わせ込んだ結果を示しており、方法としてはクラウンデータを構成する各スキャンラインを延長、または切断しポイントの移動編集により各スキャンライン端点をマージンライン上へ合わせ込み、つぎにクラウンデータの最大豊隆線からマージンライン間で各スキャンラインにスムージング処理を施した。

本データと支台歯データ (図 9- b) のマージンライン以下で切り取ったデータをマージンラインを接合線とし合成することによって図 14 のクラウン設計を完了した。

以上一連の CAD 上での設計作業工程により、事前記録したデータベースを利用する流用設計が可能であ

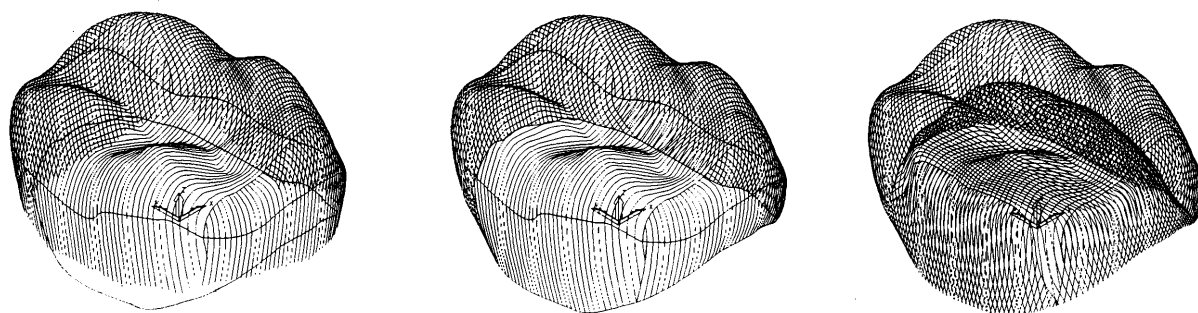


図 13. 外冠形態のマージンラインへの合わせ込み

図 14. CAD によるクラウン設計の完了

るという結果が得られたが、標準的なクラウンモデルとして各種の特徴的なモデルを複数、事前登録しデータベースを充実することにより各種臨床例に対応が可能になると考える。また今回の完成したクラウンモデルでは支台歯は測定データをそのまま使用しているが、臨床応用の場合はセメント層分のクリアランスを考慮しなければならない。CAD上でのオフセット処理により容易に対応は可能である。

結 論

1. 3次元測定

本実験結果から、歯冠形態のような全周にわたり計測が必要な被測定物の場合、2方向3分割スキャン方式を採用することによって測定機械精度を十分に引き出し得る可能性が示唆された。しかし本方式の測定精度は装置の機械精度に依存している。今回、我々が使用した3次元測定機はレーザ式非接触タイプで機械精度は $\pm 25 \mu\text{m}$ であったが、小サイズの被測定物対象の測定機として、より高精度な専用機の開発が必要である。

また、現状技術でもっと高精度を求めるならば接触式の測定という手段もあるが、測定時間が非常に長いという欠点がある。クラウン設計にあたってはマージンライン部にもっと高精度を求めたいのであるが、非接触式タイプではより高精度に、接触式タイプではより高速に測定技術レベルの向上が待たれるところである。

2. クラウンの設計

在来法である石膏の支台歯模型上に適合するクラウンを手作業で製作することなく、一般的な歯冠形態をCAD上のデータベースに登録しこれを用いて支台歯に合ったクラウンをCAD上で流用設計が可能であることが確認できた。

クラウンのCAD設計にあたって、CAD上のモデルとして支台歯形態を忠実に再現することが重要であり、このためには被測定物である支台歯模型を高精度で製作することが必要である。

総 括

歯科補綴物製作加工法としてCAD/CAM技術を導入し、機械加工を検討するための最も重要な工程であるCAD上でのデータ作成に関して次の内容が確認できた。

①歯冠形態の3次元測定手法として2方向3分割スキ

ャン方式により測定機械精度を十分に引き出した高精度の測定結果が得られた。

②データベースに登録した一般的な歯冠形態を任意の支台歯上でCADによる流用設計をおこなうことができた。

また同様に他の各種歯科補綴物をCAD上で設計することも可能であり、次の利点が考えられる。

- ・モデルデータをコンピュータ上で容易に保存、管理できる。
- ・モデルの各部位を正確な数値で表現できる。
- ・設計手順の明確化、システム化により高精度のモデルを安定して作成できる。
- ・コンピュータ上で他のソフトウェアへのデータ授受が可能なことから多岐に亘る利用用途が期待できる。

