

プレス金型製作作用工具軌跡の 3次元相互相関・畳込積分による自動生成

名古屋工業大学 機械工学科

助教授 中村 隆

(平成2年度研究開発助成 AF-90012)

1. 研究の背景

近年、プラスチック製の日用品や工業製品に自由曲面を形状構成要素としたものが増え、その設計や金型の製造方法に新たな発展が期待されている。一方、従来放電加工に頼っていた金型の加工を高能率な切削加工に置き換える試みがなされている。これは、工具材料の改良、加工方法の改善（例えば高圧クーラントによる高硬度材の常温切削）に負うところが大きく、今後の大きな流れとなるであろう。しかし、現段階ではハードの発達と比べ、それを活用するソフトの開発が遅れ、発展の妨げとなっている。例えば、回転工具の中心軸を傾けて加工する5軸制御マシニングセンタは、その有効性を認めながらも利用が拡大しない。5軸が同時に移動しながらの加工は、人間の頭脳では追跡不能であり、全面的に計算機に頼るか、バーチャルリアリティ等の新技術を活用するしかない。形状の把握、工程設計、工具軌跡の計算、干渉回避等の問題を解決する手法を一つずつ積み重ねることで新たな発展が期待できる。

2. 研究の目標

ここでは性能の向上が著しい計算機を最大限利用し、プレス金型の自由曲面を削り出す作業を自動化する方法を考える。自由曲面立体の表現をVoxelとし、凸閉包立体を計算することで凸部と凹部を分離して除去する工程設計を提案する。また境界のセルには中間値を持たせることにより、少ない配列数で精度を維持することを試みる。凸閉包立体までの5軸制御加工工具軌跡の作業設計

で、その効果を確かめる。また凹部の加工で重要となる干渉問題を、3次元相互相関の計算により解決し、工具軌跡の算出、畳込積分を利用した削り残し部の算出を試みる。ここでも境界セルの中間値で精度の維持を試みる。

3. 研究成果の概要

3.1 凸閉包立体までの5軸制御加工

3.1.1 空間方位分割と凸閉包立体

本研究では、自由曲面立体を凹部と凸部に分け、凸面で囲まれた凸閉包立体まではフラットエンドミルによる5軸制御除去加工、凹部は各部に最適な工具形状と軸方向を決めて除去するシステムを構築中である。後述する凹部の加工では工具と製品との干渉を考慮した厳密な工具軌跡計算が必要となるが、凸部の加工では製品との干渉は生じない。ここでは、自由曲面立体をVoxelで表現し、それを凸面で包む凸閉包立体の計算に最外点リスト法を適用し、空間方位分割法を開発し、高精度化をはかった。最外点リスト法は、OCRの分野で文字や特徴抽出に利用した凸閉包計算法¹⁾である。図1に示すような2次元問題では、円周角を等分割

