速報

5 軸制御切削加工における工具姿勢の高速な決定法
－ グラフィックスハードウェアの能力を利用した工具干渉の検出 －

Fast Generation Method of Tool Posture for 5-Axis Control Machining
- Detection of Interference between workpiece surface and cutting tool -

金子 順一*，堀尾健一郎**

Jun'ichi KANEKO and Kenichiro HORIO

This study deals with generation of tool posture in continuous 5-axis control machining. In NC programming for such machining process, determination of tool posture is important. Especially, in fabrication of complicated workpiece, detection and avoidance of collision between cutting tool and workpiece surface are quite difficult. In the conventional studies, planning method of tool posture known as 2D C-Space method has been proposed. In this method, range of machinable posture is described as domain on polar coordinates system. Because estimation of the machinable domain requires vast amount of geometric calculation for each tool location, an efficient calculation method is required. In this study, we propose a new fast calculation method for the machinable domain. The proposed method is based on simple assumption that the collision can be regard as intersection between line of view and offset surface. We propose a new idea of unique view field, which can change projective method from Cartesian coordinates system to polar coordinates system by one rendering process. Then, we develop a new drawing algorithm using ability of the latest graphics hardware. From performance of the developed prototype system, it is confirmed that the proposed method can attain extraordinary improvement in the estimation time.

Keywords: Five axis control machining, Path planning, Tool posture, GPU computing, CAM

1. はじめに

5 軸制御加工機を用いたエンドミル加工では，加工中に生じる工具軸・チャックと被削物等の周辺環境との衝突・干渉を事前に検出し，これを回避した工具姿勢を決定する必要がある．この工具姿勢の決定手法として，従来からボールエンドミル加工を対象に，工具の取りうる姿勢の範囲を 2 次元極座標上の領域として導出する 2 次元 C-Space[1)]が提案されている．図 1 に示すように，干渉の生じない工具姿勢候補を二つの工具姿勢角度 θ,ϕ によって規定される 2 次元平面上の範囲として評価することにより，連続的に変化する工具姿勢の決定が容易に実現できると期待される．

この工具姿勢候補の範囲は，工具刃の中心に対する周辺環境との相対位置によって決定される．そのため，狭い溝形状の底部の仕上げ等，同時 5 軸制御が必須となる加工では，しばしば工具移動に伴って加工が可能な工具姿勢の範囲が急激に変化する．このような加工を対象とする際には，多数の工具位置において非干渉領域の導出を行う必要があり，計算時間の短縮が C-Space 法の実用化に際しての課題となっていた．そこで本報告では，この加工可能工具姿勢範囲の導出を，PC 等に搭載されている 3 次元グラフィックスハードウェア(GPU:Graphics Processing Unit)を用いて高速化する手法を提案する．GPU は，3 次元コンピュータグラフィックスを描画する際に必要となる座標変換・交差検出・陰面処理等を専用の回路で高速・並列に実行する機能を備えており，NC 加工においては Z-map 表現を用いた被削物形状の可視化 [2)] や逆オフセット法による工

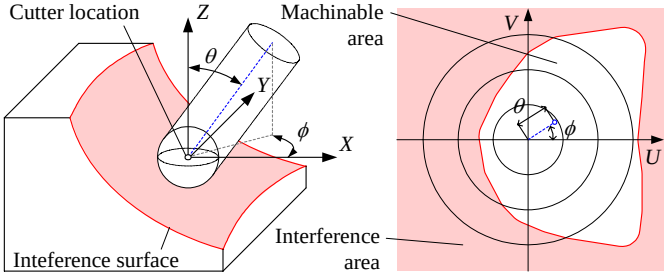


Fig.1 Representation of machinable posture by 2D C-Space

*埼玉大学 大学院 理工学研究科
Department of mechanical engineering, Faculty of Engineering, Saitama University, 255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama, Saitama, 338-8570, Japan

