

CG 技術を利用した CAM の開発

Development of Computer Aided Manufacturing using Computer Graphics Technology

平岡忠志*, 森本巖*

Tadashi Hiraoka and Iwao Morimoto

抄 録

模型などのデジタルデータがない現物から測定データを得て機械加工するためには、点群などの測定データから NC (Numerical Control) プログラムを作成しなければならない。市販 CAM ソフトで NC プログラムを作成するには、測定データを曲面化しなければならない。面張り作業には高度な知識が必要であるし、曲面間の連続が保てないなどの問題がある。そこで三角形メッシュから NC プログラムを直接生成する CAM ソフトを開発した。工具経路算出法には逆オフセット法を用いた。また、三角形メッシュのカクカクとした折れを平滑化するため、Modified Butterfly 法を実装した。本ソフトで生成可能な工具経路は走査線、等高線、荒取りの 3 種類である。使用可能工具はフラットエンドミル、ボールエンドミルの 2 種類である。入力 STL (Stereo Lithography) ファイル、出力は NC ファイルである。

1 はじめに

人の手により修正された金型や模型などのデジタルデータがない現物から測定データを得て機械加工するためには、測定データから NC (Numerical Control) プログラムを作成する必要がある。測定データから NC プログラムを作成する手順は、

- ①測定点群、三角形メッシュの整形
- ②三角形メッシュの曲面化
- ③曲面から工具経路・NC プログラムを生成

が一般的である。

三角形メッシュを曲面化する作業には様々な問題がある。領域分けをどこでするかはっきりしない、曲面間の連続が保てない、異なるソフト間で曲面データを交換すると曲面が欠落したり、曲面間に隙間が発生したりすることである。また、曲面化に費やす時間は、品質によって、数時間～数週間となる。

本報で開発する CAM ソフトでは、三角形メッシュを曲面化せずに、三角形メッシュから工具経路を直接生成し、その後に NC プログラムに変換する。また、三角形メッシュ特有のカクカクとした折れた形状が加工物に出現することを防止するため、細分化により三角形メッシュを平滑化する機能を付加する。このように、本ソフトでは、測定データから NC プログラムを作成する手順②③をカバーする。本ソ

フトを利用する利点は、曲面を扱う必要がなくなるため、曲面に関する高度な知識が必要ないこと、曲面間の連続が保てないなどの問題がなくなること、曲面化に費やす時間は全く必要ないことである。また、本ソフトは、曲面やソリッドなどの CAD データから三角形メッシュを表現する STL (Stereo Lithography) データを生成することで、CAD データから工具経路を生成することもできる。

2 方法

本報において三角形メッシュから NC プログラムを算出する手順は、三角形メッシュの平滑化、平滑化された三角形メッシュから工具経路を算出、工具経路を NC プログラムに変換、となる。このうち、平滑化方法と工具経路算出方法については以下で詳細に説明する。工具経路を対象工作機械用の NC プログラムに変換することは容易だが、複数の工作機械に対応することは難しい。まずは当センターのマシニングセンタ MD-45VA (オークマ (株)) に対応した NC プログラムを生成するプログラムを作成する。

本ソフトの仕様として、入力データは STL ファイル、出力データは NC ファイルとする。Windows OS 上で GUI (Graphical User Interface) で動作するソフトを開発するためには、マイクロソフト社から提供されている Windows API (Application Programming

*電子機械課

Interface) を用いる必要があるが、本ソフトではそのラッパークラスである .NET Framework を利用する。開発環境は Visual Studio 2005 で、C# 言語を用いる。また、3 次元の物体表示、工具経路計算にグラフィックチップを利用する。そのために、CsGL (C# Graphics Library) という OpenGL (Graphics Library) をラップしたソフトウェア部品を用いる。

2・1 三角形メッシュの平滑化方法

三角形メッシュ特有のカクカクとした折れた形状を滑らかにするために、メッシュを細分化して平滑化する。三角形メッシュの細分化には形状が縮小する近似法と縮小しない補間法がある。本ソフトでは補間法である MB (Modified Butterfly) 法¹⁾を利用する。