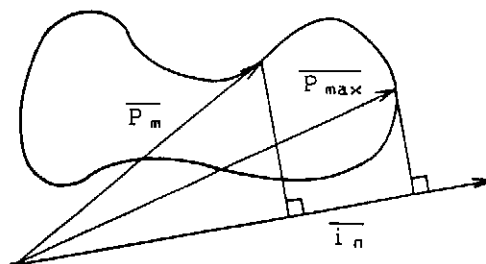


図1 最外点リスト法

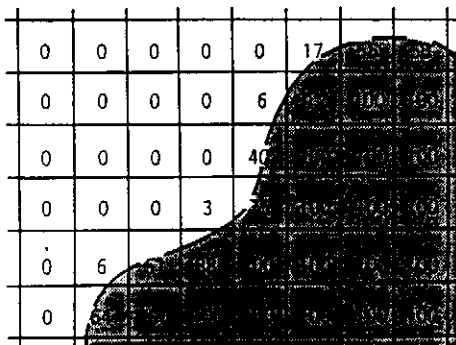


図7 2次元での中間値を持つVoxel

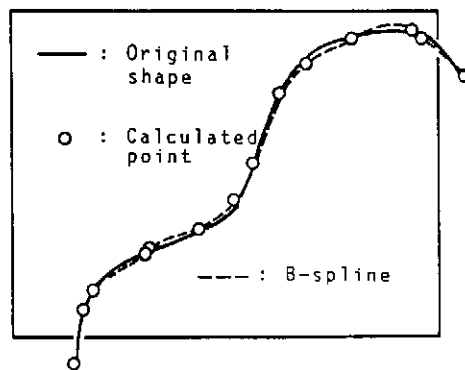


図8 内挿推定の計算結果と原図形

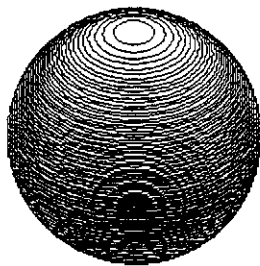


図9 球の128°Voxel表現

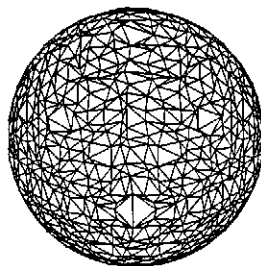


図10 2値から求めた球の凸閉包

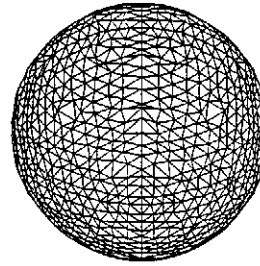


図11 中間値から求めた球の凸閉包

3. 1. 2 Voxel表現の高精度化

Voxel表現は自由曲面立体を表す方法として便利であるが、精度を高めるには要素数を多くする必要があり、現在の計算機容量では十分な精度は得られない。境界部だけ細かく分割するオクトツリー法が提案されているが⁹⁾、ここでは境界のセルに充足量を示す中間値を持たせ、少ない要素数で精度を維持することを試みる。

図7は2次元問題について、一つのセルに対し実体が占める面積をフルに100として表している。この様に要素が実数値を持てば、要素数が同じでもメモリ容量は増大する。しかし、本研究では凹部の除去加工での工具オフセット計算を高速フーリエ変換 (FFT) を利用した相互相関関数で行うことから⁹⁾、当初から一つの配列に複素数として2×8バイトを確保している。また要素数が少ないことは集合演算、探索での繰り返し数を少なくし、計算速度で有利である。図8はセルの中心が図7の値を持つとして、X-Y方向にしきい値を50と

して内挿し、境界を推定したものを、原形と比較したもので、良い結果が得られている。これを凸閉包立体の計算に利用し、精度の改善をはかる。

図9は球を128°で2値のVoxelで表現したもので、前述の最外点を計算した結果を図10に示す。図4の理想的なパッチと比べ、量子化誤差により、特に各座標軸と垂直となる両極、赤道上で歪みが大きい。そこで、図1と同様に境界のセルに中間値 (フルで1000) を持たせ、各方位との内臓値に補正を加えた。この様にして計算した球の凸閉包を図11に示す。図10と比べ、全域で歪みが少なく、良好にパッチが張られていることがわかる。

3. 1. 3 5軸制御除去加工工具軌跡

現在、自由曲面の除去加工はボールエンドミルによるピックフィード加工で行われ、極めて長い加工時間を必要としている。立体の凹部の加工ではボールエンドミルの適用が無難であるが、凸部ではフェイスミルあるいはフラットエンドミルを面に垂直にあて、軸方向を回転させながら移動す

る同時5軸制御加工が能率、加工精度の点から有利である。前述の凸閉包立体を計算することにより、立体の凹部と凸部を分離することができるだけでなく、凸部での法線ベクトルが頂点(北極)から順にリスト表現で得られている。フラットエンドミルであればそのまま工具移動軌跡となり(図12)、半径方向へのオフセットを行えば、フェイスミルが利用できる。実際の加工には、工具長による座標交換、治具類との干渉を考慮し、NC指令を算出する必要がある。今後、実機での検証を進める。

3. 2 相互相関・畳込積分による凹部加工工具軌跡計算

3. 2. 1 凹部除去形状の抽出

如何なる加工方法であれ、凹部を加工するには厳密な干渉、工具軌跡計算が必要である。本研究では凹部の加工に工具と製品との相互相関・畳込積分を利用した工具軌跡計算を行う。削り取るべき凹部(凹部除去形状)は、図13に示すように凸閉包立体と製品との集合演算で得られる。得られた凹部除去形状は、製品の凹部表面であった制約面と、凸閉包立体の自由表面で囲まれている。凹部除去形状を削り取る時、工具は自由表面を通過することは出来るが、制約面は通過できない。

