研 究

板カム輪郭フライス切削における 工作物熱変形の適応制御*

山県敬一** 牧之内三郎** 難波義治** 藤田正道*** 浦上豊蔵***

Geometrical Adaptive Control for Workpiece
Thermal Deformation in Cam Profile Milling

Keiichi YAMAGATA, Saburo MAKINOCHI,
Yoshiharu NAMBA, Takamichi FUJITA
and Toyozo URAKAMI

This paper deals with the real-time cutter path modification in radial cam profile milling, by which the shape error due to the workpiece thermal deformation could be reduced. A cam profile is determined by the computer using the parameters indicated by a designer. And then, the temperature rise and the thermal deformation of the workpiece, during the cutting process, are roughly predicted by the finite element method previously. During actual machining process, the workpiece temperature rise, which is concerned with the variance of cutting conditions, is monitored by the minicomputer. By comparing the measured workpiece temperature

with the previously predicted value, the actual thermal deformation of the workpiece is estimated. Since the minicomputer is directly connected to the numerical control unit, it generates the modified cutter path instructions and sends these instructions to the NC unit. These instructions are based on the original cam profile and the thermal deformation. It is certified through some experiments that this method improves the machining accuracy without some cooling systems. Furthermore, the minicomputer is connected to the large scale time sharing system via telephone line. Using this two level hierarchical system, computational load is shared effectively between the large scale computer and the minicomputer.

Key words: geometrical adaptive control, on-line DNC, thermal deformation, cam profile milling, computer aided manufacturing.

1. 緒 言

数値制御工作機械を用いて輪郭切削を行う場合、その加工精度の劣化要因として、機械、工具、被削材の熱変形問題がある¹⁾。工作機械の熱変形は、機械が移動してから数hないし十数hという比較的長い時間を経過して現れるが、工作機械の位置決め精度そのものを劣化させるものであり、これについては多くの研究がなされている²⁾。また、工具・被削材系の熱的挙動も加工精度と関連づけられながら研究されている³⁾⁴⁾。

本研究では、板カム輪郭フライス切削をモデルとして、工作物熱変形に対する制御方法を検討する。エンドミル外周による輪郭フライス切削では、切削点近傍で工具・工作物ともかなりの高温に達するが、旋削の場合と異なり、工具と工作物の熱変形を別々の要因として独立に扱うことができる。すなわち工具の方では、温度上昇の影響が切削開始当初から現れて寸法精度に関係する。ところが工作物の方では、全体の温度上昇が重要であって、

熱変形は切削開始後数minを経過して現れ、形状誤差の一要因となっている。このことから、工具については切削抵抗によるたわみも含めて⁵⁾、切削面の生成から見た実効工具径の把握が必要であると思われる。本論文では、工作物の熱変形問題のみに注目する。

フライス輪郭切削における工作物の熱変形は、切削油を用いて仕上加工を入念に行えば、ある程度小さく押さえられるので、あまり取り上げられていない。しかし、加工精度の向上と仕上加工の過程の省力化との両立を考える場合には、フライス輪郭切削における工作物の熱変形は無視できない問題である。この問題を取り上げるもう一つの理由は、CNC装置の普及に関係している。CNC装置では、プログラムを用いれば工具通路の修正が容易であるから、工作物熱変形量に対応して工具通路に補正を加え、熱変形に起因する工作物の形状誤差を取り除くことができる。本研究では、切削加工中に工作物の一点で温度上昇を監視しながら、工具通路を修正する方法を検討する。切削モデルとして板カムを取り上げるが、マスタカムを試作する時などに本研究の手法は有効であろう。

* 原稿受付 昭和55年6月5日。昭和51年度精機学会春季大会学術講演会(昭和51年4月4日)にて発表。

** 正 会 員 大阪大学工学部(吹田市宇山田上)

*** 大阪大学大学院

図1 円端直動従節板カム

図2 円弧列による近似曲線

2. 制御用データの構成

工作物熱変形の適応制御を実施する場合, 切削中に測定できるのは温度であって, 熱変形量そのものの測定は困難である. したがって, 有限要素法によるシミュレーションによって, 事前に工作物の温度上昇と切削点の変位の関係を求めておき, これらのデータと板カム輪郭にかかわるデータをあわせて制御用データとする.