（原稿受付日：平成18年 4月17日）

具経路の作成[3] 等の応用例が提案されている．本研究では，GPU 内部の処理を自由に変更可能なプログラマブルシェーダ[4] を用いて各工具姿勢における干渉の検出を行い，加工可能工具姿勢範囲を 3DCG として直接描画する手法を提案する．工具運動に伴う加工可能工具姿勢範囲の変化を連続的に導出・参照することにより，干渉を回避しながら連続的に変化する工具姿勢を高速に決定することが可能になると期待される．

2. 工具姿勢候補の 3DCG 描画による導出

2.1 オフセット面の描画による干渉の検出

本研究では 2 次元 C-Space 上の加工可能工具姿勢範囲を，3D グラフィックスの描画過程を経て出力されたイメージとして直接導出する方法を提案する．図 2 は本研究で提案する干渉判定法の基本的な概念を示す．被削物・把持具等の周辺環境の形状を工具軸の半径だけ法線方向に移動したオフセット面を設定し，工具刃の中心 ***CL*** を通る直線を設定する．このとき，工具が曲面加工等において通常用いられるボールエンドミルであるとすると，工具姿勢の変化に対して工具刃の中心 ***CL*** は一定の位置にある．このとき，直線上で干渉の有無を検討する範囲に対応する線分 ab がオフセット面と交差することと，その線分に中心軸が一致する工具姿勢において干渉が生ずることは等価であると考えることができる．

そこで，この線分をある視点からオフセット面を見る方向に設定された視線とみなし，各視線がオフセット面と交差するかどうかを GPU による描画結果から判定することを考える．具体的には，図 3 に示すように ***CL*** を中心として一定の半径をもつ基準球を配置し，被削物・オフセット面の外部から ***CL*** に向いた複数の視線を設定する．描画結果において各視線に対応する画素の色は，***CL*** から最も遠い位置で視線と交差した面のもつ色によって決定される．基準球とオフセット面の色をあらかじめ異なるものに設定しておくことにより，描画色から工具が干渉するかどうかの判断が可能となる．

