拡張 C-space を用いた戦略的 5 軸制御加工パス決定法*

高杉敬吾** 大上泰輝*** 林 晃生† 森本喜隆† 浅川直紀**

Strategy of 5-axis Tool Path Determination Using Extended C-space

Keigo TAKASUGI, Yoshiki OGAMI, Akio HAYASHI, Yoshitaka MORIMOTO and Naoki ASAKAWA

This study describes a method to determine a 5-axis tool path in a CNC machine tool. In general, the tool path is determined by two steps: main and post processor. First, positions and postures of the tool are determined in the main processor. After that, travel amount of each axis is calculated based on form shaping theory in the post processor. Therefore, it is difficult to determine especially tool postures considering the axis travel amount in the conventional CAM. In order to solve this problem, this study proposes extended C-space, which is generated from form shaping surfaces defined by the form shaping function analogically, and several strategical constraints can be added to the axis travel amount. This paper describes two strategies as implementation examples of extended C-space. One is minimization strategy of angle change in rotation axes, and the other is minimization strategy of power consumption in all axes. Finally, these effectiveness are confirmed by machining.

Key words: CAM, form shaping function, parametric surface, energy consumption

1. 緒 言

5 軸制御加工用工具経路（パス）を生成する場合、CAM は必要不可欠である。CAM ではまず、メインプロセッサにおいて工具の工作物に対する相対的な位置、姿勢を算出した後、ポストプロセッサにおいて工作機械の各軸移動量へと換算され、CNC プログラムが生成される。このとき、工具の位置、姿勢から軸移動量への変換には形状創成関数¹⁾が一般的に用いられる。形状創成関数は、工作物座標系から機械座標系までの座標変換を各軸の持つ座標変換行列の積によって表現したもので、5 軸工作機械においては長坂ら²⁾によって一般化されている。ただし、ここで述べる 5 軸とは並進 3 軸+回転 2 軸で構成されているものを言う。

形状創成関数を用いるためには、工具の位置、姿勢があらかじめ何らかのアルゴリズムに基づいてメインプロセッサ上で決定されている必要があるが、位置は加工面の幾何情報やパスの形態に基づいて比較的容易に決定することが可能³⁾であるものの、姿勢の決定には困難を要す。とりわけ、工具と非加工部との干渉回避が必須であり、パスの連続性を考慮しながら姿勢を決定していく必要がある。森重ら⁴⁾はコンフィグレーション空間（C-space）と呼ばれる回転 2 軸の回転量によって構成される座標系内に干渉領域を表現することで、視覚的かつ効率的に干渉のないパスを生成する手法を提案しており、C-space は今日の重要な概念となっている。

さて、上述の通り現在の CAM システムでは、メインプロセッサとポストプロセッサの役割は明確に分けられており、かつそれは基本的には一方通行のシステム（図 1）となっていることから、逆にポストプロセッサ上で算出された工作機械の軸移動量に対して何らかの拘束条件を設けつつ工具の位置、姿勢を決定することは既存の CAM システムでは難しいといった問題を含んでいる。例えば、最も精度の悪い軸あるいは送り速度の遅い軸はなるべく使わないといった工作機械側から生じる事由に起因

Fig.1 Data flow from 3D-CAD model to CNC program around CAM

して、CAM システム上を遡って工具位置、姿勢を決定できない。

そこで本研究では、形状創成関数によってアナログ的に定義される形状創成曲面を生成することで、軸移動量に対して種々の戦略的な拘束条件を付加することのできる、拡張 C-space を提案する。形状創成曲面は並進 3 軸移動量を直交軸として取った 3 次元空間上のパラメトリック曲面であり、その曲面パラメータは回転 2 軸の回転量となる。よって曲面パラメータから成る領域は C-space そのものを表現する。形状創成曲面を構築するためには、あらかじめ工具位置を決定しておく必要はあるが、工具姿勢はポストプロセッサ内で定義された形状創成曲面上の 1 点を選択することで決定される。すなわち、軸移動量を工作機械側の事由、戦略に基づいて決定することで、可逆的に工具姿勢を求めることができるようになる。またこの軸移動量を決定するための戦略として、従来 2 次元で表現されていた C-space に新たなパラメータを設け、3 次元に拡張した C-space を提案する。

