NC 加工シミュレータの開発*

—システム構成方法—

川島泰正** 伊藤久美子** 石田智利** 野中士郎*** 江尻一彦†

Development of an NC Machining Simulator
—System Configuration—Yasumasa KAWASHIMA, Kumiko ITOH, Tomotoshi ISHIDA,
Shiro NONAKA and Kazuhiko EJIRI

This paper presents a new method to construct a solid model based machining verification system, which includes (1) system configuration technique with three subsystems and removed volume storing for the selective visualization of machining scenes; (2) dimensional measuring task simulation using measuring instrument models for the quantitative evaluation of machined shape. With this method, firstly the user can detect the dimensional errors on the final machined shape, and then check selectively the machining steps which yield the errors. As the result, the time consumed for step-by-step verification of NC data is reduced. Besides, the accuracy of the error detection is increased.

Key words : solid model, machining simulation, machining verification, geometric simulation, numerical control, NC, CSG, Octree, measuring instrument, Z-buffer

1. はじめに

ソリッドモデル間の集合演算により切削加工を高精度に模擬する NC 加工シミュレータは、工具干渉や加工寸法不良を事前に検出し、加工の信頼性を確保するための手段として注目されている¹⁾。

加工シミュレーション実現については、およそ 10 年ほど前より

- ・工具の移動軌跡形状（本論文では工具包絡体と呼ぶ）のモデリング方法^{2)~4)}
- ・加工状況の可視化⁵⁾⁴⁾
- ・干渉検出方法⁶⁾
- ・加工寸法異常検出方法⁷⁾⁴⁾⁶⁾
- ・加工性評価⁸⁾

等の分野を対象に研究が行われている。この中では特に近年、Zバッファ隠面処理法を拡張し、表示画面上の画素単位で集合演算を行う加工アニメーション（ピクセルベースドアニメーション）⁵⁾が、加工の様子を比較的高速に可視化する手段として複数の商用システ

ムで使われるに至っている。しかし、ピクセルベースドアニメーションは、固定された方向からみた画像上で加工を模擬するもので、加工シミュレーションが本来持つ可能性の一部しか実現していない。

筆者らは、3次元的な集合演算に基づいた、高精度且つ定量的な加工検証機能を提供可能な加工シミュレーションシステムの実現を目指して研究開発を進めている。特に本論文ではそのための基本技術としての

- ・加工寸法を定量的に評価する手段
 - ・不良原因を効率良く見つける手段
- に着目し、加工シミュレーションシステムの構成方法について論じる。

2. 加工シミュレーションの基本機能

筆者らは最初に、加工シミュレーションを用いた加工検証がどのような手順で行われるかを検討した。これはシステムの採るべき形態と基本的な機能を知るためであり、従来十分には議論されていなかった。

検討の結果は次の通りである。

- (a) 最初に加工状況全体をおおまかに見る。
- (b) 次に最終結果について加工寸法を評価する。
- (c) もし不良があれば原因となる加工ステップ（具体的には NC データ内のブロック）を見つけだす。

* 原稿受付 平成元年 11 月 6 日。昭和 63 年度精密工学会春季大会学術講演会（昭和 63 年 3 月 18 日）にて発表

** 正会員 (株)日立製作所日立研究所（日立市久慈町 4026）

*** (株)日立製作所日立研究所

† (株)日立製作所日立工場（日立市幸町 3-1-1）

(d) 不良原因の加工ステップの前後で加工状態を詳細に見る。

このうち(a)は従来のCAM等にも含まれている工具動作のアニメーションや工具経路のプロッタ出力に相当し、大きなエラーの発見に用いられる。一方、(b)以降がソリッドモデルベースの加工シミュレーションを利用した詳細なチェックである。ここで重要なことは、加工の途中経過より最終的な加工寸法のチェックが先行するという点である。すなわち、もし加工寸法に異常がなければ加工の途中経過を詳細に確認する必要はなく、仮に加工寸法不良が見つかったとしても、その原因となった加工ステップとその前後の状態だけを詳細に見れば良い。長大なNCデータによる加工を最初から最後まで表示して、それを見続けるのは効率の良い方法ではない。もちろん、加工時の不良は加工寸法のみには反映されずとは限らず、例えば工具ホルダとジグの干渉*は(b)では検出できない。しかし、(b),(c)で干渉の発生とその加工ステップ番号をユーザに連絡できれば、同様の議論が可能となる。