2.1 板カム輪郭計算

計算機によって板カムの輪郭計算を行う場合, 基本の演算プログラムを用意しておけば, 従節変位とその導関数を関数プログラムとして与えるだけで輪郭が求められる. 一般論は文献(6)に譲るものとし, ここでは図1に示す円端直動従節の場合を例として取り上げる. 板カムの切削加工がここでの主題であるので, 図1では座標軸をカムに固定し, 従節がカムのまわりを回るように示してある. 混乱はないと思うので, ベクトル記号と複素表示を同一式中に混在させて記述する. カムの回転角を θ とし, 虚数単位を j で表すと, ベクトル $\mathbf{C}$ と $\mathbf{L}$ は既知であって,

$$\mathbf{C} = j h e^{j\theta}, \quad \mathbf{L} = (r_0 + g(\theta)) e^{j\theta} \quad (1)$$

である. ここに, h はカムの回転中心 O_c の従節運動方向に対するオフセット量であり, r_0 はカムの基円半径, $g(\theta)$ は従節の変位を与える関数である.

図1より従節のローラ中心軌跡 $\mathbf{P}_f$ は,

$$\mathbf{P}_f = \mathbf{L} + \mathbf{C} \quad (2)$$

であり, この両辺を θ で微分し, 接線の偏角を $(\theta + \phi)$ で表すと,

$$s' e^{j(\theta + \phi)} = (g'(\theta) - h) e^{j\theta} + j(r_0 + g(\theta)) e^{j\theta} \quad (3)$$

を得る. ここに s は従節の軌跡に沿う移動長さを表す. これより,

$$\tan \phi = \frac{r_0 + g(\theta)}{g'(\theta) - h} \quad (4)$$

であり, また図1で法線の偏角をカムの輪郭の外向きに $(\theta + \phi)$ と表すものとするれば,

$$\tan \phi = \frac{h - g'(\theta)}{r_0 + g(\theta)} \quad (5)$$

である.

カムの輪郭曲線は, 従節ローラとの接触点において, ローラ中心軌跡と共通法線を持つことから, ローラ半径を r_r として,

$$\mathbf{P}_p = \mathbf{L} + \mathbf{C} - r_r e^{j(\theta + \phi)} \quad (6)$$

で与えられる. これに式(1)を代入して整理すれば, カム輪郭曲線はカムの回転角 θ をパラメータとする極座標表示 (R_p, θ_p) で, 以下のように表される.

$$R_p = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad \theta_p = \theta + \theta_p$$

ここに,

$$\begin{aligned} a &= r_0 + g(\theta) - r_r \cos \phi \\ b &= h - r_r \sin \phi \\ \tan \theta_p &= \frac{b}{a} \end{aligned} \quad (7)$$

2.2 円弧による輪郭表現

ここでは, 板カムの加工に回転テーブルを使用せず, x - y 運動軸による円弧補間を用いる. まず, カムの回転角 θ を微小角だけ増しながら, 接線の偏角と輪郭上の点の座標を式(4), (7)より求める. ここで接線の向きが分かっていることを利用すると, 輪郭上の2点間を二つの適当な円弧で結び, 1階導関数まで連続な円弧列で輪郭を近似することができる.

図2で P_1, P_2 は輪郭上の点, $P_1 A_1, A_1 P_2$ はカム輪郭の接線である. 点 C_1 は三角形 $P_1 A_1 P_2$ の内心である. この座標を求めた後, 図2に示す補助線を用いれば, 輪郭の円弧列による近似が得られる. 許容公差検証のためには, P_1 と P_2 の間にある輪郭上の数点の座標をさらに求めて円弧との偏差を吟味し, 点 P_1 と P_2 の間隔を適宜増減する. 変曲点は必ず輪郭点として取り上げるようにし, 点 P_1 と点 P_2 における接線が平行になるような場合も, きざみの間隔を小さくして直線で近似できる部分以外は内心点が求められるようにする. なお, 従節が停

