平面カムの輪郭成形法*

(第1報, 直線補間制御点の決定)

西岡 雅夫^{*1}

Contouring of Planar Cam (1st Report, Determination of Control Points by Linear Interpolation)

Masao NISHIOKA

Planar cams are typically machined by NC machine tools using linear and circular interpolation functions. This causes polygon-shaped cams which sometimes are not acceptable for industrial use due to the large vibration of cam follower members. There are no general guidelines to define the control point of the polygon to obtain reasonable error between the polygon and the theoretical contour of the cam. First, the error defined by the linear interpolation on Cartesian and polar coordinates is introduced for the guidelines. Then, two novel methods are established to define the contour of cams. One gives equal error over the entire contour of the cam. The other equally divides the contour with acceptable error. The result of the simulation using four different types of planar cam mechanism shows the advantages of these methods, such as the smaller number of necessary data than in the conventional techniques.

Key Words: Mechanism, Curve Fitting, Machine Element, Cam Processing, Cam Contouring, CAD, CAM, NC, Generating Motion, Process Planning

1. 緒 言

一般的に平面カムはNC工作機械によって加工されることが多い。さてNC工作機械のカム加工データを作るとき、少なくとも次の三つの事柄を考慮する必要がある。第1は加工軸の選択で、平面カムの輪郭制御のためにはカーテシアン座表系かまたはサーキュラ軸を使う極座標系の工作機械のいずれかを選択する。第2はNC工作機械の制御に必要な、カム輪郭上の離散的な点、制御対象点をどのように選択あるいは計算するかという点である。第3は選択された制御点列をどのような補間機能を使って補間するかである。この点に関しては、NC工作機械の初期の段階では直線補間および円弧補間しかなかった。最近では高級なスプライン補間など⁽¹⁾、ができるようになったが、カムの加工に应用される程普及していない。そこで産業界では実際には直線補間および円弧補間だけが使われている。円弧補間はカムのドエル部の加工に用いられ、直線補間は割出し部の加工に用いられるので、カムはド

エル部分を除いて多角形になっている。多角形のカムは二つの問題がある。第1の問題はカムフォロアが多角形の頂点でジャンプをしてしまうこと。第2の問題は多角形と真の輪郭の間に誤差があることである。直線補間を使う以上この問題は避けられないが、誤差を許容値以下に押さえるために、輪郭の制御点をどのように決定するかが問題になる。従来はこのような観点に立って制御点を決定する方法が知られておらず、経験的にカムの割付角を等分割する方法が用いられてきた。この方法には二つの問題がある。分割数が小さいときは誤差が許容値におさまらず、大きいときは必要以上にNCデータが多量になり、NC加工システム上問題がある。

このため本研究では平面カムを対象に、補間法としては直線補間を用いて、制御軸としてはカーテシアン座標と極座標のそれぞれについて、制御点の発生方法としては直線補間の誤差を基準にして計算する方法を開発したので、報告する⁽²⁾⁽³⁾。この結果従来の方法と比較して、かなり少ないデータ量で各制御点間の誤差を均一または所定の値以下に保つような直線補間が得られることがわかった。

* 平成5年10月4日 第71期全国大会講演会および平成5年10月30日 山梨講演会において講演、原稿受付 平成5年7月9日。

^{*1} 正員、(株)三共製作所 (〒439 静岡県小笠郡菊川町本所2290)。

2. 記 号

- A : カム曲線無次元加速度
 d : NC 制御装置の最小設定単位
 P : ローラフォロア(またはカム輪郭)の位置
 (r, β) : 極座標で表示したカム輪郭
 S : カム曲線無次元変位
 T : カム曲線無次元時間
 V : カム曲線無次元速度
 (X, Y) : カムに固定されたローラフォロアの座標
 δ : 輪郭誤差
 δ_c : カートesian座標での直線補間による誤差
 δ_p : 極座標での直線補間による誤差
 ΔT : カム曲線無次元時間増分
 θ : ラジアルカム回転角
 τ : 揺動従節回転角
 添字
 d : 入出力動作ストローク
 h : 空間的中点
 $i, i+1$: 始点, 終点
 m : 時間的中点

3. 輪郭誤差の定義

カムを考えるときの三つの座標が考えられる⁽⁴⁾。すなわち

- ・動作座標: カムと従節の動作を定義する
- ・カム輪郭(またはカムフォロア軌跡)座標
- ・カム輪郭加工座標

動作座標とは入力と出力の関係を与えるものであり, カム輪郭座標は各機構と動作座標が与えられて決まる, カム形状を表すものであり, カム輪郭加工座標はカム輪郭を加工するために工作機械の NC 制御装置に使われる座標であって, これらは互いに別のものと考えることができる。

