Voxel 表現に基づく多軸制御加工切削シミュレーションの大規模並列処理手法*

- グラフィックハードウェアのアーキテクチャを考慮した状態記述/干渉判定法 -

土 棚 善 貴** 金 子 順 一*** 堀 尾 健 一 郎***

Fast Simulation Algorithm of Voxel Representation Method for Multi Axis Control Machining
- Geometric Representation and Collision Detection Considering the Architecture of Graphic Hardware -

Yoshitaka TSUCHITANA, Jun'ichi KANEKO and Kenichiro HORIO

This study proposes a new simulation method of workpiece shape with voxel representation for multi axis controlled machining process. Usually, voxel representation requires enormous number of computational complexity and computer memory to estimate accurate shape of machined workpiece. In this paper, a new simulation algorithm based on octree collision detection with multi level voxel representation is proposed. The proposed algorithm is designed to adapt an characteristic of GPU hardware architecture for parallel processing. In the proposed algorithm, as attribute of each voxel, block number of NC program from the moment when the voxel is machined with endmill is described in computer memory. Then, by referring the attributes, the voxels locate near the cutting tool can be identified within a short time. By applying the proposed algorithm, the prototype simulation system is developed. The developed system can estimate shape of the workpiece in machining process within a several micro seconds at an arbitrary moments.

Key words: NC machining, multi axis controlled machining, cutting simulation, voxel representation, GPGPU

1. 緒 言

近年、多軸制御 NC 工作機械を使用したエンドミル加工では素材から完成形状までの加工を同一加工機上で把持条件を変えことなく実施する一貫加工が広く実施されつつある。この種の加工では、被削物とツール、機械構造物との衝突が頻発する反面、加工の進展に伴い被削物形状が大幅に変化する。そのため工具経路の生成時に加工途中の各段階における被削物形状を推定し参照することが重要な課題となる。これに対し、一般的な CAM ソフトウェアパッケージにおいては、工具経路決定に際して被削物の形状変化を評価する切削シミュレーションが備えられ、工具刃先による被削物の削りすぎや削り残し、被削物とツール、機械構造物との衝突の検出が実施されている。

加工途中の被削物形状の記述手法としては、従来より CAD システムのソリッドカーネルの利用や、空間を離散的に分割してそれぞれの領域における形状の存在を表現する手法が提案されている。後者の代表的なものとしては、2 次元基準平面上に格子点を等間隔に設定し、これを通過する並行な直線と被削物表面との交差位置を記述する Z-map¹⁾⁻³⁾法や、図 1 に示すように空間を一定間隔で分割し、各領域に物体が存在するかの属性を記述する Voxel 表現法⁴⁾等が挙げられる。このうち Voxel 表現法では、工具の運動に伴い切れ刃によって除去されたと考えられる領域を工具形状と各 Voxel との内外判定によって特定し、該当箇所の属性を変更することにより切削加工による被削物の形状変化を表現することが可能である。本表現法は、工具の姿勢変化や加工対象物のオーバーハング、立壁等の複雑な形状に対応しやすいため、多軸制御切削加工に対応した被削物形状評価では多

くの適用例が過去の研究⁴⁾⁻⁷⁾において見られる。

Voxel 表現を用いた切削シミュレーションでは、形状表現を高精度化するにあたって記述に必要となる計算機メモリの総量と、多数の Voxel と工具との間での干渉判定の高速化がそれぞれ大きな課題となる。これらの問題に対し、過去の研究では、Octree 形式の記述手法の導入による状態記述の効率化手法が提案されている⁸⁾。Octree 形式による Voxel 記述では、図 2 のように 1 つの Voxel によって表される領域をさらに一辺が 1/2 となる Voxel の集合として表現し、再帰的に形状を表現することによって Voxel の総数を抑制しながら微小な被削物表面形状の記述が可能となっている。