MB 法を利用するためには、三角形メッシュのある頂点周りの頂点を全て列挙する必要がある。三角形メッシュに HE (Half Edge) という位相情報を付加する。HE 構造は、頂点、稜線、面、HE からなる。1 つの面は 3 つの HE を持つ。頂点には XYZ 座標値と HE へのポインタ、稜線には HE へのポインタ、面には法線ベクトルの XYZ 座標値と HE へのポインタ、HE には頂点・稜線・面・隣の HE・次の HE・前の HE へのポインタの情報が保持される (図 1)。HE を辿ることにより、ある頂点周りの頂点を素早く列挙することができる。

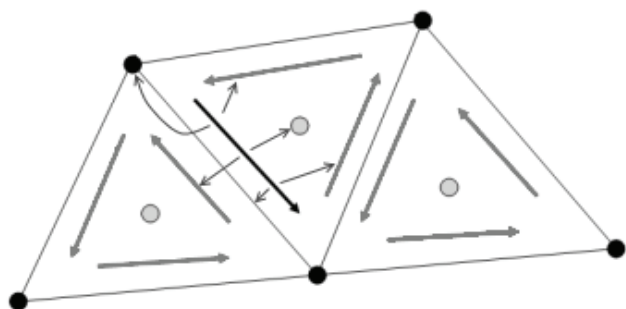


図1 ハーフエッジ構造

1 つの HE が保持する情報を細矢印で表示

MB 法では 1 回の処理で 1 つの三角形を 4 つの三角形に分割する。つまり、各稜線に 1 つの頂点を挿入している。新たに加える頂点の位置は、2 つに場合分けされる。1 つは稜線の両端点が正則 ($K=6$) の場合、もう 1 つは 1 方もしくは両端点が正則でない場合である。頂点に接続する稜線数 K が 6 のとき

を正則という。両端点が正則の場合は図 2 の左の型を用いる。その重みは、

$$a = 1/2 - w, b = 1/8 + 2w, c = -1/16 - w, d = w$$

として与えられる。ただし、 w は小さい値を適当に選ぶ。一方もしくは両端点が正則でない場合には、図 2 の右の型を利用する。その重みは

$$s_j = (1/4 + \cos(2\pi j / K) + 1/2\cos(4\pi j / K)) / K$$

として与えられる ($K \geq 5, j=0, \dots, K-1$)。 $K=3$ のときは $s_0 = 5/12, s_{1,2} = -1/12$ とし、 $K=4$ のときは $s_0 = 3/8, s_2 = -1/8, s_{1,3} = 0$ とする。これらの重みと対応する頂点座標を掛け、足し合わせれば新たな頂点が計算できる。

また、穴の空いた境界を含む三角形メッシュに対しては、1-dimensional 4 point scheme²⁾を利用する (図 3)。重みは $s_{-1} = -1/16, s_0 = 9/16, s_1 = 9/16, s_2 = -1/16$ に設定する。これらの重みと対応する頂点座標を掛け、足し合わせて、新たな頂点を算出する。

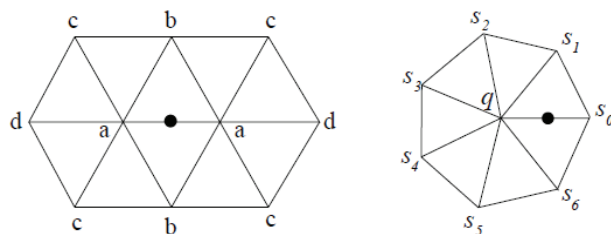


図2 重み付けのための型。1) より引用

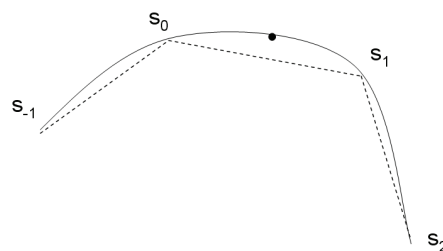


図3 1-dimensional 4 point scheme

2・2 工具経路算出方法

BE (ボールエンドミル) と FL (フラットエンドミル) の工具中心点を図 4 に示す。求めたい工具経路は、加工対象物に工具を沿わしたときの、工具中心点が辿った経路である。