以上の検討より、加工シミュレーションシステムは・任意の加工ステップの結果を選択的に表示する機能(加工ステップの選択的表示)

を前提として、

- ・最終加工形状を定量的に評価し加工不良を検出する機能(加工形状評価)
- ・加工不良の原因となる加工ステップを発見する機能(加工ステップ検索)
- ・工具、ジグ、ホルダなどの干渉を検出する機能(干渉検出)

を備えたものでなければならない。以下では、干渉検出を除く3つの基本機能の実現手段を順に述べる。

3. 加工動作の選択的表示

3.1 3部構成システム

加工を表現する集合演算は一般に不可逆なので、任意の動作による加工結果を任意の順序で表示するためには、

- ・その都度第1動作からの集合演算を実施して被削物のモデルを作り出す、
- ・いったん全工程について集合演算を行って各動作の結果を何らかの方法で保存し、保存データ

* CAMの用語として「工具干渉」を、カッタが被削材に必要以上に切り込むことを指す場合があるが、本論文ではそのような状態は「削り込み(over-cutting)」と呼び、切り刃以外が被削材やジグに衝突する場合と区別する。

Fig. 1 System configuration with three processors

の一部を必要に応じて取り出す。

のいずれかの処理が必要になる。第1の方法はNCデータが長大になると現実的ではないため、筆者らは第2の方法を採用し、図1に示す形のシステム構成をとることによってこれを実現した。全体はプリ、図形演算、ポスト・プロセサの3部構成からなり、それぞれは以下の役割を持つ。

(1) プリプロセサ(図2)

加工準備作業を模擬する形の対話操作によって、被削材の取付け、NCデータの読み込み、工具経路補正量の設定等を行う。さらに加工状況を大まかに見る手段(第2章の加工検証手順(a)に対応)として、工作機械の動作を動画表示する。プリプロセサによってNCデータは、各加工動作における工作機械の各軸の動きとその時の加工条件が記載され、且つランダムアクセス可能な動作制御データに変換される(図3)。

(2) 図形演算プロセサ(図4)

Fig. 2 Pre-processor

Fig. 7 Model of a 3-dimensional coordinate measuring machine

空間の重ね合わせを意味しているため), W_N, R_j をひとまとめに陰面消去して画面出力すれば良い. 特に Z バッファを持つ表示装置に対しては, W_N, R_j を別々に出力するだけで, 同等な結果が高速に得られる. さらに, 同装置とセグメントバッファを用いて除去空間の表示/非表示制御を行うと, それだけで加工を順/逆方向にたどる動画像を得ることができる. 逆方向動画像の場合は, 除去空間を順次重ね描きするだけなので, 表示装置の性能に応じて高速な動画像が得られる.

4. 加工形状評価

加工形状評価は, 加工形状と要求形状 (すなわち作られるべき形状) を比較することによってなされる. ここで考慮すべき事項は2つある.

第1に要求形状が図面やCAD データなどさまざまな形式・媒体によって与えられることである. 要求形状の表現に制限を設けること (例えばソリッドモデルでなければならないなど) は避けなければならない.

第2に, たとえ力学的条件や工具摩耗を無視した幾何シミュレーションであっても, 加工結果と要求形状が完全に一致するとは限らないということである. 例えばボールエンドミルで曲面加工をする場合に, ピックフィードの影響でできる微妙な凹凸を考えればそれは明らかであろう. 加工形状評価では, 凹凸を持つ曲面が「公差を満たして加工されているか」までを評価する必要がある.

以上の2点を考慮した上で筆者らは, 位置・寸法計測機器を計算機内にモデル化して, 計測作業を模擬することによって加工形状を評価する方法をとった. ユーザはコマンドによって計測機器を操作して加工形状の寸法等を測定し, その結果を自動的にまたは人手によって要求形状と比較する.

計測器の例として3次元位置測定機のプローブ機能のモデリング方法と, それを利用した加工形状評価方法の例を示す (図7).