一方、干渉判定の高速化では、近年 GPU を用いた大規模並列計算が CAM においても提案されつつある⁹⁾。GPU(Graphics processing unit)は 3 次元 CG の描画用ハードウェアから発達した超並列計算機器であり、数百程度の処理ユニットを同時に実行させ、高い並列処理計算を実施することが可能となっている。近年では、GPU の能力を科学技術計算等の処理を行うためのライブラリが実用可能となっており、汎用的な目的に GPU を利用する GPGPU(General-purpose computing on graphics processing units)が一般的な大規模並列計算機技術となりつつある。本研究では、過去に提案された Octree 形式での高精度 Voxel 表現手法を GPU の並列計算機能を効率よく利用可能な方式に拡張し、切削シミュレーションを高効率に実施するための処理アルゴリズムを提案する。具体的には、Voxel 表現法における Voxel の属性記述を切削加工向けに拡張し、GPU-CPU 間の情報伝送のオーバーヘッドを局限するためのメモリ設定法の開発を行った。

2. GPU を用いた大規模並列計算に対応した被削物の Voxel 形状表現

Octree 形式の Voxel 表現法を用いて GPU 上で切削シミュレ

* 原稿受付 平成 24 年 9 月 19 日

** 学生会員 埼玉大学大学院(埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

*** 正 会 員 埼玉大学大学院

ーションを行う際の課題として、GPU 上で処理を行う際の同時に処理を行うプロセス数の確保と CPU-GPU 間でのデータコピーに伴うオーバーヘッドの問題が挙げられる。図 3 に示すように、GPU 上での大規模な並列計算は CPU 上で処理を行う対象となるデータとプログラムを用意し、これを GPU 上に転送して処理を行い、結果を CPU に再び転送する過程の繰り返しによって実現される。このとき、GPU の処理は 1.プログラムおよび処理に必要なデータの CPU からの転送、2.工具と各 Voxel との干渉検出および Voxel 属性変更の並列処理による実行、3. 処理結果のデータの CPU への転送、からなり、処理の並列化が小規模な場合にはしばしば処理時間の大半を 1.および 3.が占める。従来の Octree 形式の Voxel 表現の元で切削シミュレーションを行う際には、Voxel がより小さい Voxel の集合に分割された時点で再帰的に干渉判定が行う必要が生じる。一般的な 2 分木による Octree 形式の表現手法では、1 つの Voxel が $2^3=8$ 個の小 Voxel の集合とみなされ、これらが並列処理の最小単位となる。一方、近年の GPU を用いた並列計算において、GPU が同時並行に動作させることの可能な計算コアの総数は数百以上であり、同時に干渉の判定を実施することの可能な Voxel の総数を計算コアと同数が整数倍になるよう設定するアルゴリズムが GPU を用いた効率的な形状表現の実現に必須になると考えられる。

そこで、本研究では GPU による並列処理における干渉判定の効率を高め、計算時間を短縮するため、切削シミュレーションを対象とした Voxel 記述属性の拡張と、Voxel 間の相対的な位置関係を考慮したメモリ空間の設定法の提案を行う。以下ではそれらの詳細について述べる。

Fig.1 Voxel representation method

Fig.2 Concept of octree method

Fig.3 Parallel computing using GPU

2.1 大規模並列処理に対応した Voxel 状態記述の拡張

本研究では、数百個以上の計算コアと同時に工具と Voxel との干渉判定を実施させ、かつ GPU-CPU 間のメモリ転送量を減少させるため、以下の 2 点の形状記述法を導入する。まず、図 4 に示すように Octree 形式での Voxel 内部の空間分割を、一般的な 8 分割から、3 方向に対して等しい長さに n^3 分割する手法を導入する。過去の研究では、8 分木による再帰表現を m 回繰り返すことにより、 $1/2^m$ の大きさの Voxel を最小の単位として形状の記述を行う手法が提案されている。これに対し、本研究では再帰的な形状記述を 1 回のみ行うとし、上位の Voxel 表現において工具刃先が通過すると考えられる領域のみを $1/n$ の大きさの Voxel の集合として形状の表現を行う。以降では、加工対象物のある空間に対して初期に設定される Voxel の集合を Level1 Voxel、Level1 Voxel に比して $1/n$ の大きさの Voxel の集合を Level2 Voxel とする。