図3 工作物支持部モデル

留する部分については、一つの円弧で表現できるが、適応制御実施の際には各円弧の区切りで工具通路補正を行うので、中心角の大きい円弧は複数個に分割する。工具通路は切削加工時に定めるので、あらかじめ計算しておく制御用データとして、上に述べた点列 $P_i, C_i (i=1, 2, \dots)$ の座標値と法線の偏角を用いる。

2.3 有限要素法による工作物熱変形の推定

板カムの輪郭切削過程を伝熱問題としてみると、熱は切削点から流入し、この切削点は指定された送り速度 f (mm/s) で工作物の周上を移動する。これに伴い、工作物の温度は室温から徐々に上昇して、工作物は熱変形を起こす。この熱的挙動を有限要素法によって解析する。板カムの形状は計算機によって求められるので、有限要素への分割も自動化されている⁷⁾。工作物は板形状であるから、熱変形解析を平面応力問題として扱うことにする。したがって、板カムの回転中心を原点として、カム面上に x, y 座標軸を、厚さ方向に z 軸を取り、 xy 平面上を3節点の三角形要素に分割する。熱変形解析の基礎となる熱伝導問題では、上下面からの熱の流出を無視できないので、厚さ方向を考慮に入れて前記の三角形を三角柱とみなし、これを三つの四面体要素に分割して三次元問題として扱う。空気との熱伝達は、板カム外周と上下面で考慮されている。

支持部については図3に示すモデルを用いる。モデル実験であるので、荒加工時に板カム下面中心部に支持のための突起を残し、板カムと支持部は一体となっている。図3はその支持部を表し、上面は板カム下面と同一平面上にあり、この突起をバイスで固定することによって支持している。図3で $C_i, D_i (i=1, 2, 3)$ がバイスとの接触点を表し、他の点では空気との熱伝達があるものとしている。バイスとの接触点では、時間きざみ Δt ごとに固定温度を境界条件として与える。いま、時刻が $(k-1)$ ステップ経過したときの C_0, D_0 における温度をそれぞれ $T(C_0)^{(k-1)}, T(D_0)^{(k-1)}$ として求めたとすると、次の時刻 k ステップでの各点の温度を境界条件として次式で与える。

表1 計算に用いた物理定数

密度	$7.84 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
比熱	$469 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$
ヤング率	$2.1 \times 10^{10} \text{ kg/m}^2$
ポアソン比	0.3
線膨張係数	$1.12 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
熱伝導率	$51.5 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
熱伝達率	$12.6 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$

$$\left. \begin{aligned} T(C_i)^{(k)} &= \beta_i T(C_0)^{(k-1)}, & i=1, 2, 3 \\ T(D_i)^{(k)} &= \beta_i T(D_0)^{(k-1)}, & i=1, 2, 3 \\ \beta_1 &= 0.75, & \beta_2 = 0.5, & \beta_3 = 0.25 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

このモデルの妥当性を確かめるため、円板モデルを用いて切削実験を行い、中心点と外周に近い点3点の温度変化を実測し、計算値とのつき合わせを行って、妥当性を確認している。

熱源は切削熱であり、エンドミルの外周による輪郭フライス切削では、微視的に見れば熱の流入は間欠的である。しかし、工作物全体の熱変形を考えるのであるから、有限要素法による解析においては、熱源を連続移動熱源として取扱っても支障はないものと思われる。有限要素法における熱伝導問題は、非定常問題として Wilson-Clough の方法によって解く⁸⁾。流入熱量は仮の基準熱量として 21 J/s [300 cal/min] を与え、熱源が外周上の各節点を通過するときのカムの回転中心の上昇温度を制御用データとして保存する。基準熱量は計算の試行錯誤により、予備実験の実測温度分布とおおよそ合致する熱量によって定める。実際の流入熱量は加工条件に依存し、また刃先状態のような不確定な要素にも関係する。したがって、事前に正確な流入熱量を把握することは困難であり、切削加工中にカムの回転中心の温度を実測し、基準熱量を与えた時の計算値とつき合わせて、流入熱量の補正を行うのである。これについては、第3.2節で詳しく述べる。