工具経路の計算方法は、工具中心点の包絡面を求めてから工具経路を算出するオフセット法と包絡面を求めずに工具経路を算出する非オフセット法がある。非オフセット法には、工具と製品の干渉をチェ

ックしながら工具経路を算出する接触法がある³⁾。

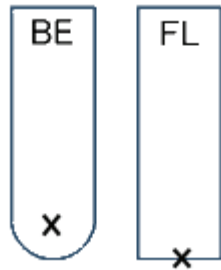


図4 ×印の箇所が工具中心点

本報では、GPU (Graphics Processing Unit) を利用した逆オフセット法というオフセット法の一つを用いて工具経路を算出する⁴⁾。逆オフセット法とは、逆転工具の中心点を対象形状に沿わしたときに生成される包絡面 (オフセット形状) を算出することで工具経路を得る方法である (図5)。逆オフセット法では、格子状に等間隔に配置されたピクセルに高さ情報 (Z 座標値) が格納された Z マップモデルを用いる。Z マップモデルはオフセット形状を示す。

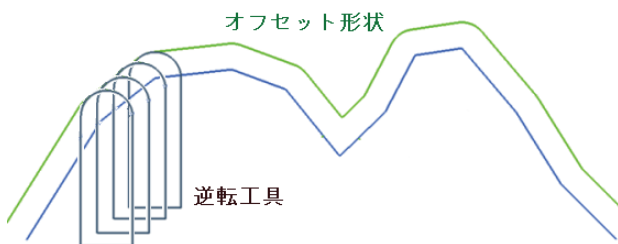


図5 逆オフセット法

逆オフセット法によるオフセット形状の計算手順は次のとおりである。まず、各ピクセルの Z 値を 0 に初期化する。次に、加工対象物表面の任意の位置を工具中心点とした逆転工具を描画し、各ピクセルの Z 値を更新する。別の位置で逆転工具を描画し、今描画した逆転工具の Z 値がそれまでの Z 値より大きいピクセルのみ更新する。この Z 値更新処理を繰り返すことで離散的なオフセット形状が得られる (図6)。

GPU の演算性能は CPU の演算性能を大きく上回っているため、逆オフセット法に GPU の機能を利用することで、処理の高速化が可能になる⁴⁾。GPU は、格子状に配置されたピクセルに高さ (Z バッファ) 情報が格納されたデータ構造を持つ。このデータ構造は Z マップモデルと同等である。GPU は高さ

情報を用いて Z バッファ法という隠面消去処理を実行する。これは Z 値更新処理と同等である。さらに、逆転工具の描画ができれば、逆オフセット法が GPU で実行可能である。

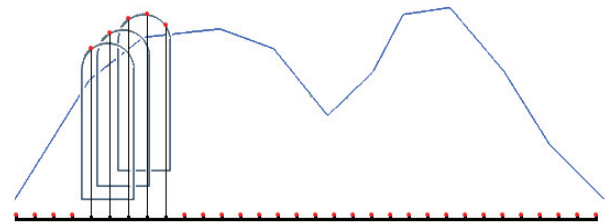


図6 Z マップモデルと逆オフセット法

逆転工具の描画は、次のように行う。BE の場合、三角形メッシュの頂点を球に置換し、稜線を円柱に置換し、面をオフセットする (図7)。球や円柱の半径、オフセット量は工具半径に等しい。FL の場合、頂点を円板に置換し、稜線を斜円柱に置換し、面をオフセットする。このように置換形状を描画することで逆転工具の包絡面を描画できる。