提案する手法では，異なる方向から CL に向かって

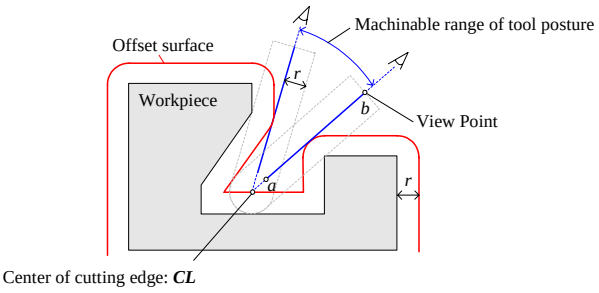


Fig.2　Interference detection using offset surface

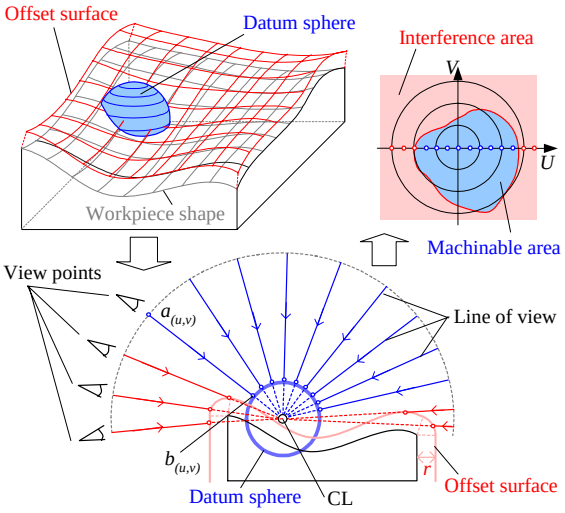


Fig.3 Outp　　ı 2D
C-Space by drawing process

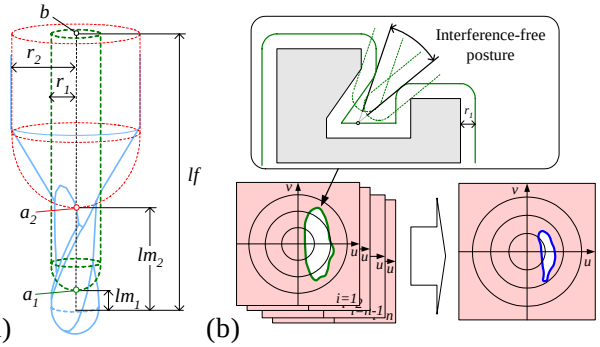


Fig.4 Consideration of tapered neck based on several rendering results

て設定されたすべての視線が，同一の視野内に収まる視界をプログラマブルシェーダの機能を用いて設定し，オフセット面と基準球の外部からの見え方を描画する．これにより 1 回のコンピュータグラフィックスの描画によって全ての工具姿勢候補に対する干渉の検出が実現される．

2.2 工具軸・チャック部分の径変化への対応

実際の加工では，主軸部分の剛性確保のため，短い突き出し量での工具把持条件や，テーパのついた軸を有する工具の使用が行われている．オフセット

面を用いた判定においては通常，周辺環境のオフセット量を単一のものしか設定できない．そこで，本研究では図 4(a)に示すように工具軸・主軸部分の形状を包含する複数の円筒領域の集合を設定し，これと周辺環境との干渉の検出を行うことを考える．ある円筒領域 i のうち，***CL*** に近いほうの端面は円筒部分と等しい半径 r_i を持ち，工具刃中心から lm_i+r_i だけ離れた位置を中心とする半球になっているとする．このとき，図 4(b)に示すように，各円筒領域に対して r_i だけ被削物・把持具の表面形状を外側にオフセットした面を設定し，個々の円筒領域に関して干渉の生じない工具姿勢範囲を導出する．これらの積領域は，工具全体が周辺環境と干渉を生じない工具姿勢範囲と等価になると考えられる．

3. GPU に対応した幾何処理アルゴリズム

GPU は本来，3DCG を描画するために設計されたデバイスであるため，視界の設定や描画対象の形状に関して様々な近似を行うことを前提としている．

本研究で提案する手法では，オフセット面を微小な三角形の集合として平面で近似し，これに対する視線交差の有無を 2 次元 C-Space 上での被削物形状の見え方を描画することによって直接取得する．CL に対して周囲から視線が集まり，それぞれの視線が 2 次元 C-Space 上で等間隔に格子状に並ぶ特殊な視界を設定することにより，一度の描画で 2 次元 C-Space 上における加工可能工具姿勢範囲を 3DCG として取得することが可能となる．

GPU による描画において，視界の設定は視点に対する各微小三角形の頂点座標を正規化空間に順次投影することによって反映される．図 5 は一般的な投射投影の例を表す．元の視線に対する頂点の相対位置から，視線が平行に存在する正規化空間上での頂点座標が評価され，最も視点に近い位置にある微小三角形の色が出力画面上の色として出力される．