3. 2. 2 相互相関・畳込積分による工具軌跡の計算

凹部除去形状の制約面から、ボールエンドミルの工具径と工具中心軸の方向を決定する。工具径の計算には、制約面の曲率分布を求める必要があるが、量子化された立体曲面の各点での曲率計算は誤差を生じやすく、現在、平滑化の手法を研究中である。工具中心軸の方向は、制約面各点の法線を球面に投影して拡張ガウス像とし、その像が半球内に入るよう大円を探索する。探索された大円の法線が工具中心軸となる。ここでも、制約面法線算出、大円の探索方法を研究中である。これらの課題が解決されれば、凹部除去形状に対し、それを削るボールエンドミルの工具径と軸方向が求められるが、現状ではそれが既知であるとして

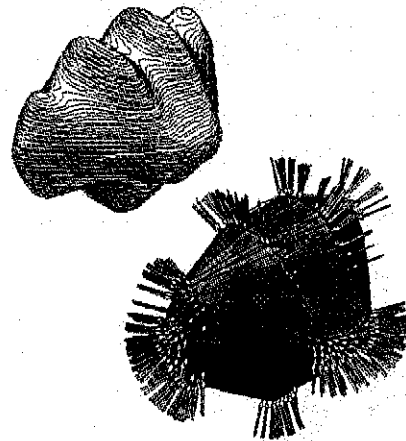
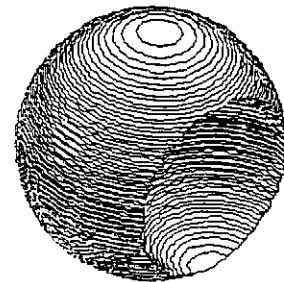
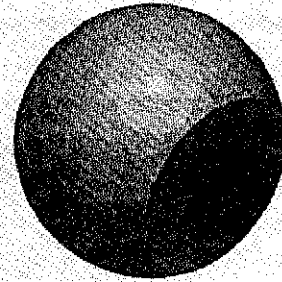


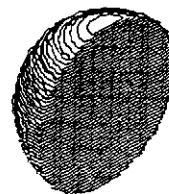
図12 5軸制御工具移動軌跡計算結果



製品形状



凸閉包立体



凹部除去形状

図13 凹部除去形状の抽出

話を進める。

凹部除去形状を削り出す工具軌跡は、工具と凹部除去形状の相互相関関数を計算することで求められる³⁾ (図14フローチャート参照)・相互相関の

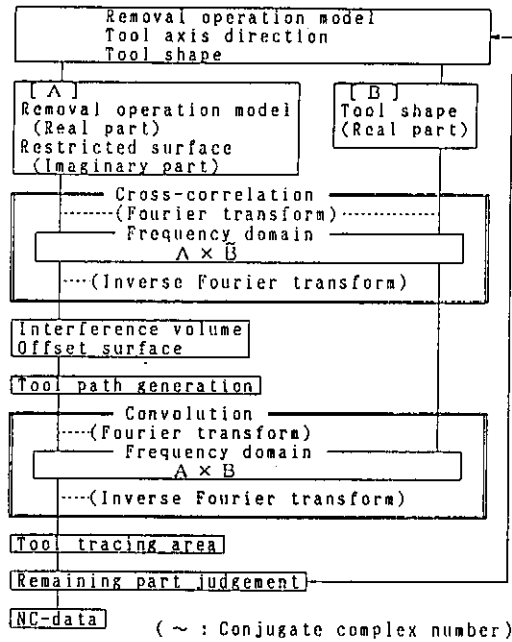


図14 工具移動軌跡計算フローチャート

計算は、高速フーリエ交換を活用し、図15に示すように、工具には実数値、凹部除去形状では制約面に虚数値、内部に実数値を持たせ、3次元フーリエ変換→空間周波数領域での積→逆フーリエ変換で行われる。得られた計算結果から、実数値を持つ領域の内部で、虚数値を持つ領域の外部が工具が移動可能で凹部の除去が行われる領域となる。移動可能領域内で等高線トラバース、あるいはピックフィード加工の工具移動軌跡を算出すれば、その軌跡と工具形状との畳込積分で実除去立体が求まり、凹部除去形状との集合演算で削り残しが算出できる。

3.2.3 中間値による高精度化

工具表面および凹部除去形状の制約面にはセルの体積を示す中間値が入れている。そこで、移動可能領域の外部から内部に入る時の相関関数の値から、真の境界を推定した。

3.2.4 実加工実験

上記の相互相関関数を利用した工具軌跡計算および中間値による境界推定を検証するため、3軸制御のマシニングセンタで実加工実験を行った。R6、R3、R1.25の3本のボールエンドミルを用い、