前節で述べたように、GPU は数百個以上の計算コアを同時並行に動作させることが可能である一方、並列計算の準備および結果の CPU 上への転送に大きな処理時間が必要とされる。一般的な Octree 形式の Voxel シミュレーションのように、Level1 の個々の Voxel に対して工具との干渉判定を GPU 上で逐次実施し、干渉の生じた Voxel に対して新たに Level2 の Voxel を設定して干渉判定を行うことは GPU 上でのメモリ領域の確保および GPU-CPU 間でのデータ転送に必要とされる時間から効率的ではない。そこで本研究では、Level1 の Voxel における形状表現を通常の物体の有無から、工具刃先通過の有を示す 3 状態に拡張し、これを元に Level2 に対応する Voxel についての干渉判定が必要となるかどうかを判断する手法を提案する。

図 5 は Level1 における 3 つの Voxel 属性の概要を示す。加工対象物の該当する領域が全て存在する "Full" 属性と、全て取り除かれた "Removed" 属性に対して、Voxel の領域の一部が工具切れ刃の通過によって取り除かれた状態を "Chipped" 属性として定義する。干渉判定では、工具が新しい位置に移動するごとに工具中心軸に対する各 Voxel の距離 r および工具刃先端からの距離 L を導出し、これと工具切れ刃の各部での半径 $r(L)$ との大小を比較することにより属性を更新する。

提案手法での干渉判定の手順を図 6 に示す。まず加工対象物が存在すると考えられる領域を包含する Level1 の Voxel に対し、工具との位置関係から "Full", "Removed", "Chipped" の各属性の判定を行う。これらの判定は Level1 の全ての Voxel を同時に対象とする並列処理によって実施することが可能である。次に、Level1 Voxel のうち、"Chipped" の属性を持つ Level1 Voxel が存在する領域に対応する Level2 Voxel の集合に対して工具との干渉判定を行う。この際、対象の Level1 Voxel に対応する領域は n^3 個の Level2 Voxel からなるため、これらを並列処理の対象とすることで GPU を用いた高効率な干渉判定が実現できる。

Fig.4 Extended octree method

Fig.5 Attribute of voxel

Fig.6 Procedure of interference judgement

2.2 工具通過履歴情報を用いた Voxel 状態の時空間記述

前節においては、一般的な 8 分木を用いた Octree 形式での再帰的 Voxel 形状記述に対して、GPU による並列処理に適応した n^3 分木による記述手法について述べた。本節では、更に NC 加工において得られる工具運動の順序情報を用いた干渉判定処理の効率化について述べる。

図 7 に示すように、“Chipped”の属性を持つ Level1 Voxel の領域を干渉判定の対象とする手法では、過去に“Chipped”となり、現在は工具が近傍にない空間についても干渉判定を実施する必要が生じる。また、Level2 の Voxel が全て“Removed”となった領域については加工対象物が存在しないと考えられるため、これに対応する Level1 Voxel の属性を“Removed”に変更しない場合、必要のない干渉判定が繰り返される場合がある。これらの問題を解決するため、本研究では前節で述べた“Chipped”の属性表現をさらに拡張し、工具運動の履歴情報を Level1 Voxel に与えることで Level 2 Voxel を対象とした干渉判定の効率を向上させる。

提案手法の概念を図 8 に示す。工具の通過に伴い、Level1 Voxel の属性が“Chipped”となる場合には、その瞬間の工具の運動ステップの番号を Level 1 Voxel の属性として設定する。これにより、Level2 Voxel の工具との干渉判定の際に、現在の工具位置に対応する運動ステップ番号と、Level 1 Voxel の属性が有する番号を比較し、一致する部分のみを干渉判定の対象とする。切削工具による形状の変化は、工具切れ刃が通過する可能性のある Voxel においてのみ生じると考えられる。形状変化が起こる可能性のある Level 2 Voxel を Level 1 Voxel の干渉判定時に工具運動ステップ番号を参照して特定することにより、Level2 Voxel に対する干渉判定処理そのものおよび、GPU-CPU 間のメモリ転送回数の大幅な省略が可能となる。