本研究では，非線形な変換式を用いて 2 次元 C-Space の定義に基づいて正規化座標系上に微小三角形の頂点座標を直接投影する．図 6 はその概要

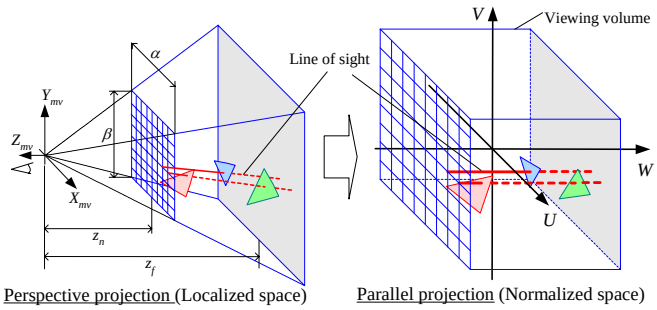


Fig.5 Conventional transformation of projection system

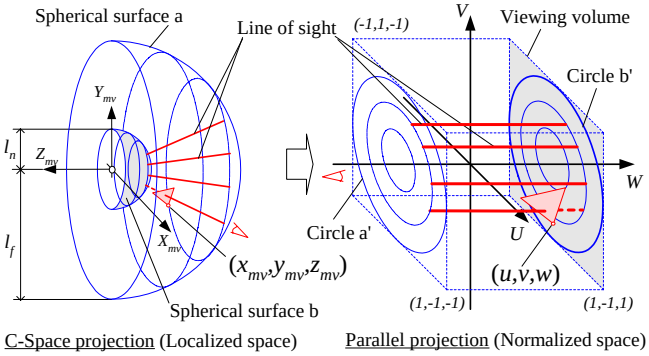


Fig.6 Developed transformation from C-Space projection to parallel projection

を示す．このとき，この投影に対応する視野の範囲は CL を中心とする二つの球面にはさまれた領域となり，それぞれの視線は外側の球面から CL に向かって内側の球面まで伸びる線分に相当する．

各頂点座標の変換式を式 1,2,3 に示す．ここで (x_{mv},y_{mv},z_{mv})は描画対象のモデル座標系における頂点座標を表し，(u,v,w)はそれが投影された正規化座標系における頂点座標を表す．θ_{max} は加工可能工具姿勢範囲を求める際に考慮する最大の工具傾き角であり，描画結果において画面の外縁に内接する円周上の各位置に工具姿勢がある状態に対応する．

この座標変換および，投影された微小三角形の前後関係の判定は， CPU ではなく全て GPU の内部で処理され，結果が画面に出力される．多数の処理ユニットが並列動作する GPU の幾何演算機能を用いることにより，CPU のみによる処理に比べて飛躍的な高速化が実現することが期待される．

$$u=\arccos\left(-z_{mv}\Big/\sqrt{x_{mv}^{2}+y_{mv}^{2}+z_{mv}^{2}}\right)\Big/\theta_{\max}\times x_{mv}\Big/\sqrt{x_{mv}^{2}+y_{mv}^{2}} \quad (1)$$

$$v=\arccos\left(-z_{mv}\Big/\sqrt{x_{mv}^{2}+y_{mv}^{2}+z_{mv}^{2}}\right)\Big/\theta_{\max}\times y_{mv}\Big/\sqrt{x_{mv}^{2}+y_{mv}^{2}} \quad (2)$$

$$w=\left(l_f-\sqrt{x_{mv}^{2}+y_{mv}^{2}+z_{mv}^{2}}\right)\Big/\left(l_f-l_n\right)\times 2-1 \quad (3)$$

4.　計算機実験による検証

本報告で提案した手法の有効性を検証するため，OpenGL グラフィックライブラリと，そのプログラマブルシェーダーカスタマイズ用ライブラリである GLSL(OpenGL Shading Language)を用いた実装手法の検討を行い，プロトタイプのシステムを構築した．

図 7 は検証に用いた被削物の形状と工具刃中心の軌跡を表す．被削物はオーバーハングを有する曲面からなる溝形状を有しており，工具はこの溝の内面を下部から等高線状に順次移動して加工を行う．各工具位置における工具刃の中心座標を作成してシステムに与え，それぞれの工具位置における 2 次元 C-Space 上の加工可能工具姿勢範囲を導出し，干渉の生じない工具姿勢の決定を行った．

図 8 は，図 7 中の工具位置 a および b における加工可能工具姿勢範囲の描画結果を示す．加工可能工具姿勢と干渉の生じる工具姿勢とを区別するため，工具刃の中心に一致するように配置された基準球面の色として黒を設定し，被削物のオフセット形状の色相を視点からの距離に応じて変化させている．このとき，2 次元 C-Space 上における加工可能工具姿勢の範囲は，GPU の描画結果において基準球面の色が現れる黒の範囲に相当する．本実行例では工具刃中心と視界との距離 l_n を工具刃および工具軸部分の半径と同じ 3mm とし，視野界の最遠部と視点との距離 l_f を工具刃の中心が溝の中のいかなる位置にあってもオフセット面を包含する 200mm としている．