熱変形解析は準静的問題として解く。すなわち、微小時間 Δt ごとに温度分布を求め、その瞬間の温度分布の下での熱ひずみを用いて節点変位を求める。なお、工作物はカムの回転中心で支持されている。加工時に必要とされるのは切削点近傍の変位であるから、工具すなわち熱源が外周上の有限要素節点を通過するときのその節点の変位を、制御用データとして保存する。なお、計算に用いた定数を表1に示す。被削材は S35C である。

3. 実験方法

3.1 システム構成

実験に用いたオンライン DNC システム⁹⁾の構成を図4に示す。ミニコンピュータ (NEAC-M4) は、大型計

図4 システム構成

算機の端局になっており、板カム設計時には時分割システムを利用する。有限要素法は大型計算機のバッチ処理で実行されるが、その結果はファイルに保存され、いつでも端局から編集を行ったり、ファイルの内容を端局に転送できるようになっている。

切削加工時には、ミニコンピュータとNC装置は一体となって動作する。本システムでは、大型計算機から送られて来るデータはNC指令の形式になっておらず、NC指令はミニコンピュータによって生成される。カムの回転中心に対応する点の温度測定には熱電対を使用し、A-D変換器を通して測定電圧がミニコンピュータに入力される。リニアエンコーダはテーブルと主軸の正確な位置を監視するため、インタフェースを介してミニコンピュータに接続されている。なお、プロッタはカム輪郭の検査と形状測定の出力デバイスとして使用される。ミニコンピュータは、いろいろな機能を遂行しなければならないが、プログラムの差し換えによってこれを実現している¹⁰⁾。

工作機械は光洋パノルマン2G-NCフライス盤、制御装置は同時2軸制御、独立1軸制御のNEDAC 4200であり、送りの基本単位は $5\mu\text{m}$ である。制御装置には直線と円弧の補間機能があり、本実験ではこれらの補間機能を利用している。

3.2 温度測定による熱変形推定

切削加工時に与えられるデータには、円弧の区切りになっている点列 $P_1C_1P_2C_2\cdots$ (これを改めて $\{P_j\}$ と置く)と、有限要素法による解析に用いられた外周上の要素節点 $\{N_i\}$ が含まれる。制御用基礎データとして整備された点列 $\{P_j\}$, $\{N_i\}$ に関する情報は、それぞれを区別するためのコードが付与され、極座標表示の偏角の大きさの順に並べられている。なお、後述するように、内挿

$N_i, N_{i+1}, \dots$: 有限要素節点
 $P_j, P_{j+1}, \dots$: 円弧の区切り点
 図5 輪郭上の点列とx軸方向の変位

演算を実行する必要があるため、 $\{N_i\}$ に関する情報は常に一つ先の節点に関する情報も分かるようにしておく。いま、これらの点列の偏角を改めて θ で表し、有限要素節点に関するものには添字 i を、円弧の区切り点に関するものには添字 j をつけるものとする。

制御用データは逐次型ファイルの形式になっており、切削加工中に一つの円弧補間の指令を出した後、有限要素節点 N_i を制御データの中から検出したとき、カム回転中心に対応する点の温度測定を行う。ここで、測定温度 $\Delta T_i'$ (室温からの上昇温度)と有限要素法による計算値 ΔT_i を用いて、熱量について補正の因子を以下のように定める。

$$k_i = \frac{\Delta T_i'}{\Delta T_i} \quad (9)$$

この値は次の節点 N_{i+1} で温度測定を行うまで、近似的に有効であると考えられる。

また一方、点 N_i における熱変位の x, y 成分の計算値を u_i, v_i で表すと、加工時の温度測定に基づく点 N_i の変位推定値を近似的に

$$u_i' = k_i u_i, \quad v_i' = k_i v_i \quad (10)$$

によって求める。加工中に実際の変位を直接測定することは困難であるから、上昇温度の計算値と実測値の比を用いて変位を間接的に推定しているのである。

図5に示すように、点 N_i と点 N_{i+1} の間にはいくつかの円弧の区切りが存在するが、これらの点では偏角 θ について内挿を行う。例えば図5に示すように、点 P_j での x 軸方向の推定変位を次式で計算する。