Fig.7 Interference judgement using conventional method

Fig.8 Interference judgement using proposed method

2.3 並列処理を考慮した Voxel 記述メモリの設定法

前節においては、Level 1 および Level 2 の 2 つの大きさの Voxel 表現と、工具運動の履歴情報を用いた Voxel の属性値設定について述べた。この提案手法では、Level1 Voxel のうち、“Chipped”の属性を持つ Level1 Voxel が存在する領域に対応する Level2 Voxel の集合に対して工具との干渉判定が行われる。干渉による Voxel の状態の遷移を記述メモリに反映させる際には対象となる Voxel の現在の状態を参照し、これが変化するかどうかの判定を行う必要がある。一般的に、Voxel の状態を記述する際には、縦横高さの 3 方向に対して (i,j,k) 個の要素を持つ Voxel の集合に対して、以下のような一次元配列 $V[i*j*k]$ を用いた記述が行われる。

このようなメモリ設定を本研究で提案する Level2 までの Voxel 記述法に適用した場合、Level 1 の Voxel のうち、縦 p 番目、横 q 番目、高さ r 番目の Voxel (p,q,r) に対応する Level 2 の各 Voxel の状態は、図 9 に示すように一次元配列上において飛び飛びに存在する n 個の連続した領域によって記述されることとなる。

一般に GPU を用いた並列処理では、処理に際してこのように不連続に配置されたメモリ領域を参照して計算を行う場合、処理の準備段階において低速な CPU 上のメモリ、もしくは GPU 上の共有メモリにアクセスし、図 10 のように連続したメモリ領域に一旦コピーを行った後、GPU コアに情報を転送する必要がある。

Fig.9 Skipping correspondence of the memory between Level1 and Level2

Fig.10 Consecutive correspondence of the memory between Level1 and Level2

生じる。このことは、Level2の各Voxelに対する干渉判定を実施するたびにLevel2のほぼ全てのVoxelの属性を記述するメモリ領域に対するアクセスを繰り返す必要があることを意味し、干渉判定速度の大幅な低下が発生することが想定される。

そこで本研究では、Level2のVoxelにおける属性記述の順序を変更し、Level1のあるVoxelが干渉を生じた場合に、それに対応するLevel2のVoxelの属性を連続したメモリ領域のコピーによってGPUに転送できる新しい記述順序を導入する。図10はその概要を示す。Level1のVoxelのうち、横p番目、縦q番目、高さr番目のVoxel(p,q,r)の領域に存在する n^3 個のLevel2 Voxelの状態は、それぞれ以下のような順序で一次元配列状に格納されて記述される。

$$N = r \cdot j \cdot i + q \cdot i + p \quad (1)$$

式(1)の順序でLevel2のVoxelの状態を記述することにより、Level1 VoxelがChippedの属性を持つ場合、対応する領域におけるLevel2 Voxelの評価では、 $V[N \cdot n^3]$ から始まる連続した n^3 個のメモリ領域を一括して転送することにより、GPUコアでの並列計算が可能となる。

3. 開発手法の処理アルゴリズム

本提案手法の有効性を検証するため、商用CAMソフトウェアで出力された同時5軸制御加工のCLデータを読み込み、荒加工と仕上げ加工における加工対象物の形状変化を評価する検証用の試作切削シミュレーションシステムを開発した。図11は開発したシミュレーションシステムのアルゴリズムを示す。

本システムでは、Level1 VoxelおよびLevel2 Voxelの属性を記述する一次元配列をCPU側とGPU側のそれぞれに $V1, dV1, V2, dV2$ として確保している。処理の過程では、まずLevel1のVoxelのうち、FullとChippedとなっているVoxelに対

Fig.11 Algorithm of proposed method

する干渉判定をGPU上で実施し結果を $dV1$ に反映させる。そしてこれをCPU側の $V1$ にコピーしてCPU上での形状変化の判定を可能とする。

次の過程では、CPU側の $V1$ について、各Voxelの属性値を順次判定し、現在切削工具が存在している工具運動ステップのIDを有するChippedのVoxelのみに対して、該当する領域のLevel2 Voxelにおける干渉判定を実施する。この際は2.3節で述べたようにGPU上の $dV2$ 配列の中から n^3 個の連続した領域を対象とした干渉判定を実施し、結果を $dV2$ 配列から $V2$ へとコピーして反映する。