CAD上に数値データとして保存が可能となったクラウンデータの今後の展開としては、加工分野へはCAMソフトウェアを介して光造形加工、3次元NCフライス加工、NC放電加工により造形物の製作が可能であり、CAEソフトウェアを介して各種解析、シュミレーション等の演算処理が可能である。

補綴物のCAD/CAMによる製作法を研究しているグループは多数あり、最終の目標として全ての工程でオートメーション化を目指している傾向もあるようであるが、全自動化、特に設計の工程での自動化は不可能であると考ええる。一般工業界でのCADの役割もデザイナーや設計者の能力を引き出すための、設計を行なう1つのツールに過ぎない。我々はこの考え方が基本であると考えており、歯科界のCAD/CAMについても歯科技工士の能力を引き出すためのツールとして発展させてゆきたいと考えている。

本稿の要旨は第17回日本歯科技工学会（平成7年東京）、第18回日本歯科技工学会（平成8年広島）にて口演発表した。

文 献

- 1) Rekow, E. D. : Computer-aided design and manufacturing in dentistry, *J. Prosthet. Dent.*, 58 : 512-516, 1987.
- 2) Duret, F., Blouin, J., and Duret, B. : CAD/CAM in dentistry, *J. Am. Dent. Assoc.*, 117 : 715-720, 1988.
- 3) Mörmann, W. H. and Brandestini, M. : Die CEREC Computer Reconstruction - Inlays, Onlays und Veneer -, *Quintessenz*. Verlags-GmbH, Berlin, 1989.

- 4) 岡田周策, 藤田忠寛: 摩耗の三次元計測システムの開発—計測データの重ね合わせによる定量化—, 歯材器, **13**(5): 467-474, 1994.
- 5) 堀田康弘: CAD/CAM を利用したチタン製コーピングの新しい製作法の開発, 歯材器, **11**(1): 169-178, 1992.
- 6) 宇野智子, 春日敏宏, 堤 定美: CAD/CAM 用結晶化ガラスの開発, 歯材器, **11**(6): 934-939, 1992.
- 7) 川中正雄: CAD/CAM によるクラウンの作製, 歯材器, **10**(5): 660-664, 1991.
- 8) 仁科匡生, 町田宏夫, 原田宏造, 臼田雅彦, 太田 学, 勝田真弘: 歯科技工におけるコンピュータ NC 機械加工 —省力化と高品質均一化による新しき技工—, QDT, **22**(10): 22-38, 1997.
- 9) 荘村泰治, 高橋純造: CAD/CAM 法による歯科補綴物の製作—クラウンの製作について—, QDT, **21**(1): 17-26, 1996.
- 10) 前田芳信, 山田道生, 野首孝祠, 浦出哲夫, 堤 定美: DCS CAD/CAM システム「Precident」の臨床応用バリエーション, QDT, **20**(4): 67-78, 1995.
- 11) 宮崎 隆, 堀田康弘, 李 元植, 小林幸隆, 藤原稔久, 小泉英治朗, 福永秀樹, 川和忠治: CAD/CAM を利用した歯冠修復物の自動製作へのアプローチ, QDT, **20**(11): 15-28, 1995.
- 12) 内山洋一: CAD/CAM 応用の現状, 歯科技工, **23**(7): 816-822, 1995.
- 13) 堤 定美: CAD/CAM システムの歯科応用, 歯科技工, **21**(10): 1044-1051, 1993.
- 14) 荘村泰治, 高橋純造: 歯科補綴物の CAD/CAM 製作法—クラウンの CAM による製作—, 歯材器, **13**(1): 61-66, 1994.
- 15) 木村 博, 荘村泰治: 歯形状の三次元計測 (第 10 報) —隣接歯とのコンタクトを考慮した CAD について—, 歯材器, **10**(6): 773-778, 1991.