$$u_j' = (k_i u_{i+1} - u_i') \frac{\theta_j - \theta_i}{\theta_{i+1} - \theta_i} + u_i' \quad (11)$$

y 軸方向の成分 v_j' についても同様である。点 N_{i+1} では再び温度測定を行うので改めて

$$u_{i+1}' = k_{i+1} u_{i+1} \quad (12)$$

図6 熱変形に対する工具通路決定

が計算されるが、それまでの間の点 $P_{j+1}, \dots$ での推定変位量は $u'_{i+1} = k_i u_{i+1}$ として式 (11) で計算する。ここでは加工条件が急激に変化するような（例えば切削速度が2倍になる等）外乱は考えていないので、補正パルスが要求されるのが高々10か所程度の場合、外周上の有限要素節点が30ないし50点あればこの近似式を用いて十分であると考えられる。加工条件の急激な変化にも追従できるためには、有限要素節点の所で温度測定を行うのではなく、短いサンプリング間隔を設定して補正を考える必要があるが、ここではこの方法は取っていない。

3.3 加工時の工具通路決定

第2.2節でも述べたように、NC指令の作成には x, y 座標系を用いる。ここで、工作物が熱変形した後も、第2.1節、第2.2節で求めた法線方向は近似的に有効であると仮定する。図6では変位を拡大して示してあるが、点 P_j が P'_j へ、 P_{j+1} が P'_{j+1} へ変位したものとする。 P'_j を通り $\overline{O_j P'_j}$ に平行な直線を引き、 P'_{j+1} を通り $\overline{O_j P'_{j+1}}$ に平行な直線との交点を O'_j とする。 O'_j を中心とし線分 $\overline{O'_j P'_j}$ を半径とする円弧を求める。工具通路はこれより工具半径だけ半径の大きい円弧 $\widehat{Q_j Q_{j+1}}$ によって定められる。 Q_{j+1} は $\overline{O'_j P'_{j+1}}$ の延長線と円弧の交点である。工具が Q_{j+1} に達したとき、切削点は必ずしも P'_{j+1} に一致しないので、 $5\mu\text{m}$ 以上の差があるときは、切削点を P'_{j+1} に引き込むように補正のNC指令を作る。輪郭が十分細かく区切ってあれば、この補正は丸めの操作に吸収されるかまたは1パルス分で済む。

ミニコンピュータは以上の計算を、一つのNC指令で加工が行われている間に実行し、次のNC指令を作成して待つようになっている。計算そのものは簡単であるが、交角の小さい2直線の交点を求めることが多いので、けた落ちが起こりやすく、有効けた数を十分に多く取っておくことが必要である。本実験システムでは10進12けた程度（仮数部46ビット）の有効けた数で演算を行っている。

4. 実験結果と考察

まず、形状誤差の測定法について述べる。本来ならばカム試験機を作るべきであるが、ここでは加工に用いたNC装置を便宜上利用する。加工が終わった工作物をバイスに取付けたまま室温まで冷却する。その後、主軸に工具の代わりに非接触微小変位計（AEC-1553 T）のピックアップコイルを埋め込んだプラスチックの丸棒を取付ける。この変位計は、ピックアップに高周波コイルを使用し、ピックアップコイルの磁界内に電導体が近づいたとき、電導体内に発生するうず電流により、コイルのインダクタンスが変化することを利用して、電導体との間隙を測定するものである。

ピックアップコイルを取付けた主軸を低速で回転させながら、NC装置を用いて、理想形状に沿って動かす。コイルが工作物の法線方向を向いたときに、その出力はピーク値を取るのピークディテクタを用いてミニコンピュータに入力する。もしも工作物が理想形状に仕上がっていれば、どの点で測っても同じ間隙を示すはずである。この計測法では寸法精度は測れないが、熱変形に起因するような形状精度の測定には適している。なお、工作機械の位置決め誤差が介入しては測定に意味がなくなるので、光電式リニアエンコーダ（日本光学工業）を用いて実際の位置をミニコンピュータに入力し、これに基づいて間隙を測る。得られた結果はプロッタに出力される。