本報では、この追加パラメータとして回転角度変化量と、全軸移動量から算出される消費電力量の 2 種類をケーススタディとして取り上げ、拡張 C-space による戦略的な姿勢決定法の有用性について言及する。

2. 形状創成曲面

まず、形状創成関数からの帰着として生成される形状創成曲面について述べる。ここで本報では、図 2 に示す、テーブル側に回転、旋回軸を有するチルト形 5 軸工作機械を対象とする。この工作機械は、テーブル側から主軸に向かって $C(\theta)$, $A(\phi)$, $Y(y)$, $X(x)$, $Z(z)$ の順で軸が構成されている。ただし括弧内の文字は各軸の移動量を表す。また、工具の位置ベクトルを $P = [p_x \ p_y \ p_z]^T$ 、姿勢

* 原稿受付 平成 30 年 10 月 2 日

掲載決定 平成 30 年 12 月 21 日

** 正 会 員 金沢大学（石川県金沢市角間町）

*** コーセル株式会社（富山県富山市上赤江町 1-6-43）

正 会 員 金沢工業大学（石川県白山市八東穂 3-1）

Fig.2 Axis component of 5-axis machine tool

Fig.3 Vector representation for tool position and posture

ベクトルを $T = [t_x \ t_y \ t_z]^T$ とし、図 3 に示すようにこれら P, T がそれぞれ工具の中心および工具軸ベクトルと一致するように設定すれば、この工作機械の形状創成関数は次のように表される。

$$P = \begin{bmatrix} x \cos \theta - y \cos \varphi \sin \theta + z \sin \varphi \sin \theta \\ x \sin \theta + y \cos \varphi \cos \theta - z \sin \varphi \cos \theta \\ y \sin \varphi + z \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T = \begin{bmatrix} \sin \varphi \cos \theta \\ \sin \varphi \sin \theta \\ \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

冒頭で示したとおり、従来の CAM では P および T はメインプロセッサ上であらかじめ決定されるため、各軸移動量は式(1)および(2)の連立方程式の解として得られる。より具体的には、まず式(2)によって φ, θ が得られ、それらを式(1)に代入することによって x, y, z が得られる。よって工具姿勢 T が未知の場合は、式(2)から φ, θ を求めることができず、軸移動量を算出することができない。そこで、式(1)を次のように置き換える。

$$P = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\cos \varphi \sin \theta & \sin \varphi \sin \theta \\ \sin \theta & \cos \varphi \cos \theta & -\sin \varphi \cos \theta \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)右辺の行列成分は回転角度のみで表され、ベクトル成分は並進移動量のみで表されており、それぞれ G, S とおけば、

$$S = G^{-1}P \quad (4)$$

と変換できる。本研究では P は既知であるとするため、式(4)は $S(x, y, z) = S(\varphi, \theta)$ あるいは、 $S(x, y, z) = S(x(\varphi, \theta), y(\varphi, \theta), z(\varphi, \theta))$ と表現でき、 S をパラメトリック曲面、 (φ, θ) を S の曲面パラメータと解

Fig.4 Correspondence between form shaping surface and its parametric domain

Fig.5 Example of 5-axis tool path determination using geometrical constraint on form shaping surface

Fig.6 Schematic of extended C-space

析することができる。よって本研究では S を形状創成曲面と呼ぶことにする。形状創成曲面の概念図を図 4 に示す。2 つの曲面パラメータによって構成されるパラメータ領域は、2 次元 C-space そのものである。このパラメータ領域上の 1 点、すなわち回転角度を指定すれば、式(4)によって並進移動量も一意に求まり、5 軸全ての移動量が決定する。