プローブは, それが停止状態と接触点探索状態にあるときに分け, それぞれ

Fig. 8 Evaluation of a curved surface using the probe model

- ・停止状態のプローブは一つの点と, 点が測定対象物の外部/表面上/内部のいずれにあるかを判定するプログラム
- ・探索状態のプローブは軌道を表す半直線と, 軌道と測定対象物との交点を探索するプログラム

としてモデル化した. プローブのモデルの典型的な利用方法は, 図8に示す加工曲面評価である. 軌道は要求曲面に配置した計測点の法線上に設定し, 各計測点を始点として加工面を探索する. 探索結果より要求曲面から加工面までの距離を求め, それを公差と比較することによって計測点が「削り込み」「削り残し」「公差内」のいずれの状態かが評価できる.

上述の加工曲面評価では, プローブ軌道が要求曲面データから自動的に決定されたが, そうでない場合には対話的に決める必要がある. 一例として, 工作機械にプローブを取り付けた状態をモデル化し, 工作機械モデルをコマンド操作する方法がある. 実現システムではプローブのほかにノギスなどの測長器のモデルを用意した.

5. 不良加工ステップの検索

加工ステップの検索については, 加工形状評価の結果見つかった被削物の不良位置を, 画面上でユーザに指示してもらい, そこを加工したステップを検索・表示するという方法をとった. そのために被削物モデルの形状要素にその要素を作った加工ステップの番号を属性として与えた.

6. ソリッドモデリング

ここまでの議論ではソリッドモデリングの方式について言及しなかったが, その選択は重要であり, 特に問題となるのは集合演算の信頼性と処理性能である. まず信頼性からいえば, 境界表現ソリッドモデルの利用はためらわれる. なぜなら境界表現ソリッドモデル間の集合演算では, 特にそれを繰り返した場合, 幾何データとトポロジーデータの間に矛盾が発生して, 計算が異常終了する可能性があるからである. 筆者らの方法は通常差演算に加え, 除去空間を生成する積演

Fig. 9 Grafttree: Space division based CSG

算, さらには式 (3) の和演算と, 集合演算の回数が非常に多いため, 特に高い信頼性を必要とする. CSG モデルを使えばデータ矛盾の問題はないものの, 表示処理の中で集合演算を行う必要があり (例えばピクセルベースドアニメーションと同様な), 性能上の難点がある. また除去空間を保存する利点も生かされない.

そこで筆者らは, 接木モデル (Grafttree)⁹⁾ と呼ぶ Octree と CSG の中間的な方法を用いることとした. 接木モデル (図 9) は Octree¹⁰⁾ と同様の空間分割により CSG の演算木を局所化したもので, CSG と同様の信頼性と, データの局所化による高速性をあわせ持った, 加工シミュレーションに適したモデルである. 接木モデルの表示は, 部分空間ごとの境界評価による多角形近似, または空間分割により高速化された光線追跡によってなされる.

7. 適用例

最後に, 加工シミュレーションの適用例を示す. 計算機は日立エンジニアリングワークステーション 2050 G (CPU: 68020+68881, 22.5 MHz) を使用した.

1) 加工ステップの検索・表示

図 10 は加工ステップ検索と任意順序による加工ステップ表示の例として, (a) は最終加工形状, (b) は (a) の★位置をカーソルで指示し, その部分を加工したステップを検索し, 表示した結果である. 本例の NC データは約 100 ステップで, シミュレーションには約 15 分を要した. 表示は多角形近似によってなされており, 最終形状の表示に約 60 秒, 除去空間を重ねて 10 ステップ手前のを表示するのに約 100 秒かった. ただし, いったん除去空間データをセグメントデータを蓄えた後の表示では, より高速な応答が得られる. 加工シミュレーション結果データの量として

(a) Pointing (★)

(b) Searched out machining motion

Fig. 10 An example of cutting motion searching and visualization

(a) Machined object

(b) Evaluation result

Fig. 11 An example of curved surface evaluation

は, 除去空間記憶法を用いた場合, 各ステップの加工結果を保存するのと比べ約 1/10 で済むという結果が得られた.

