歯科補綴物作成支援システムの開発 (第4報)

— 歯冠加工用CAMシステムの開発 —

河 合 正 治**

石 井 義 則***

Development of Computer Assisted Systems for Manufacturing Dental Prosthetic (4th Report)

— Development of Crown CAM System —

Masaharu KAWAI and Yoshinori ISHII

The system for manufacturing dental crown has been developed by applying CAD/CAM technology, to attain stable and sufficient supply of prosthetic teeth, which will be serious social requirement in the 21st century. This report describes CAM system consisting of CAM software that tool path can be made automatically and 5-axis control NC machining center. Standard procedure with single supporting work is also proposed, and this procedure about 60 minutes processing time is realized.

Key words: dental prosthetic, CAM system, NC processing

1. 緒 言

義歯・歯科補綴物作成の高精度均質化、及び作業時間の短縮化を図るために CAD/CAM 技術を用いた歯科補綴物作成支援システムを開発した。本システムは、1) 歯科用計測機、2) CAD/CAM ソフトウェア、3) 歯冠加工用加工機から構成される。^{1)~3)} 本報では歯冠設計 CAD で設計された種々の歯冠形状データから加工仕上がり形状設計を行い、自動的に加工用データを作成する歯冠加工用 CAM ソフトウェア、及び歯冠加工専用に開発した5軸制御 NC 加工機からなる歯冠加工用 CAM システムについて報告する。

従来、歯科補綴物は歯科技工士がロストワックス法により作製している。以下に従来法の手順を示す。

- 1) 歯科医が齶蝕部を除去し、形成した支台歯と両隣在歯、対合歯の印象を取り、作業用の石膏模型を作製する。
- 2) 歯科医が除去した支台歯の欠損部に溶かしたワックスを盛り上げて目的の歯冠(crown)を作製する。
- 3) 耐熱の埋没材の中に作製したワックスを入れ固めた後、ワックスを焼却する。
- 4) できた空隙に溶融した金属を流し込み铸造する。
- 5) 調整、研磨を行い完成する。

本システムでは2), 3), 4)の手順を CAD/CAM 技術に置き換えることを目的とした。これにより作業者の経験等によるばらつきを低減し、あらかじめ調質されたブロックから切削加工を行うことにより、铸造欠陥を無くすることができる。本システムの加工対象は、純チタン、コンポジットレジン及びセラミックとした。純チタンは生体親和性が高く、金属アレルギー等の影響が少ないとの理由から歯科用金属として期待されているが、高融点で酸化性が高いことから铸造が困難であった。またコンポジットレジン及びセラミックは天然歯に近い色調が出せることで審美性は高いが、もろく欠けやすいため単体で歯冠を作製することは困難であった。コンポジットレジンとは樹脂基材の中にフィラーを高密度で充てんした歯科用材料である。

本システムでは、用意された作業用石膏模型を歯科用計測機にセットし、支台歯及びその周囲形状(両隣在歯、対合歯)を三次元計測する。第3報で報告したが、歯科用計測機はレーザースポット型の変位計を用いた非接触型計測機であり、高速に形状測定が可能である。

計測されたデータは第2報で報告した CAD システムに送られ、そこで目的の歯冠を設計する。設計作業は、あらかじめデータベースに登録してある標準モデルを呼び出し、測定した周囲形状に合わせて変形を行い、歯冠形状を設計する。

設計された歯冠モデルは加工用 CAM システムに送られ、そこで加工形状の設計を行い、その後自動的に加工用データが作成される。作成された加工用データは歯冠加工用に開発した5軸制御 NC 加工機に送られ加工を行う。

2. 歯冠用CAMシステム

開発した CAM システムは、個々の異なる形状を持った歯冠モデルを対象に対話式に最終加工形状を決定する機能と最終加工形状をもとに自動的に加工用データを作成する機能を持つ CAM ソフトウェアと歯冠加工用5軸制御 NC 加工機からなる。

2.1 標準加工手順の設定

歯冠形状は自由曲面の集合で、かつ個々に形状が異なるため、それ自身には加工基準の設定が困難である。また、能率的な歯冠の作成を行うためには、一度の素材チャックで歯冠全面を加工する必要がある。そこで歯冠形状が変化しても形状の変化のない素材シャンク部を加工基準として定め、加工終了まで素材シャンク部を把持し続けることで基準変化のない、精度の高い加工が可能となる。また、段取り変え等の作業が不必要となるため作業者の負担が減少し、作業者拘束時間も減少する。上記方法を実現するため、片持ち加工で基準変化がおきずに歯冠全体が加工可能な標準加工手順を定めた。図1に片持ち加工に使用する素材形状を示す。

歯冠形状は個々に異なるが、全体的にはマージンライン(marginal line)で分割され、支台歯(abutment tooth)に接する内形とその他の部分で構成される外形とに分類される特徴が存在する。マージンラインとは歯冠開口部の下縁のことをいい、歯冠を支台歯に適合させたときの境界部となる。図2に支台歯