以上をまとめると、次のようなステップにより各軸移動量を得ることができる。まず、従来通り加工面の特徴やパスの形態から工具位置 $P_i (i=1, 2, \dots, N)$ を設定する。ただし、 N は総加工点数である。次に、各 P_i において形状創成曲面 S_i を与え、そのパラメータ領域上で何らかの戦略によって回転角度 $(\varphi, \theta)_i$ を指定することで、式(4)により並進移動量 $(x, y, z)_i$ を得る。なお、 S_i 上で幾何学的方法により $(x, y, z)_i$ および $(\varphi, \theta)_i$ を算出することも可能であり、並進移動量に拘束をかけたパスの生成が可能となる。例えば図 5 に示すように S_i と x - z 平面との交線を幾何学的に求めれば、その交線は y 軸移動量が拘束された姿勢の集合を表すことになる。さらにその交線に対し、C-space 上の干渉領域を考慮しつつ何らかのアルゴリズムによって (φ, θ) を一意に決定すれば、 y 軸移動が無かつ干渉の無いパスを生成することが可能となる。ただし本報では、これ以上の形状創成曲面に対して幾何学的拘束条件を設定する 5 軸パス生成法に関する言及は割愛する。次章ではパラメータ領域上で (φ, θ) を決定するための戦略を説明する。

Table 1 Relationship among power consumption, feed rate and feed direction in each axis

Feed drive axis and direction		Power consumption W in each feed rate mm/min deg./min							
		250		500		750		1000	
X-	X+	30.39	30.11	31.50	32.16	34.23	35.71	39.36	40.22
Y-	Y+	69.27	62.06	64.00	61.25	65.93	66.99	73.08	72.00
Z-	Z+	430.83	607.96	425.54	599.85	422.87	611.74	432.02	628.98
A-	A+	12.75	23.67	24.08	40.04	40.77	62.91	61.73	85.94
C-	C+	9.23	9.03	15.34	14.73	23.40	22.62	33.06	31.41

Table 2 Approximated power consumption in each axis

Feed drive axis and direction		Power consumption P W	
X-	X+	33.87	34.55
Y-	Y+	68.07	65.57
Z-	Z+	427.8	612.1
A-	A+	$5.736 \times 10^{-2} f$	$8.484 \times 10^{-2} f$
C-	C+	$3.231 \times 10^{-2} f$	$3.093 \times 10^{-2} f$

Table 3 Experimental condition

Feed rate mm/min	250
Spindle speed min ⁻¹	2000
Workpiece material	A5052
Tool	φ6 Ball endmill (Coated carbide)

Fig.7 Machining surface and tool path definition

(a) without collision region

(b) with collision region

Fig.8 Example of extended C-space by power consumption

3. 拡張 C-space

C-space 上の一点を一意に決定する方法として森重ら⁹⁾は C-space 上で干渉領域との近接度を拘束条件とし、干渉の可能性が最も低い姿勢を選択するアルゴリズムを提案している。本報では、同様に C-space 上で姿勢選択を行うが、その拘束条件に、より工作機械あるいは加工オペレーション上の要求を考慮した手法として回転角度変化最小化戦略と、消費電力量最小化戦略を提案する。

3.1 回転角度変化最小化戦略

5 軸加工機において回転軸は並進軸に比べ機械精度を出にくく、また、形状創成論的観点からも特異点の問題¹⁰⁾を常に意識しないといけないことから、加工面品位を悪化させる要因となる事が多く、なるべく回転角度変化を最小にしたい。そこで回転角度変化最小化戦略を提案する。本戦略では、ある加工点 P_i における姿勢を決定する際に、 P_{i-1} からの ϕ および θ それぞれの変化量を $\Delta\phi_i$, $\Delta\theta_i$ とすれば、回転角度変化量 R_i を

$$R_i = \Delta\phi_i + \Delta\theta_i \quad (5)$$

とし、2 次元 C-space の追加次元として 3 次元 C-space をまず構築する。 R_i は陽に表現された曲面として定義され (図 6)、また従来

の 2 次元 C-space 上で表現される干渉領域はその曲面上に射影して考えることができる。よって回転角度変化を最小化することは、曲面上の干渉領域を避けつつ最小点 $R_{i,min}$ を探索することと同意となる。

3.2 消費電力量最小化戦略

林ら⁷⁾の報告によれば、工作機械における送り駆動系に係わる消費電力は全体の消費電力に比べ少ないものの、工場全体のスケールで考えれば無視することはできず、工具経路の工夫により消費電力の削減が期待できる。