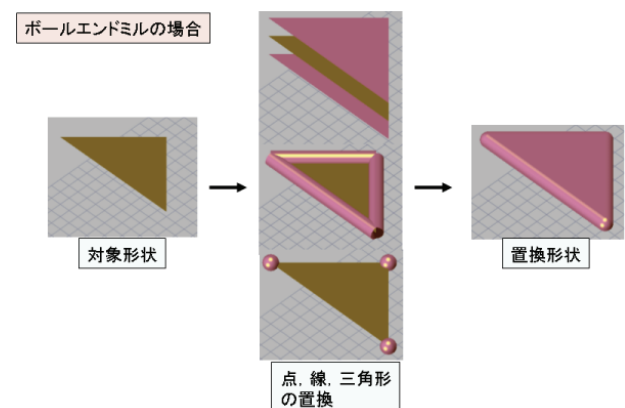


図7 置換形状の描画

以上の方法で離散的なオフセット形状 (Z マップモデル) が得られる。次に、オフセット形状を基に工具経路を算出する。本ソフトで扱う工具経路の種類は、走査線、等高線、荒取りの3種類である。

走査線工具経路は、Z マップモデルの各ピクセルを図8のように順に繋ぐことで算出する。加工領域の範囲を指定する場合は、ピクセルごとに範囲内か範囲外かの情報を格納し、範囲内のピクセルのみ繋いでいけばよい。

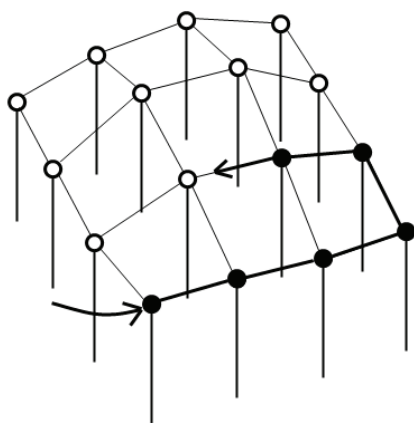


図 8 走査線工具経路の計算方法

等高線工具経路は、図 9 のように、Z マップモデルから四辺形のメッシュを作成し、そのメッシュと任意の Z 座標値の XY 平面との交点を求めることで算出する。

荒取り工具経路は、等高線工具経路計算方法を応用することで算出する。実際に用いる工具よりも大きな工具半径で等高線工具経路を算出する。工具半径を徐々に小さくし等高線工具経路を算出する。それらの等高線工具経路を繋ぐことで、荒取り工具経路が算出できる。

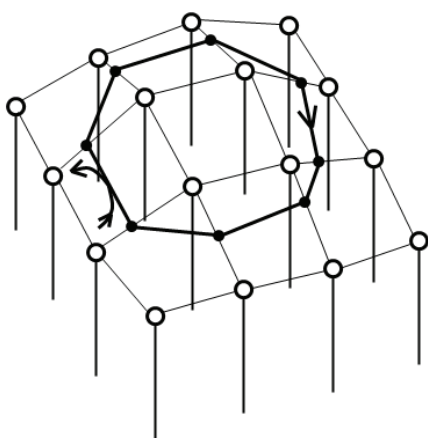


図 9 等高線工具経路の計算方法

Z マップモデルの各ピクセルの Z 値はかなり正確な値であるが、そのピクセル間は線形補間されるため、ピクセル間に大きな誤差が発生する場合がある。図 10 左図では、Z マップモデルを算出した後、線形補間により走査線工具経路を算出している。この場合凹部に大きな誤差が発生するので、各ピクセルの法線ベクトルを用いて工具経路の高精度化を図る（図 10 右図）。

