

Development and application of high speed and high accuracy cutting simulator using Vatti clipping

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2021-07-09 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/00062859

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



Vatti クリッピングを用いた高速高精度
切削シミュレータ開発とその応用

Development and application of high speed and
high accuracy cutting simulator
using Vatti clipping

自然科学研究科機械科学専攻
鬼頭亮太

Abstract

In recent years, 3D CAD/CAM software has become essential for manufacturing complex various mechanical parts. In particular, the cutting simulator is a major processing stream for digital manufacturing. Cutting simulation can verify the shape of a workpiece during cutting. However, because minimization of spatial and temporal resolutions significantly increases the calculation time, the cutting simulator cannot calculate with high resolution in real time. Conventionally, voxel representation is widely used for the data structure in the cutting simulator; however, this study focuses on polygon representation instead of conventional voxel representation to overcome the problem of trade-offs between resolution and calculation time. Specifically, a cutting simulator with high speed and high accuracy was developed using Vatti clipping, which is a fast Boolean operation algorithm in computer graphics. This paper describes problems and solutions encountered during development of a new cutting simulator using Vatti clipping. In addition, the effectiveness of the developed cutting simulator is evaluated using two types of cutting operations.

An example of application using this cutting simulator, this study proposes a new method of tool path generation with suppressing chatter vibration. This cutting simulator can calculate chatter stability diagrams of each cutting point successively owing to its high speed property. Therefore, the tool path without chatter can be generated by tracing points in the stable region. In this paper, details of the generation algorithm of the tool path without chatter using the cutting simulator is presented. And the effectiveness is confirmed by pocket machining with a square endmill by comparing with the conventional tool path.

近年、航空機や自動車などの製造業において、製品の複雑化に伴い、設計、工具経路生成、切削シミュレーションなどを PC 上で行うことが可能になってきている。切削シミュレーションは加工中の工作物形状の確認や工具と治具との干渉検出、切削力の推定などを行うことができる。しかし、高い空間分解能と時間分解能を必要とする切削シミュレータにおいて、分解能を上げると計算時間が増加してしまうため、リアルタイム性は低いのが現状である。市販の切削シミュレータでは、OpenGL などのグラフィックライブラリを用いたシェーディング技術によって、擬似的に切削過程を表現しているに過ぎず、切削力の計算などを含めた詳細な切削過程の正当性は検証できない。

そこで、切削シミュレータに関する様々な研究が行われているが、その多くはボクセル表現と呼ばれる微小な立方体形状を基本概念とする表現方法を用いている。ボクセル表現はこの立方体の集合で工具や工作物を表現し、ブール演算を実施することで、切削過程を表現する。したがって、ボクセル表現における空間分解能はボクセルサイズそのものとなる。例えば、最大ボクセルサイズを 1mm とし、Octree 構造を使用して、直径 4mm、高さ 1mm の円筒を表現した場合、空間分解能が 0.25mm の場合、総ボクセル数は 180 個だが、空間分解能を約 $1\mu\text{m}$ に変更すると、総ボクセル数は 1167 万個になり、空間分解能によって指数関数的にボクセル数が増加する。よって、ボクセル表現の空間分解能には限界がある。

そこで、本研究では従来のボクセル表現ではなく、多角形の面で表現されるポリゴン表現に着目した。ボクセル表現では、ボクセルのサイズが空間分解能を決めるため、単純な形状であっても空間精度の高いモデルを表現する場合大量のボクセルが必要になる。いわば、ボクセルの個数が空間分解能を決める。これに対して、ポリゴン表現を用いたとき、複雑な形状を表現する場合頂点数に依存する。しかし、これら点自体はプログラム上では実数型で保持でき、隣り合う点間距離に制約はないため、頂点数が空間分解能を左右することはない。また、本研究ではポリゴン同士のブール演算を高速に行うことができる