本戦略では、回転角度変化最小化戦略と同様、 P_{i-1} から P_i への各軸移動量 $\Delta\Xi_i$ (ただし、 $\Xi = x \cup y \cup z \cup \phi \cup \theta$) から算出される各軸の消費電力量 $W_{\Xi i}$ およびその総和を W_i として次のように定義し、拡張 C-space を生成する。

$$W_i = W_{xi} + W_{yi} + W_{zi} + W_{\phi i} + W_{\theta i} \quad (6)$$

$$W_{\Xi i} = \frac{P}{f} \cdot \Delta\Xi_i \quad (7)$$

$W_{\Xi i}$ は、各軸の送り速度と消費電力との関係をあらかじめ測定し

Fig.9 Comparison of axis travel amount among each strategy

Fig.10 Comparison of power consumption amount among each strategy

Fig.11 Comparison of machined surface amount among each strategy

ておき、送り速度の一次関数として線形近似した消費電力 P_3 を測定時の送り速度 f で除したものに、 $\Delta \exists_i$ を掛けることによって得ることとする。ただし、 f は並進軸では mm/min、回転軸では deg/min の単位を持つものとする。また、同じ軸であっても、送り方向によって消費電力は異なることから、拡張 C-space 上においても送り方向を区別する。本研究で用いた 5 軸加工機に対し、クランプオンパワーロガーを用いて測定した消費電力と送り速度の関係を表 1 に示す。今回用いた工作機械構造の場合、重力に対して常にサーボブレーキを必要とする Z 軸の消費電力が最も多く、また Z 軸の上昇 (+ 方向)、下降 (- 方向) の違いにおいても大きな差が見られる。また Z 軸同様、A 軸も重力に逆らって駆動する必要があり、移動方向の違いによって電力が大きく異なる結果となっている。表 1 の結果に基づいて算出した P_3 を表 2 に示す。並進 3 軸は送り速度の影響をあまり受けなかったため、平均値として定数を採用した。逆に回転軸は送り速度に大きく依存していたため、送り速度の 1 次関数とし、送り速度に合わせて値を変えることとした。

W_i は回転角度変化量 R_i と同様に扱うことができ、図 6 に示し

たように拡張 C-space 上の曲面として定義され、その最小点 $W_{i \min}$ を探索することで消費電力量最小化を達成できる。

4. 検証実験

4.1 実験条件

上記 2 つの戦略の有用性を検証した。図 7 に示すようにオーバーハングした 10° の傾斜を持つ円筒面の仕上げ加工を対象とし、Z 軸方向に等高線となるようピッチフィード 1mm で 30 本のパス P_i をあらかじめ算出しておき、回転角度変化最小化戦略および消費電力量最小化戦略に基づいて各軸移動量を決定、NC プログラムを作成し実加工を行った。また比較対象として、森重ら⁴⁾が提案した安全第一加工戦略に基づいたパスを従来手法として作成し、3 者による比較検討を行った。なお、森重らは干渉領域からの近接度が最も低い点を、非干渉領域に対してドロネー三角形分割法を用いることによって探索する手法を提案しているが、本報では単純に非干渉領域の重心を採用することで安全第一加工戦略の代替とした。その他の実験条件は表 3 に示す。ここで、本検証実験では各戦略を比較する上で加工時間のばらつ

きの影響を除外するため、3 つの戦略とも同じ送り速度、パスを採用することで、加工時間はほぼ等しい 847 秒となっている。このとき、送り速度は同時 5 軸加工における工具工作物間の相対速度であるため、B, C 軸の回転量に応じて実際の送り速度は変化する。すなわち、指令点間の回転角度変化が大きい場合は送り速度が増大し、消費電力の観点からは不利となると考えられる。

なお本章では以降、回転角度変化最小化戦略を RS、消費電力量最小化戦略を ES、安全第一加工戦略を SF と略記することとする。

図 8 は、図 7 で示したパス上のある 1 点において生成された消費電力量に関する拡張 C-space を一例として視覚化したものである。図 6 では陽関数表現された曲面として表現したが、実装上は離散点として計算を行っている。本検証実験では、 ϕ は 0° から 90° まで、 θ は 0° から 355° までをそれぞれ 5° 間隔に分割している。また図 8(a) は干渉領域を考慮しなかった場合、(b) は考慮した場合の結果を示しており、(b) における $W_{i,min}$ を $i=1$ から N まで順次選択していくことで干渉回避を考慮したパスが生成される。