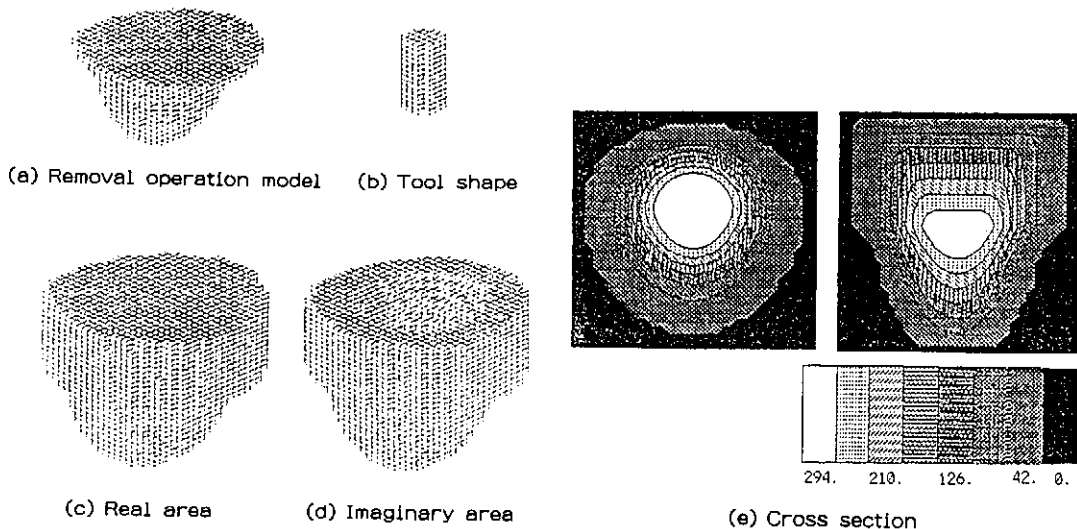


図15 相互相関と畳込積分

正弦波で構成された図16（上）の形状から、R6では（下）のオフセット面が計算される。加工面を写真1に示す。加工方向に平行な左の写真からわかるように、中間値による境界推定により滑らかな正弦波が得られている。尚、Voxelでのセルの

大きさは $1 \times 1 \times 0.4$ （高さ方向）mmである。次に名古屋大学理学部地震火山研究センタの依頼で製作した重力加速度異常の分布立体模型（北緯 34° 、東経 $135^\circ \sim 137.25^\circ$ 、東経 139° ：日本の近畿から東海地方）を写真2に示す。