最後に工具運動による形状変化を描画結果に反映するため、CPU上の $V2$ 領域を参照し、Voxel形状のなかで外部に露出する表面形状を画面に描画する。これらの処理をNCプログラム上の工具運動に従って微小距離ずつ連続で行い、画面上での加工対象物の形状変化を可視化する。

4. 並列処理による処理高速化の計算機実験による検証

4.1 可視化実験条件

試作システムの実装にあたっては、現在、CAD/CAM/CAEソフトウェアにおいて広く用いられているOpenGLグラフィックライブラリと、GPGPU用計算ライブラリであるNVIDIA社のCUDAライブラリを使用した。また、使用したPCに搭載されているCPU・GPUは表1に示した通りである。被削物の初期形状は1辺135mmの直方体とし、CLデータとして、商用CAMソフトウェアであるHypermillを使用し、図12(a)の素材形状から、直径20mmのスクエアエンドミルによる荒加工後、直径6mmのボールエンドミルによる仕上げ加工を行い、図12(b)の形状を創成する総工具運動ステップ数30000の工具経路を生成して評価を行った。

開発したシステムにおいては、被削物の初期形状は横方向に i 個、縦方向に j 個、高さ方向に k 個のLevel1 Voxelで表現され、さらにLevel1 Voxel 1個には n^3 個のLevel2 Voxelが配置され表現される。今回の評価では被削物の初期形状は立方体としているため、 $i=j=k$ として評価を行う。よって、被削物の1辺は $i \cdot n$ 個のLevel2 Voxelにより表現されることとなり、 $i \cdot n = D$ と置いて評価している。

Table1 Performance of PC

	CPU	GPU
Name	Intel Xeon	Tesla C2050
Clock	3.33 GHz	1.50 GHz
Memory	12 GB	3 GB
CUDA core		448

(a) Stock shape (b) Finished shape
Fig.12 Workpiece shape for experiment

Fig.13 Approximated shape of machined workpiece rendered by the developed system

4.2 試作システムの評価

本評価では $i = n$ とし、被削物 1 辺あたりの Level2Voxel 数 D を変化させて評価を行った。図 13 は各 D における加工終了後の被削物形状の可視化結果である。 D が増えるに従って、表現精度が向上していくのがわかる。

また手法の有用性を評価するため、 D を変化させた場合の処理時間をそれぞれ比較した。その結果を図 14 に示す。

系列 A は 2-1 で述べた Voxel 状態記述を拡張した干渉判定法を導入したもの、系列 B は 2-2 で述べた工具運動のステップ番号を Voxel の属性として記述する手法を導入したもの、系列 C はさらに 2-3 で述べたメモリの設定手法を導入したものである。2-2 の手法の適用により、処理時間は約 5 分の 2 に短縮されている。また、2-3 の手法を導入した結果、A に比べて約 67 分の 1 にまで処理時間が短縮されている。

4.3 Level1, Level2 の Voxel 数の配分による処理時間の評価

4.2 においては $i = n$ として評価を行ったが、被削物 1 辺あたりの Level2Voxel 数 D が同じ場合でも、 i と n の配分の違いによっ

Fig.14 Time required for simulation using each proposed method

Fig.15 Time required for simulation with each number n of Level2 voxel ($D=256$)

Fig.16 Time required for simulation with each number n of Level2 voxel ($D=512$)

て処理時間に差が生じると考えられる。そこで、本評価では $D=256$ と $D=512$ の場合において、 i と n の配分を変化させてシミュレーションの所要時間をそれぞれ測定した。その結果を図 15、図 16 に示す。縦軸はシミュレーション所要時間、横軸は Level1Voxel 1 辺あたりの Level2Voxel 数 n を示している。