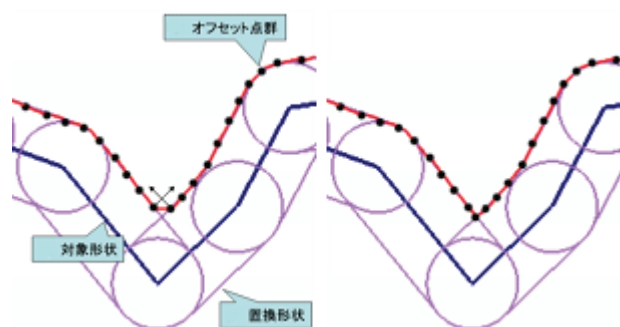


図 10 工具経路の高精度化

各ピクセルの法線ベクトル決定には GPU の色情報を利用する⁵⁾。三角形メッシュの各面に色で ID を付加する。本ソフトで扱う三角形メッシュは 100 万面程度が限界であるが、GPU 上での色は 32bit ($2^{32}=4,294,967,296$) で表現されるため、各面に ID を与えるには十分である。三角形メッシュの各面に色を与えて描画すると、GPU は各ピクセルごとに Z バッファ法により色情報を更新する。ピクセルの色から対応する三角形メッシュの面を決定し、法線ベクトルを算出する。

3 結果と考察

本ソフトの概観を図 11 に示す。ウィンドウの上部に命令実行や値設定を行うダイアログを呼び出すメニューバー、中央部に加工対象物や工具経路を表示するパネル、下部に状態を表示するステータスバーを配置した。パネルではマウスやキーボードによる回転・拡大縮小・平行移動の処理や頂点選択などのピッキング処理が可能である。

図 11 のパネルに表示されている加工対象物は、手彫りされた菊の葉の金型を、コニカミノルタセンシング（株）の VIVID910 という非接触 3 次元デジタル計測機で測定し、INUS Technology Inc. の Rapid Form 2004 という形状処理ソフトで三角形メッシュ化したものである。また、工具経路は本ソフトで生成したものである。

三角形メッシュの平滑化結果、工具経路算出結果は以下で詳細に説明する。工具経路から NC プログラムに変換する処理は、メニューバーから呼び出すダイアログで行う。切削速度などを設定し、NC 出力のボタンを押すと、NC プログラムが生成される。また、加工長や加工時間を算出する機能も付加した。

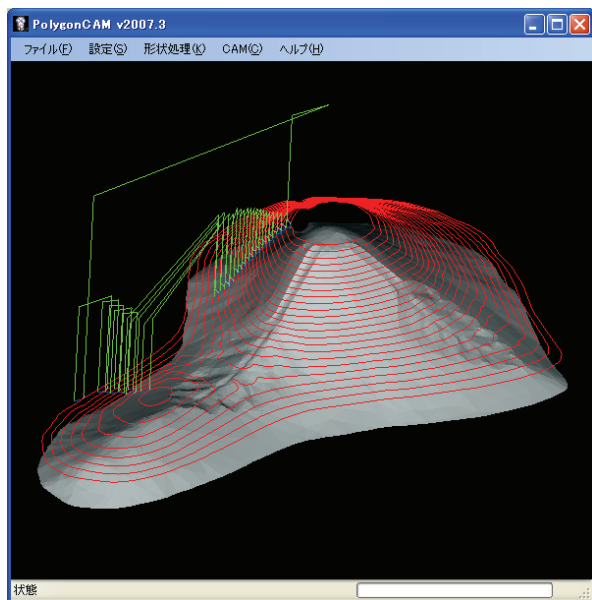


図 11 開発した CAM ソフトの概観

3・1 三角形メッシュの平滑化結果

STL ファイルには位相情報が無いので，STL ファイル入力後に位相構造を構築する処理を実装した．100 万点（面数は 200 万）の STL ファイル（バイナリ形式）の入力時間は 3 秒であるが，位相構造構築時間は 160 秒である．位相構造構築処理にかなりの時間を要してしまう．10 万点のときは 10 秒，1 万点のときは 1 秒である．

$w=0$ として MB 法を適用した結果を図 12 に示す．菊の葉周辺部を平滑化できた．また，境界線を含む三角形メッシュに 1-dimensional 4 point scheme を適用した結果を図 13 に示す．菊の葉の境界線が平滑化できた．菊の葉の境界で金型を 2 つの領域に分割し，菊の葉の内部のみ細分化した結果を図 14 に示す．菊の葉の内部と外部の境界線を一致させるため，境界線は平滑化していない．このように分割して細分化することで境界線付近のだれを防いだり，平滑化の度合いを分けて考えることができる．