* 原稿受付 平成 11 年 2 月 5 日

** 正 会 員 (株) ニコン (東京都品川区西大井 1-6-3)

*** (株) ニコン

と歯冠のモデル図を示す。そこで標準加工手順では、内形と外形を別々に加工する手順を設定した。これにより個々に異なる歯冠形状に対しても自動的に工具経路が作成可能となる。

Fig.1 Material configuration

Fig.2 Crown and abutment tooth

歯冠作成用に設定した標準加工手順は全16手順とした。図3に設定した標準加工手順を示す。

Fig.3 Diagram of standard work procedure

作業1では内形側に下穴をあけ、作業2で内形側、作業3で咬合面(occlusal surface)を粗加工する。作業4でマージンライン側外形を中仕上げ加工し、作業5でマージンラインを

三次元的に加工する。作業6、7で内形の中仕上げ加工を行い、作業8～12で外形の中仕上げ加工を行う。その後、さらに細径工具でマージンラインの仕上げ加工(作業13)を行い、作業14、15で内形の仕上げ加工を行う。最後に咬合面の仕上げ加工を行い(作業16)、細かな溝等を付与して加工終了となる。

外形側面加工(external sidewall medium finishing)時、モデル先端(far side)と片持ち支持部付近(supporting side)で手順を分割し、加工精度の低下と片持ち支持部の破折を防ぐために、切削抵抗によるモーメントが大きくかかる先端部の加工を片持ち支持部付近の加工前に終了させるように設定した。

2.2 標準加工手順をベースとしたCAMソフトウェア

開発したソフトウェアは、標準加工手順をもとに作成され、加工形状設計、工具経路作成、NCデータ作成、NCデータ編集、加工機との通信の5ステップからなる。図4に処理フローを示す。

Fig.4 Data processing flow

ステップ1では、CADシステムで設計された歯冠モデルを基に、作業者はコンピュータ画面上で片持ち加工時の支持部を付加した加工仕上がり形状の設計(designing work shape)を行う。この加工仕上がり形状設計から標準加工手順の各手順ごとの工具経路作成で使用される形状データ(configuration data)が自動的に作成される。ステップ2では各手順ごとの形状データをもとに作業設計プログラム(work design program)が起動され、工具経路計算(calculation tool path)、工具経路編集(editing tool path)が行われ工具経路(tool path data)が作

成される。ステップ3では、そのデータをもとに加工条件生成プログラム(working condition generating program)が起動され加工条件が付加された CL データが内部的に出力される。CL データはポストプロセッサで NC データに変換される。ステップ2及びステップ3は各標準加工手順に対応してそれぞれ行われる。ステップ4では各手順ごとの NC データを集積(editing NC data)して、素材姿勢制御データ、工具交換データ等が付加され、1本の NC データ(edited NC data)に編集される。ステップ5では、1本に編集された NC データが加工機へ送信(data transfer to machining center)され、加工が開始される。

システムを効率的に利用するためにステップ2、ステップ3及びステップ4はコンピュータのバックグラウンドで処理される。フォアグラウンドでは別の歯冠設計等が可能となるため、効率的な作業が可能となる。

本ソフトウェアの工具経路計算部、ポストプロセッサは日本ユニシス社製三次元自由曲面加工用ソフトウェア SCULPTOR をもとに作成した。

2.2.1 加工仕上がり形状設計

加工仕上がり形状設計の各機能を説明する。

①アングカッタ形状の確認と姿勢の修正機能

設計された歯冠モデルの内形を加工する場合、Z 軸と平行に付けられた加工機スピンドルから見てアングカッタ部が存在すると削り残しとなる。そこで内形の各パッチの法線と Z 軸とのなす角を計算し、アングカッタとなる部分を画面上に表示し、確認を行う。また、加工形状全体の姿勢の制御を行いアングカッタ形状を修正する。

②片持ち支持部の付加機能

設計された歯冠モデルに加工時に必要となる支持部の取付けを行う。支持部は歯冠外形の任意の位置に取付けられる。

③加工形状と素材形状のマッチング機能

設計された歯冠モデルと加工機にセットされた素材との原点を一致させ、内包関係をチェックする。

2.2.2 工具経路作成

(1) 作業設計プログラム

作業設計プログラムは各手順で加工対象となる形状データ、材料寸法、使用工具形状、送り量、加工タイプ、作成する工具経路のファイル名、ディレクトリ名等を指示する。各手順ごとに作成してあり、このプログラムを起動することにより経路計算が行われ工具経路が作成される。