CG 分野の技術である Vatti クリッピングを使用して、切削シミュレータを開発した。

本研究では Vatti クリッピングを使ったポリゴン間のブール演算によって高速高精度切削シミュレータを実現する。具体的には微小時間ごとに計算で求められた加工途中形状の表示や、切削体積計算を計算できる切削シミュレータを開発する。そして、開発した切削シミュレータの高速性を利用したアプリケーション開発を行う。工具微小移動ごとに、開発した切削シミュレータを用いて算出された切削体積を用いて、びびり安定限界解析を行うことによって、びびり振動の有無を判断し、最適な加工点生成を行い、びびり振動が発生しない工具経路生成を行う。そして、実機による加工実験を行い、提案手法の有効性を示す。

本論文は第 1 章緒論と第 6 章結論を含め、全 6 章で構成されており、各章の内容は以下のように要約される。

第 2 章では本研究で用いたライブラリや開発環境に関して述べた後に、ポリゴン表現の特徴や分類を説明し、本論文で使用している重要なブール演算アルゴリズムの Vatti クリッピングに関して詳しく説明した。Vatti クリッピングは 2 次元ポリゴン同士のブール演算を高速に行うことができるアルゴリズムであり、ブール演算の和、差、積全てに対応することができる。Vatti クリッピングはポリゴンに対してブール演算を行う場合、スキャンビームと呼ばれるポリゴンの頂点を通る 2 本の走査線間の水平部分を最下部から最上部まで移動し、徐々に出力ポリゴンを構築していく。交差探索等を行う際に、ポリゴンのエッジ全てに対して行わず、現在のスキャンビームにあるエッジにのみ行うため、処理を行うエッジ数が少なく、高速に行うことができる。また、Vatti クリッピングではポリゴンのエッジを LEFT, RIGHT と分類している。この分類によって、交差形態を区別している。この交差形態のことを交差タイプと呼び、交差タイプに応じた交差処理を行い、ブール演算後のポリゴンを出力している。Vatti クリッピングを切削シミュレータに実装するにあたって、下記に示す 3 つの課題が存在する。

- (1) ブール演算に掛かる計算時間は頂点数に依存し、シミュレーションが進むにつれて、頂点数が増えるため、ブール演算時間も同時に増加してしまう。
- (2) 円を表現する場合大量の頂点を用いた多角形近似が必要になる。
- (3) Vatti クリッピングを 3 次元シミュレータへと展開する必要がある。

この問題点の詳しい説明を行い、次章よりこの問題点の解決方法を説明している。

第 3 章では、2 章で説明した問題点の解決方法を示している。まず 1 つ目の問題点である、頂点数増加による計算時間の増加の解決方法を説明している。本研究では、工作物と工具の大きさの違いに着目した。切削加工の場合、工作物と工具の大きさを比べると、工作物の方が工具より大きくなるため、それを表現しているポリゴンに関しても工作物を表現するポリゴンの方が大きくなる。よって、ブール演算の大半は形状が変化しない部分を計算しており、無駄な処理が発生している。そこで、形状が変化する工具のポリゴン周辺に対してのみブール演算することができれば、最低限の演算で工作物の形状などを計算することができると考えた。本研究では、工作物のポリゴンを格子状に分割し、AABB を用いて、工具周辺のポリゴンをピックアップする。そして、ピックアップされたポリゴンごとにブール演算を行う。よって、工具周辺のみブール演算を実施できるため、頂点数が増加しても計算時間を一定以上増加させずに、ブール演算可能である。

次の問題点である円の表現に関してだが、本研究では、Vatti クリッピングを円弧に対応させることによって、多角形近似による精度と計算時間のトレードオフを解決した。Vatti クリッピングを円弧に対応

させる方法としては、スキャンビームを用いたアルゴリズムの特性を考え、 x , y 座標値最小最大値に頂点があるものとし、交差タイプによって、交点処理を円弧に対応させた。これによって、精度がよく、かつ多角形近似のように大量の頂点を使用せずにブール演算を行うことができ、計算時間も削減することに成功した。