加工実験において、工具は2枚刃のエンドミル（SKH 3, 直径20 mm）を用いた。上向き切削で切削油は用いていない。被削材は厚さ10 mmのS35Cで、加工条件は、切削速度0.35 m/s, 送り速度0.83 mm/s, 切込み深さ2 mmである。熱電対は上面から深さ5 mmの点に埋め込む。実験結果の例を図7に示す。点線は理想形状を、実線は理想形状からの偏差を200倍に拡大したときの工作物の形状を示している。これらの曲線はプロッタに出力されたものである。工作物の熱変形による形状誤差は、熱膨張を無視して切削した場合に、工作物が室温まで冷却したとき、切り込みすぎの誤差となって現れる。図7(a)において切残しの誤差があるように見えるが、これは変位計による輪郭測定の際、各測定点での相対的な偏差しか把握できないことによる（間隙の絶対値は把握できない）。図7より制御の実施によって、形状精度の改善が見られる。

5. 結 論

切削加工中に工作物の温度測定を行い、これに基づいて工作物熱変形に対する工具通路補正を実時間で行う実

図7 輪郭形状の測定例

験を試みた。これにより以下のような結論が得られた。

- (1) 切削熱による工作物熱変形は形状精度劣化の一つの要因であるが、加工中の温度測定と工具通路補正によってこれを防止することができる。
- (2) CNC 装置における実時間で工具通路補正の有効性が確かめられた。
- (3) 板カムの試作において、その輪郭計算、有限要素法による熱的挙動のシミュレーション、ならびに加工・計測に至る一貫した過程を、階層構造を持つ計算機システムによって実現できた。

本研究の遂行にあたり、実験装置について御協力を賜った光洋機械工業(株)曾我部孟氏ならびに日本電気(株)小林淳人氏に、また討論に加わって頂いた大阪大学大学院大村悦二氏に厚く御礼申し上げる。制御用データの作成には大阪大学大型計算機センターを利用した。なお、本研究の一部は昭和51年度科学研究費補助金(一般研究 C: 155095)の交付を受けていることを申し添える。

参 考 文 献

- 1) 西脇信彦: 機械・工具・被削材系の熱の流れについて, 日本機械学会誌, **81**, 721 (1978) 1296.
- 2) 奥島啓式, 垣野義昭, 菊池敏彦: 工作機械の熱変形に関する研究(第2報), 精密機械, **38**, 7 (1972) 565.
- 3) 高田祥三, 小尾 誠, 佐田登志夫: 旋削加工における加工精度の解析, 精密機械, **40**, 8 (1974) 678.
- 4) 本多庸悟, 竹山秀彦, 安部哲夫: 計算機・適応制御旋削加工システムの試み(第2報), 精密機械, **40**, 3 (1974) 244.
- 5) Y. Namba & H. Tsuwa: Geometrical Adaptive Control in Profile Milling by CNC System, Proc. 17th Int. MTDR Conf., (1976) 67.
- 6) 牧野 洋: 自動機械機構学, 日刊工業新聞社 (1976).
- 7) O. C. Zienkiewicz & D. V. Phillips: An Automatic Mesh Generation Scheme for Plane and Curved Surfaces by 'Isoparametric' Co-ordinates, Int. J. Numerical Methods in Engg., **3**, (1971) 519.
- 8) O. C. Zienkiewicz & Y. K. Cheung: The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics, McGraw-Hill, New York, N. Y., (1967).
- 9) 牧之内三郎ほか: DNC システムの試作, 昭和47年度精密機械学会春季大会学術講演会前刷 (1972) 421.
- 10) S. Makinouchi & K. Yamagata: A Modular Approach to the Control Program Construction in Real-time Minicomputer Systems, Proc. IFAC 7th World Congress, (1978) 747.
- 1) 西脇信彦: 機械・工具・被削材系の熱の流れについて,