4.2 実験結果

図 9 はまず、各戦略において生成されたパス全域における全軸移動量をプロットしたものであり、SF を(a)、RS を(b)、ES を(c)にそれぞれ示す。本報で対象とした工作物形状は比較的プリミティブであることから、各加工点において干渉領域が大幅に変化することが無く、その結果 SF や RS での回転軸移動量はほとんど変化しない結果となった。しかし、SF では非干渉領域の重心を追うため微小な変化が生じてしまうのに対し、RS では $R_{i,min}$ の位置(ϕ, θ)が変わらなかったことから加工開始から終了まで一定値をとる結果となり、回転角度変化最小化を達成できていることが分かる。また ES では、回転角度変化は SF, RS と比べ大きいものの、消費電力の最も大きい Z 軸の上昇が無いことが確認できる。すなわち、Z 軸の上昇を回転 2 軸によって代替していることが分かる。

図 10 は各戦略における消費電力量を比較したものである。回転 2 軸は比較的消費電力量が小さいのに比べ、Z 軸は総消費電力量において大きな割合を占めている。そのため、前述の通り ES では回転角度変化が大きいことから回転軸の送り速度が SF, RS と比べ大きくならざるを得ず、消費電力上不利となるものの、-Z 軸移動量の削減効果によって、SF と比べ実に 70%近い削減率を達成できており、本手法の有効性が確認できたと言える。ただし、設定する送り速度によっては、機械の最大送り速度を超えてしまうケースも考えられ、その場合は加工時間をやや犠牲にせざるを得ないことから、加工時間と各戦略上の優位性を同時に考慮可能な手法を今後実現していく必要がある。

最後に図 11 はそれぞれの加工結果の外観を示している。今回用いた加工ワークでは、外観上の戦略毎による有意な差は見ら

れず、RS による加工面品の向上の確認には至らなかった。これは、1 つの等高線上のパスに対して回転軸移動方向の切り返しがいずれの戦略においても無く、ロストモーションが生じなかったためと考えられる。よって、回転軸の切り返しを必要とする複雑な加工面に対して比較検証を行えば、RS の有効性を示すことができると考えられるが、今後の検討課題である。

5. 結 言

本研究では、従来難しかった工作機械の駆動軸に拘束条件を設けることのできる、新たな 5 軸制御加工用パス生成法を提案した。具体的には、形状創成関数からアナログ的に定義される形状創成曲面を用いることによって、工作機械各軸の移動量に設けられた種々の拘束条件から可逆的に工具姿勢を一意に決定できることを示した。またその拘束条件として、本報では回転角度変化最小化戦略および消費電力量最小化戦略の 2 つを提案した。これらの戦略は、回転 2 軸の移動量を座標系にとった従来の 2 次元 C-space を拡張した 3 次元 C-space 上の曲面として表現され、その曲面上の最小値を探索することによって最小化戦略を達成できることを示した。

また、本手法適用による有効性の検証を行った。その結果、回転角度変化最小化戦略では加工面品位における有意差を期待したが、今回の加工結果では確認できなかった。しかし、より回転軸の切り返しが生じやすいパスでは有効であると考えられる。また消費電力量最小化戦略では、従来提案された手法と比べ 70%近い省電力化が確認され、本手法の有効性を示した。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり多大なご協力を頂いた、松本隆一氏をはじめとする、株式会社 C&G システムズの諸氏に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) D. N. Reshetov et al.: Accuracy of Machine Tools, ASME press 1988.
- 2) 長坂学, 他: 形状創成関数に基づく 5 軸制御加工用一般化ポストプロセッサの研究, 精密工学会誌, **62**, 11 (1996) 1607.
- 3) D. Dragomatz et al.: A classified bibliography of literature on NC milling path generation, Comput.-Aided Des., **29**, 3 (1997) 239.
- 4) 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.
- 5) 森重功一, 他: C-Space に基づいた 5 軸制御加工における工具姿勢の決定法—工具形状を考慮した C-Space の生成と安全第一加工戦略—, **66**, 7 (2000) 1140.
- 6) A. Affouard et al.: Avoiding 5-axis singularities using tool path deformation, Int. J. Mach. Tool Manuf., **44**, 4 (2004) 415.
- 7) 林見生, 他: 数値制御工作機械の送り駆動系における消費電力の測定, 精密工学会誌, **79**, 10 (2013) 930.