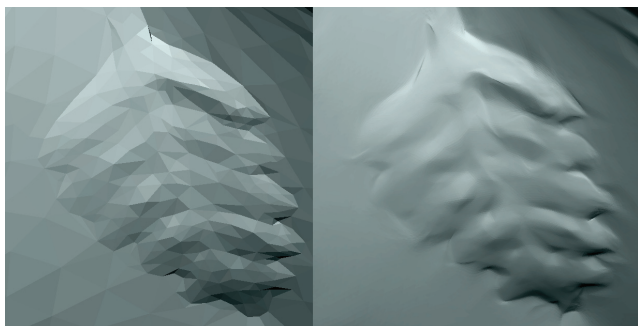


図 12 左：細分化適用前，右：適用後

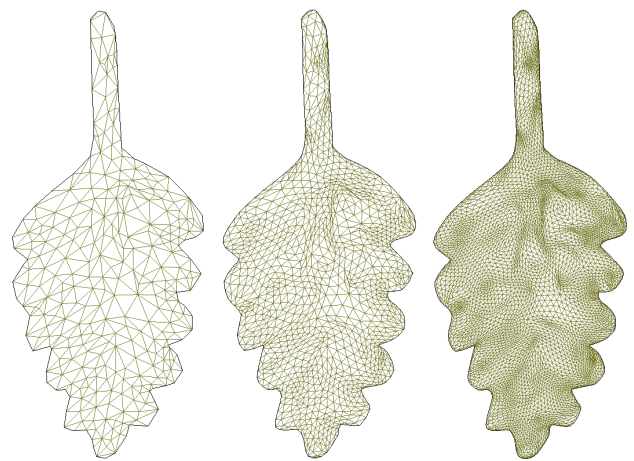


図 13 左：境界線平滑化適用前，中：1 回適用後，
右：2 回適用後

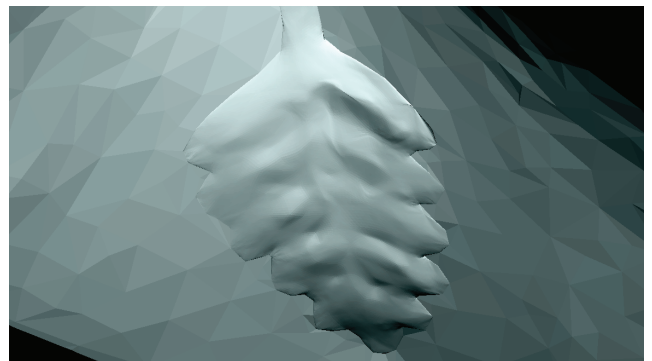


図 14 菊の葉の内部のみ細分化した結果

3・2 工具経路算出結果

マウス形状の加工対象物に対して，BE で走査線工具経路を算出した結果を図 15 に示す．工具経路は工具半径分オフセットできている．BE で等高線工具経路を算出した結果を図 16 に示す．こちらの工具経路も工具半径分オフセットできている．また，アプローチやリトラクトの軌跡は円弧形状に形成されている．アプローチ，リトラクトは円弧補間と直線補間の 2 種類を用意している．FL で荒取り工具経路を算出した結果を図 17 に示す．外側から内側へ追い込むように工具経路を算出できている．また，BE で加工領域を指定して算出した走査線工具経路を図 18 に示す．菊の葉内部のみを加工する工具経路が算出できた．