最後の問題点である 3 次元化は、2 次元ポリゴンを積層することによって、3 次元化を実現した。そして、ブール演算を行う際には、工具位置からブール演算に関係のあるレイヤを取り出し、レイヤごとにブール演算を行った。この時各レイヤにインデックスを設置し、ブール演算を行うレイヤを的確に選択することによって、計算時間の削減を行った。

第 4 章では、開発した切削シミュレータの高速性を検証するために、2 種類の工具経路を使用して、シミュレーションを行った。開発した切削シミュレータは 3 章でレイヤを z 方向に積層することによって、3 次元化を実現しているため、 z 方向の移動を行う工具経路では、 z 方向の移動を行わない工具経路より計算時間が多く掛かると考えられる。そこで、 z 方向の移動がない工具経路と z 方向の移動がある工具経路の 2 種類で開発した切削シミュレータの高速性の検証を行った。 z 方向の移動がない工具経路であるポケット加工のシミュレーションでは予想加工時間より短い時間でシミュレーションを行うことができた。また、ポケットの隅部で切削力が増加することを確認した。 z 方向の移動がある工具経路のスパイラル加工では、ポケット加工に比べリアルタイム性が低い結果となったが、一般的な加工と同等の時間でシミュレーションすることができた。

第 5 章では、工作機械における切削加工中に生じる問題の一つとしてびびり振動を低減する工具経路生成方法に関して説明している。本手法では、スクエアエンドミルを使用した軸方向切り込み量に変化しない加工を対象とし、主軸回転数、送り速度、軸方向切り込み量、工具初期位置、加工領域、工具刃先のコンプライアンスを入力パラメータとして工具経路生成を行う。1 回転当たりの送りごとにびびり振動の有無を判断できるびびり安定限界解析を行いびびりが発生しない加工点を生成することによって、工具経路全体通じてびびり振動が発生しない工具経路が得られる。そこで本手法では、工具初期位置から 1 回転当たりの送り量だけ離れた位置に次の加工点候補を生成し、その加工点候補ごとに開発した切削シミュレータを使用して、切削体積を計算し、この切削体積を用いて安定限界解析を行い、指定した主軸回転数での安定限界切り込み量を計算する。そして、加工点候補の中から最適な加工点を選択し、この計算を繰り返し行うことで、工具経路生成を行った。本手法を用いて、側面加工、溝加工、ポケット加工の 3 種類の工具経路生成を行い、ポケット加工においては、実加工を行いその結果、びびり振動を低減でき、切削力を一定にすることができた。

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

Vatti クリッピングを用いた高速高精度切削シミュレータ開発とその応用

2. 論文提出者 (1) 所 属 機械科学 専攻

(2) 氏 名 鬼頭 亮太

3. 審査結果の要旨（600～650字）

当該学位論文に関し、令和3年2月2日に第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文および関連資料について詳細に検討した。令和3年2月2日に口頭発表後、第2回学位論文審査委員会を開催し、慎重に協議の結果、以下の通り判定した。

本論文は高速で高精度な切削シミュレータの開発とその応用について論じている。本論文では、形状を多角形の面で表現するポリゴン表現に着目した。この表現では隣り合う点間距離に制約はないため、頂点数が空間分解能を左右することではなく、しかもポリゴン同士の演算を高速に行うことができる。この表現形状に対し、CG分野の技術である Vatti クリッピングを用い、加工途中形状の表示や、切削体積を計算できる切削シミュレータを開発した。また、その応用として、これを用いて算出された切削体積を用いてびびり振動の有無を判断し、最適な加工点生成と工具経路生成を行った。生成された経路を用いて実機による加工実験を行い、提案手法の有効性を示した。

以上のように本論文は、切削加工における新しい発想のシミュレータの核心技術を開発しており、学術的価値ならびに生産加工学への貢献度がともに高いと評価できる。よって、本論文は博士（工学）論文に値すると判定する。

4. 審査結果 (1) 判 定 (いずれかに○印) 合 格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博 士 (工 学)