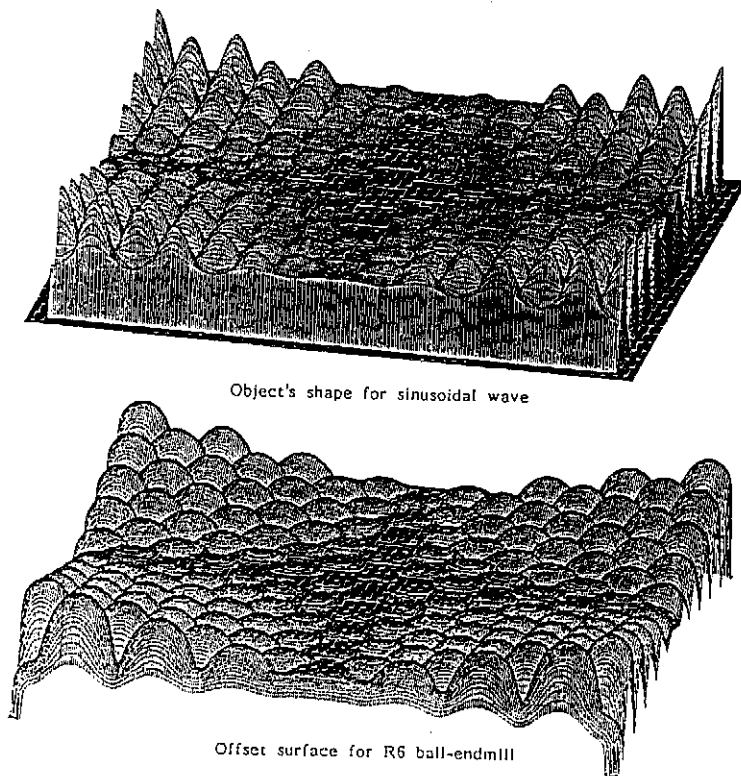


図16 正弦波で構成された製品とオフセット面

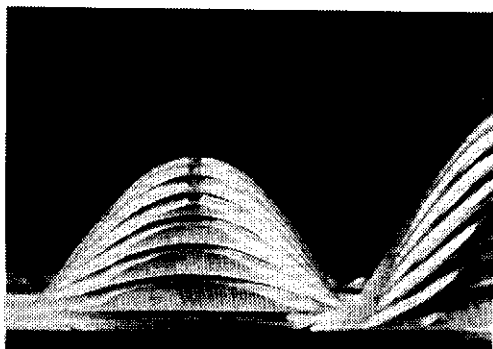


写真1 加工実験結果1（ピックフィード1mm）

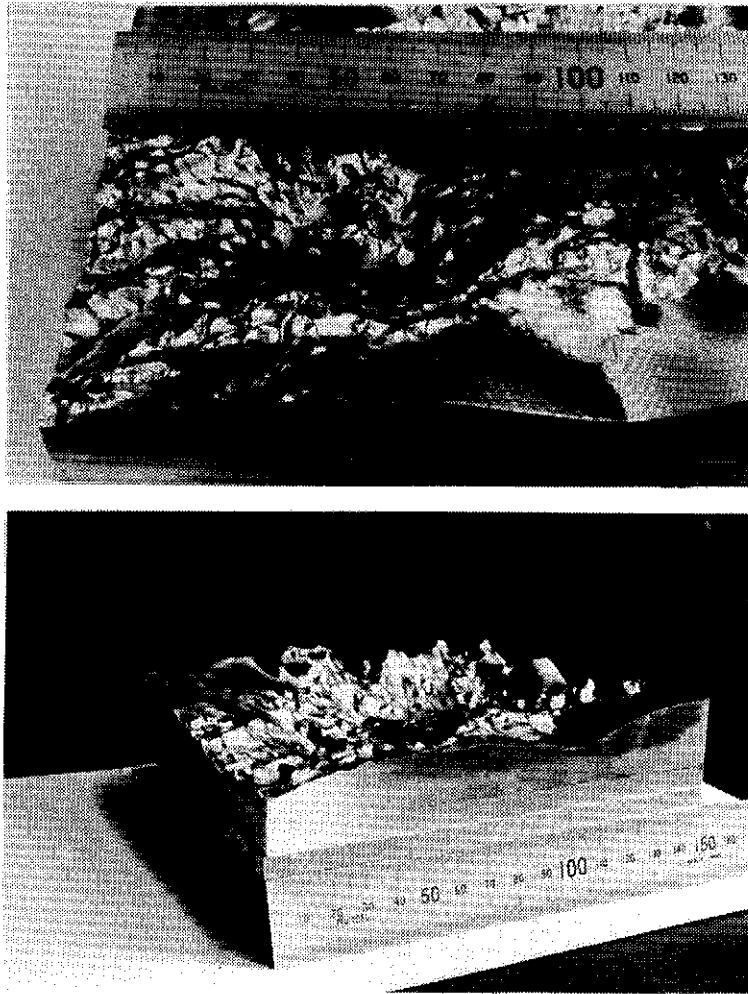


写真2 加工実験結果2 (ピックフィード0.5mm)

4. 結言

プレス金型の自由曲面を削りだす作業を自動化する目的で、新たな工程設計、作業設計の手法を提案した。自由曲面立体の表現をVoxelとし、凸閉包立体を計算することで凸部と凹部を分離して除去を行う。また境界のセルには中間値を持たせ、少ない配列数で精度を維持することが可能となった。また凹部の加工では、3次元相互相関の計算により干渉を回避した工具軌跡を計算し、実加工を行い中間値による補正の効果を確かめた。これらの技術は、将来増大すると思われる自由曲面の加工の能率向上に貢献できると考える。

参考文献

- 1) J.H.Munson, IEEE Pattern Recognition Workshop, Puerto Rico, Oct., 1966, P115
- 2) G.L.Jackins and S.L.Tanimoto, Computer Graphics and Image Processing, Vol. 14, No. 3, 1980, P249
- 3) T.Nakamura and H.Fujimoto et al, Proc. of JSPE Annual Conf. Spring, 1991, P1155

発表論文

- (1) T.NAKAMURA, H.FUJIMOTO and L.

CHEN : 5 Axes Removal Operation for
3D Objects with Free Surfaces,
IFToMM - jc, Int. Symp. on Theory of
Machines and Mechanisms, Sep. 1992

(2) 中村 隆 他4名 : 自由曲面立体の除去加工、
日本機械学会平成4年度山梨地方講演会講演
論文集 10月、1992