計算には，CPU に Athlon64 2200Mhz，GPU に GeForce7800GTX 430Mhz を持つ主記憶容量 1024MB の PC を用いた．プロトタイプのシステムは 1067226 個の微小三角形から構成されたオフセット面に対して 1 工具位置あたり平均 0.051 秒で加工可能工具姿勢範囲を描画し，図 9 に示すような連続的に変化する工具姿勢を決定することが可能であった．この結果から，本計算手法の適用により，CAM ソフトウェア等が備える加工シミュレーションにおける加工状況の可視化と同程度の速度で加工可能工具姿勢範囲を導出することが可能であることが確認された．本手法を用いることによって，加工面の高品質化に伴う各種の条件を考慮しながら工具姿勢をリアルタイムな処理によって決定することが期待される．

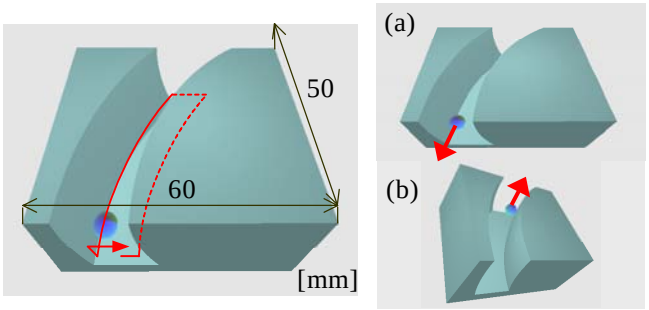


Fig.7 Workpiece shape and movement of cutter location for verification of prototype system

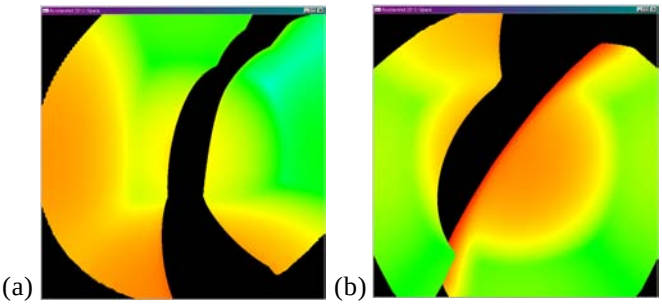


Fig.8 Rendered images of machinable area on 2D C-Space

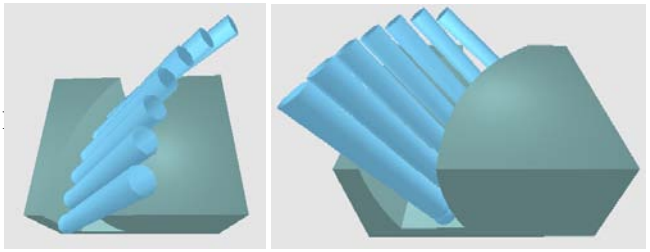


Fig.9 Planned tool postures with referring rendered images

参考文献

1) 森重功一 他: 2 次元 Configuration 空間を用いた 5 軸制御加工における工具干渉回避法, 精密工学会誌, 62, 1(1996) 80.

2) 乾正知 他: NC 加工結果の高速な可視化手法－ 3 次元グラフィックス表示装置の利用-, 精密工学会誌, 65, 10(1999), 1466.

3) 乾正知 他: NC 加工命令の高速な作成手法-逆オフセット法のハードウェアによる高速化-, 精密工学会誌, 66, 12(2000), 1901.

4) 金井崇: グラフィックスハードウェアを用いた幾何処理, 精密工学会誌, 69, 4(2003), 482.