(2) 加工タイプ

本システムで使用される加工タイプは以下のものがある。

- ・ 等高経路 : Z 値を変化させずに加工を行う工具経路。
- ・ SCAN 型経路 : 決められた範囲内を一定方向に加工を行う経路。本システムでは往復経路を作成する。
- ・ SPIRAL 型経路 : 加工軸直交平面に対し渦巻き型となる経路。
- ・ 面扱い経路 : 矩形の加工対象面の対合する境界線間を等分割するように結ぶ工具経路

(3) 工具経路編集

切削時の工具負荷を低減するため、あらかじめ決められた手順の工具経路に編集を行う。経路編集機能には次のようなものがある。

①過切込み回避機能

等高線切削の場合、アングカッタ部分の削り込みを防ぐために Z+方向から n 番目と $n+1$ 番目の輪郭経路を比較し、

必ず n 番目の方が大きいまたは等しくなるように輪郭経路を修正する。

②経路延長機能

素材中に加工開始点が存在しないように第1経路を延長し、素材の外に加工開始点を設定する。

③支持部干渉回避機能

マージンラインを含む外形加工時、片持ち支持部を削り込む工具経路となる場合がある。工具が支持部と干渉する部分を回避する工具経路に自動的に置き換える。

2.2.3 NCデータ作成

(1) 加工条件生成プログラム

加工条件生成プログラムは各標準加工手順ごとに、使用工具経路、工具アプローチ方法、加工条件等を指示する。このプログラムを起動することにより CL データの作成が行われる。

(2) NC データ作成

各手順の CL データはポストプロセッサにより加工機制御用の NC データに変換される。

これらの処理を各手順ごとに順次行い、全手順分の NC データを作成する。

2.2.4 NCデータ編集

各手順ごとに作成された NC データ間に素材姿勢制御データ、自動工具交換装置の工具交換データ等を挿入し、全手順分の NC データを1本の NC データに編集する。

2.2.5 加工機への通信

1本に編集された NC データをもとに、コンピュータと加工機との間でデータの送受信を繰り返し加工を行う。

2.3 歯冠加工用5軸制御NC加工機

歯冠加工には専用に開発された歯冠加工用5軸制御 NC 加工機(日立精工社製)を使用した。図5に使用した5軸制御 NC 加工機の写真を示す。制御軸はスピンドル側に X, Y, Z の3軸、ワーク側に X 軸周りに回転する A 軸、Y 軸周りに回転する B 軸の2軸を割り当てている。制御装置(control unit)には FANUC16MB を使用している。また、スピンドルは金属(純チタン)とコンポジットレジン及びセラミックが削れる仕様とした。自動工具交換装置(auto tool changer), 工具長補正機能(correcting of tool length function)を有し、15本までの工具を装備することができる。加工機の仕様を表1に示す。

Fig.5 Photograph of 5-axis control NC machining center

Table 1 Specification of machining center

Spindle	Rotational speed	10000-60000rpm
	Power	0.08-0.54kW
Work area	X	50mm
	Y	50mm
	Z	80mm
	A	360°
	B	+45°-90°
Feed rate	X,Y,Z	500mm/min
	A,B	10rpm
Attached function		Auto tool changer
		Correcting of tool length function
Control unit		FANUC-16MB
	Concurrency control	Liner interpolation(3-axis)
	axis number	Circular interpolation(2-axis)

3. 加工仕上がり形状の設計例

本システムの CAM ソフトウェアでは作業者が画面上で指示しながら次の手順で必要な加工仕上がり形状を設計する。

- ① CAD で設計した加工対象となるモデルを選択する。
- ② アンダカット確認と姿勢の修正作業を行う。アンダカット部を表示後、視線方向を切り替えながら画面に対して垂直な軸でモデル座標の回転を行い、アンダカット部が消えるようにモデルの姿勢を修正する。アンダカット部の表示と姿勢修正画面の例を図6に示す。
- ③ 歯冠モデルに片持ち支持部を付加する。XY 平面上で円周方向の位置を決定し、その位置での Z 方向の高さを決定する。支持部は円筒形で、直径は剛性を考慮して、純チタン用で 3 mm、コンポジットレジン、セラミック用で 4 mm としているが、直径の変更も可能である。図7に支持部を付加した歯冠モデルの例を示す。
- ④ 加工形状と素材形状とのマッチングを行う。加工機にセットした素材と歯冠モデルの原点が一致するようにモデル座標が自動的に変換され、同時に素材と歯冠モデルの内包関係がチェックされる。干渉部分がある場合、警告メッセージが出力され、一回り大きなサイズの素材を選択するように指示される。加工形状と素材形状のマッチングの例を図8に示す。
- ⑤ 粗加工形状の初期値を計算する。XZ 座標で見た内形内に計算開始点を設定すると自動的に粗加工時の下穴到達点が計算される。
- ⑥ 設計された加工形状に基づき各手順ごとの形状データ、工具経路、NC データが自動作成され、その後1つの NC データに編集される。図9に作成された NC データの一例を示す。
- ⑦ 編集された NC データをもとに加工機とコンピュータ間で通信を行う。加工機には④で決められた素材をセットして加工開始する。