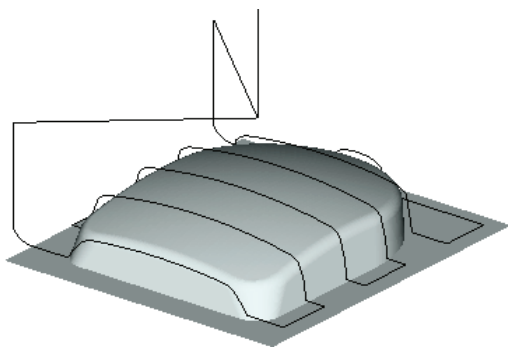


図 15 走査線工具経路算出結果

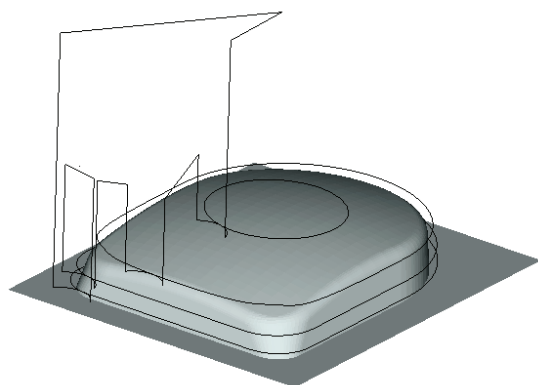


図 16 等高線工具経路算出結果

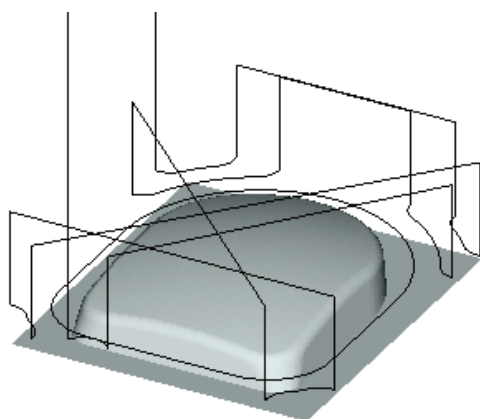


図 17 荒取り工具経路算出結果

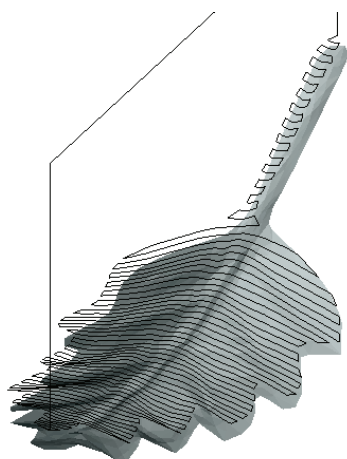


図 18 加工領域指定した走査線工具経路算出結果

走査線工具経路を高精度化した結果を図 19 に示す。高精度化後は、立ち壁部の工具経路が切立っている。また、等高線工具経路を高精度化した結果を図 20 に示す。カクカクと折れた工具経路が平滑化されている。

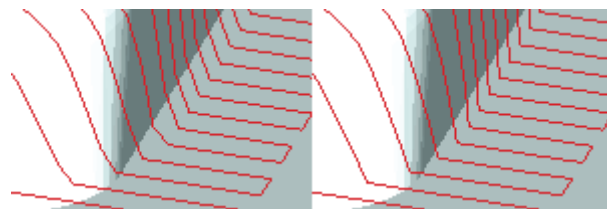


図 19 左：高精度化前，右：後

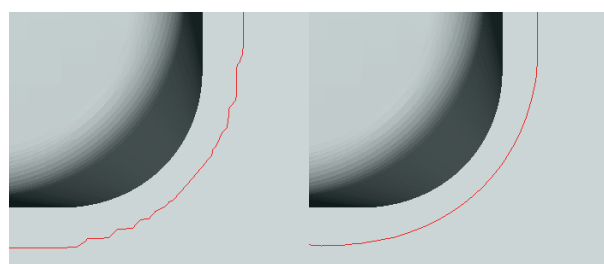


図 20 左：高精度化前，右：後

工具経路の精度と工具経路算出に必要な計算時間を調べた。加工対象形状は、平板（80×80mm）の上に半球（半径 20mm）を置いた形状である（図 21）。入力データは、面数が 48,450 の STL ファイルであり、加工対象物との誤差は 1 μ m 以内である。出力データは、条件を走査線工具経路、半径 3mm の BE、Y 方向のピッチ 5mm とする NC プログラムである。誤差調査については、工具経路の各点間に中点を加えた点群と、加工対象物との差を算出した。点群が加工対象物内部に存在する場合は－、外部に存在する場合は＋とした。計算時間については、Z マップモデルを取得できれば走査線工具経路は瞬時に得られるので、加工対象物から Z マップモデルを取得するまでの時間を測定した。