D を同一とした場合、Level1 の分割数 i は $i = D/n$ によって決定されるため、 n と i は反比例の関係になっている。 n が大きい場合、GPU 上で同時に処理されるプロセス数が多くなり、並列処理の効果が拡大するため処理時間が減少する。また、工具経路情報等の転送回数が減少することから、各 Level2Voxel の干渉判定に際して必要となるメモリ転送の所要時間が短縮され、干渉判定の効率が向上する。一方で、GPU 内部のレジスタメモリよりも多くの作業用メモリが必要となった場合、GPU 上のテクスチャメモリが使用されるため、処理速度の低下が想定される。また、 i が小さくなるため Level1Voxel が大きくなり、計算が不要な Level2Voxel の判定を省いて状態を更新する機会が減少する。

上記の性質から、適切な Voxel 数の配分が存在すると考えら

れ、今回の評価では D=256, D=512 の場合共に n=32, n=64 付近で最も所要時間が短くなっている。今回、開発の対象とした GPU ハードウェアはアーキテクチャ上の特徴として、同時実行が可能なスレッドの最大数が 448 とされており、これに応じて GPU 内部のレジスタ等が分配されて干渉判定を実施している。試作システムが使用する作業用メモリ等の関係から、n の増加に伴って上記のような効率の向上が見られ、一定以上の数の Level2Voxel を GPU 内部で並列処理しようとした場合には、逆に使用可能なレジスタメモリ総量の関係から処理速度が低下する傾向があることが明らかとなっている。この傾向については GPU の同時実行が可能なスレッド数・レジスタメモリに依存する数値であるため、今後の GPU の性能向上に際しては i および n の最適な分割比は変化することが想定される。

5. 結 言

本研究では、多軸制御 NC 加工を対象とし、Voxel 表現法を用いた切削シミュレーションに要する時間を短縮する手法を開発した。具体的な報告内容は以下の通りである。

- (1) Voxel と工具との干渉判定処理を GPU を用いて並列処理することにより、シミュレーションの所要時間を大幅に短縮する手法を提案した。
- (2) GPU による並列計算の効果を最大限に発揮させるため、Octree 形式の干渉判定を改良した。
- (3) Voxel の属性として工具運動のステップ番号を用いることにより、シミュレーションの所要時間を短縮する手法を開発した。

- (4) Voxel のメモリ配列を並列処理に適した形に変更することで、シミュレーションの所要時間を大幅に短縮した。
- (5) Level1 と Level2 の Voxel 数の配分の違いによってシミュレーション所要時間が変化し、適切な Voxel 数の配分が存在することを明らかにした。

参 考 文 献

- 1) Takeuchi Y. et al : Development of a Personal CAD/CAM System for Mold Manufacture Based on Solid Modeling Techniques, Ann. CIRP, **38**, 1(1989)429.
- 2) 乾正知 : 3 軸数値制御工作機械による曲面加工の高速なシミュレーション, 情報処理学会論文誌, **40**, 4, (1999), 1808.
- 3) 郝明暉 他 : 拡張 Z-map モデルによる CAM システムの開発・オフセット面生成法の一提案, 精密工学会誌, **60**, 2, (1994), 275.
- 4) 岸波建史 他 : Voxel 表現法の機械加工シミュレータへの応用, 精密工学会誌, **55**, 1, (1989), 105.
- 5) 船津竹史 他 : 加工除去領域のボクセルモデルを利用した NC 工作機械のアクティブ制御, 日本機械学会講演論文集, **94**, 1, (2009).
- 6) Balasuabramaniam M. et al : Generating 5-axis NC Roughing Paths Directly from a Tessellated Representation, Computer-Aided Design, **32**, 4, (2000), 261.
- 7) Hauth S. et al : Extended Linked Voxel Structure for Point-to-mesh Distance Computation and its Application to NC Collision Detection, Computer-Aided Design, **41**, 12, (2009), 896.
- 8) 中本圭一 他 : ボクセルモデルを用いたヴァーチャルマシニングシミュレータの開発, 精密工学会誌, **74**, 12, (2008), 1308.
- 9) 乾正知 他 : 3 方向デクセルモデルによる同時 5 軸制御加工の幾何シミュレーション, 精密工学会誌, **76**, 3, (2010), 361.