4. 加工

歯冠を口腔内にセットする場合、表面は洗浄性と審美性の要求により滑沢に研磨する必要がある。本システムでは生産性を考慮し、研磨工程は歯科技工士に委ねている。その研磨代を以下のように決定し、この値を作業設計プログラムに登録し、工具経路をオフセットすることとした。

Fig.6 Indication and minimization of undercut area by attitude modification

Fig.7 Crown model with supporting bar

Fig.8 Examination of matching between designed crown and work material

Fig.9 Representation of NC data

まず加工対象素材である純チタン J I S 2 種の板材を平面切削した。それを歯科技工士に依頼して実際と同様の方法で 10 枚研磨し、研磨前と研磨後の厚さを測定した。厚さの減少量の平均値は $20\mu\text{m}$ となった。また、実際に本システムを使用して歯冠を作製し、各部位の面粗さを測定した。図 10 に測定した結果を示す。縦軸は粗さ量で、中心線平均粗さ (Ra)、十点平均粗さ (Rz)、最大高さ粗さ (Rmax) それぞれを表示する。パラメータは測定部位である。咬合面 (occlusal) の一部及び舌側 (lingual) が他の部位に比べ粗くなっているが、どちらも SCAN 型経路で加工を行ったため、面の角度が急峻な部分は実質的な送り量が大きくなり、面が粗く加工されてしまったと考えられる。2 つの測定結果より平均研磨代を $20\mu\text{m}$ とした。

Fig.10 Measurement of surface roughness

Fig.11 Titanium work material and worked crown

次に、本システムを用いて実際に歯冠を加工した。素材は J I S 2 種純チタンブロックとし、加工工具は $\phi 2.5\text{mm}$ ハイスドリル、 $\phi 2.0\text{mm}$ 超硬 C コートフラットエンドミル、 $\phi 3.0\text{mm}$ 、 $\phi 2.0\text{mm}$ 、 $\phi 1.0\text{mm}$ 超硬 C コートボールエンドミル (すべて日立ツール社製) の計 5 本を使用した。切削方式は水溶性切削液 (Castrol 社製 JC-707) を使用した湿式とした。加工対象部位は

歯牙の中で最も大きいとされる下顎第 1 大臼歯とした。図 11 に使用した純チタン素材と加工終了後の歯冠を示す。

上記加工に要した加工時間は 1 時間 1 分 13 秒であった。加工時間は歯冠の表面積に比例すると考えられるので、今回加工した最大レベルの歯で加工時間は 60 分をわずかに越える程度であったため、すべての歯で平均すれば加工時間は平均 60 分以内に抑えられると考えられる。従来法であるロストワックス法では歯冠 1 個当たりの作成時間は約 60 分であるため、従来と同等の生産が可能となる。

5. ま と め

将来、需要の増大が予想される歯科補綴物の製作において、従来法に置き換わる作成方法として CAD/CAM 技術を応用した歯科補綴物作成支援システムの開発を行った。本研究ではその要素である歯冠加工用 CAM システムの開発を行った。以下にその結果をまとめる。

- (1) 基準のない自由曲面の集合である歯冠形状に対し、加工基準を素材シャンクに設定する手順を提案した。
- (2) 設定した加工基準に変動が生じないよう一度の素材チャックで歯冠全体を加工できる片持ち加工と 5 軸制御 NC 加工機を採用した。
- (3) 個々に異なる形状の歯冠に対して、片持ち加工で効率的な加工が実現できる標準加工手順を提案した。
- (4) 加工形状設定後の自動的な加工用データ作成を実現した。
- (5) 歯牙の中で最も大きいとされる下顎第 1 大臼歯の歯冠を従来法と同程度の加工時間 (約 60 分) で加工可能となった。

なお、本研究は通産省産業科学技術研究開発制度に基づく医療福祉機器技術研究開発プロジェクトとして、NEDO の委託により、(株) ニコン、日立精工 (株)、(株) ジーシーの 3 社共同で実施したものである。

参 考 文 献

- 1) 河合正治, 馬場真佐美: 歯科補綴物作成支援システムの開発 (第 1 報) — 生体形状モデラの開発とクラウン設計システム —, 精密工学会誌, **64**, 11 (1998) 1603.
- 2) 河合正治, 馬場真佐美: 歯科補綴物作成支援システムの開発 (第 2 報) — 歯冠設計システムの開発 —, 精密工学会誌, **65**, 2 (1999) 255.
- 3) 河合正治, 角田久常: 歯科補綴物作成支援システムの開発 (第 3 報) — 歯科用計測機の開発 —, 精密工学会誌, **65**, 5 (1999) 741.