市販 CAM ソフトと比較するために、CAD で定義した形状に、同程度の誤差で工具経路を生成し、計算時間を比較した。誤差比較についての実験結果を表 1 に示す。本ソフト、Caelum KKen、ESPRIT の工具経路計算時間は、それぞれ 13 秒、114 秒、15 秒だった。

以上より、この実験に関しては、本 CAM ソフトの性能は、市販 CAM ソフトと同等以上である。

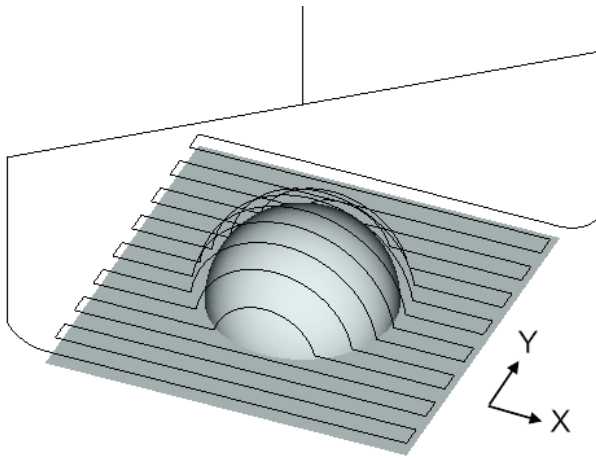


図 21 平板と半球

表 1. 市販 CAM ソフトとの誤差比較[μm]

	最大値	最小値	平均値	標準偏差値
本ソフト	0.2	-2.3	-0.7	0.4
CaelumKKen	0.5	-1.5	-0.4	0.4
ESPRIT	2.5	-1.5	-0.1	0.3

4 まとめ

三角形メッシュを平滑化し，それを基に工具経路を算出し，NC プログラムに変換する CAM ソフトを開発した．STL ファイル入力速度は高いが，ハーフエッジ構造構築速度は低い．10 万点を越える三角形メッシュの入力作業では，利用者がいらついてしまうかもしれない．MB 法は三角形メッシュをうまく平滑化してくれる．部分的に平滑化することが可能なので利用価値が高い．工具経路算出に GPU を活用した逆オフセット法を用いた．市販 CAM ソフト

と比較して，遜色ない性能を発揮することができた．また，加工対象物の法線ベクトルを利用して，工具経路の精度を向上させた．

開発した CAM ソフトは当センターのウェブサイト (<http://www.itc.pref.tokushima.jp/~hiraoka/>) で配布する．測定機，形状処理ソフト，本 CAM ソフトを用いれば，現物から NC ファイルを容易に素早く作成することができる．

謝辞

長浜プラスチック工業株式会社の長濱司氏には，手彫りの菊の葉金型を提供していただきました．御協力に対し，厚く御礼申し上げます．

参考文献

- 1) D.Zorin, W.Sweldens, P.Schröder, “Interpolating subdivision for meshes of arbitrary topology”, SIGGRAPH 96 Conference Proceedings, 189-192
- 2) Nira DYN, David LEVIN, John A.GREGORY, “A 4-point interpolatory subdivision scheme for curve design”, Computer Aided Geometric Design 4, 257-268(1987)
- 3) 藤尾三紀夫, 柳下福蔵, 鈴木裕, “Boundary-Map データ構造に基づく CAD/CAM システムの開発”, 精密工学会誌, Vol.66, No.7, 1048-1052(2000)
- 4) 乾正知, “ポリゴン表現に基づく CAM”, 精密工学会誌, Vol.69, No.4, 486-489(2003)
- 5) 塚田陽介, 宮下朋之, 乾正和, “法線情報を伴う離散的形状表現の CAM での利用”, 2004 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 251-252 (2004)