2) 加工寸法評価

図 11 は (a) 曲面加工結果と, (b) 加工形状評価結

果の表示例である。加工ステップ数は約1000回で、表示は光線追跡によっている。また、加工形状評価は前述したプローブのモデルを用いた要求曲面との距離測定により行われ、評価結果は計測点ごとにマークと色で示している。

8. お わ り に

以上、本論文ではNC加工シミュレータについて、その用途・利用手順を考慮して基本的な機能を整理し、その実現方法と効果を示した。今後の課題としては実行速度の向上と、多軸動作時の工具包絡体のモデリングの問題（現在は静止した工具の重ね合わせによっている）が残されている。処理速度の向上にはハードウェア自体の高性能化に期待するところが大きいが、図形表現上の工夫なども必要にならう。また、多軸動作の工具包絡体については、一般的な取扱いは非常に難しいため²⁾、加工検証に必要な範囲に問題を限定するつもりである。

謝 辞

本研究に際して多くの御教示を頂いた(株)日立製作所日立工場の六谷隆志副技師長、城戸勝弘主任技師、藤島則昭主任技師、平井純一技師、日立研究所の徳増真司主管研究員及び第3部の方々に感謝の意を表します。

す。

参 考 文 献

- 1) 沖野教郎：TIPS/GSで開くCADの新世界，日経メカニカル，1986.1.13.
- 2) 川島泰正ほか：3Dソリッドのトラジェクトリーモデリングの研究，昭和58年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集（1983）.
- 3) 城間祥之ほか：N/C加工シミュレーション開発のための基礎研究（工具移動軌跡のモデリング），日本機械学会論文集（C），50，452（1984）697.
- 4) W. P. Wang & K. K. Wang：Geometric Modeling for Swept Volume of Moving Solids，IEEE CG & A，6，12，（1986）8.
- 5) T. V. Hook：Real-Time Shaded NC Milling Display，Computer Graphics，20，4，（1986）15.
- 6) 岸浪建史ほか：Voxel表現法の機械加工シミュレーションへの応用，精密工学会誌，55，1（1989）105.
- 7) 南 信郎ほか：ソリッドモデルベースNCシミュレータGP/SIMの開発，精密工学会誌，54，12（1988）2271.
- 8) 蔡 明達ほか：加工性評価のための切削加工シミュレーションシステム，昭和63年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集（1988）775.
- 9) Y. Kawashima et al.：A Flexible, Quantitative Method for NC Machining Verification using Space Division Based Solid Model，New Advances in Computer Graphics，Proc. of CG International '89，Springer-Verlag，（1989）421.
- 10) D. Meagher：Geometric Modeling Using Octree Encoding，Computer Graphics and Image Processing，19，2，（1982）129.

（p.842より続く）

分野別では、前回に比べ設計と品質管理の件数が増加、製造は減っており、米国では生産上流である設計からCIMにアプローチしていることが読み取れる。新たに登場した領域はヒューマンCIM（人間性重視のCIM）、コンカレント（連続同時処理）エンジニアリングなどである。

また、コンサルティング会社やエンジニアリング会社の出展が増えたことも特徴である。

CIM実現にはマルチベンダーのツールを組み合わせ、ユーザに合った環境とすることが必要であり、これをまとめるシステムインテグレータが強く求められているためである。

企業訪問したのはIBM、HP（ヒューレット・パカード）、アップルのコンピュータメーカと米国最大のエンジニアリング会社であるベクテル、航空機メーカのマクドネル・ダグラス、調査会社のガートナーの6社である。

DECはAUTOFACTの会場で説明を受けた。

今回の調査ではSIの重要性が増えているため、初めて調査テーマの一つに取り上げた。IBMではSI部門を訪問した。同社の中では最も新しい部門であり、約1万9500人で構成されている。政府機関、軍、金融関係では大規模SIサービスの経験があり、これをベースに民間企業に対してもメインコントラクターとして展開を計画している。

DECもビジネスパートナーと提携し、多くのアプリケーションソフトをそろえてSIサービスを展開しようとしている。これに対し、HPはSIサービスよりも他のシステムインテグレータと協力し、自社のハードをユーザに使ってもらうことをねらっている。

ベクテルはSIサービスに進出していない。なお、ガートナー社ではAT & TのCIM特許は米国ではほとんど問題になっていないとしている。（服部 敏夫）