3.1 カートesian座標上での直線補間による誤差

図1ではローラフォロア(以下フォロア)というの理論的中心軌跡(カム輪郭と置き換えてもよい)とカーテ

図1 (X, Y) 座標上の直線補間によるカム輪郭誤差

シアン座標上で直線近似したフォロア中心軌跡との誤差を示している。フォロアの理論中心軌跡は3点 P_i , P_m および P_{i+1} を通る円弧上にあるが, 直線補間の場合は2点 P_i および P_{i+1} を結ぶ直線上にある。この誤差の最大値は2点 P_i および P_{i+1} を結ぶ弦と弧のほぼ中央 P_m , P_h 間で発生する。いまカム曲線の無次元時間を T とし点 P_i , P_{i+1} などの座標が次のように与えられているものとする。

$$P_i = (X_i, Y_i) = \{X(T_i), Y(T_i)\} \dots \dots \dots (1)$$

$$P_{i+1} = (X_{i+1}, Y_{i+1}) = \{X(T_{i+1}), Y(T_{i+1})\} \dots \dots \dots (2)$$

$$T_{i+1} = T_i + \Delta T, T_m = T_i + \frac{\Delta T}{2} \dots \dots \dots (3)$$

したがって弧の中点 $P_m(X_m, Y_m)$ と弦の中点 $P_h(X_h, Y_h)$ は

$$X_m = X\left(T_i + \frac{\Delta T}{2}\right), Y_m = Y\left(T_i + \frac{\Delta T}{2}\right) \dots \dots (4)$$

$$X_h = \frac{X_i + X_{i+1}}{2}, Y_h = \frac{Y_i + Y_{i+1}}{2} \dots \dots \dots (5)$$

以上の変数を用いて誤差 δ を次のように定義する。

$$\delta = \sqrt{(X_h - X_m)^2 + (Y_h - Y_m)^2} \dots \dots \dots (6)$$

3.2 極座標 (r, β) 上の直線の (X, Y) 座標での凸性

(r, β) の加工座標での直線補間とは r と β とをそれぞれ横軸と縦軸とする極座標での直線補間を意味し, この直線に沿ってカムを加工すると実際に得られたカムの輪郭は直線にならない。そこでまず始めに (r, β) のカートesian座標での直線がどのような性質をもっているか調べてみよう。いま2点を結ぶ (r, β) のカートesian座標での直線は a, b を常数として次のように与えられる。

$$r = a\beta + b \dots \dots \dots (7)$$

このとき式(7)を (x, y) の平面に射影したとき曲率 κ は次のようになる。

$$\kappa = \frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\left\{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right\}^{3/2}} = \frac{1}{\sqrt{a^2 + r^2}} > 0 \dots \dots \dots (8)$$

したがって (r, β) 軸のカートesian座標での直線(図2参照)はカム中心に対して凸性をもつことがわか

図2 極座標の直線補間

る。

3.3 極座標上での直線補間による輪郭誤差

図3はフォロアの理論的中心軌跡と極座標上で直線近似したフォロア中心軌跡との誤差をカーテシアン座標上に示したものである。フォロアの理論中心軌跡は3点 P_i , P_m および P_{i+1} を通る一つの円弧上にあり、極座標上で直線補間された点は2点 P_i および P_{i+1} を結ぶほかの円弧上にある。この誤差の最大値は2点 P_i および P_{i+1} を結ぶ弧と弧のほぼ中央 P_m , P_h 間で発生する。始点 $P_i(X_i, Y_i)$, 終点 $P_{i+1}(X_{i+1}, Y_{i+1})$ および時間的中点 $P_m(X_m, Y_m)$ は前出のカーテシアン座標と同一である。しかし弦の中点 $P_h(X_h, Y_h)$ (図2参照) については、この場合次のようになる。

$$r_h = \frac{r_i + r_{i+1}}{2}, \beta_h = \frac{\beta_i + \beta_{i+1}}{2} \dots\dots\dots (9)$$

したがって

$$X_h = r_h \cos \beta_h = \frac{r_i + r_{i+1}}{2} \cos \frac{\beta_i + \beta_{i+1}}{2} \dots\dots\dots (10)$$

$$Y_h = r_h \sin \beta_h = \frac{r_i + r_{i+1}}{2} \sin \frac{\beta_i + \beta_{i+1}}{2} \dots\dots\dots (11)$$

ただし

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2}, \beta = \arctan \frac{Y}{X} \dots\dots\dots (12)$$

である。これらの X_h, Y_h を使って、次の同様な誤差の式が得られる。

$$\delta = \sqrt{(X_h - X_m)^2 + (Y_h - Y_m)^2} \dots\dots\dots (13)$$

δ の大きさについては、座標系に無関係に、工作機械

図3 (r, β) 座標上の直線補間によるカム輪郭誤差

図4 直動従節直進カム機構

のNC制御装置の最小設定単位を d としたとき、 $\delta = (1/2)d$ なるように ΔT を決めるのがよい。

4. 機構別の誤差の近似式 $\delta(\Delta T)$

さて式(6), (13)の δ はカム曲線の無次元時間 T の関数であると同時に、カム-従節機構の構成によって定まる。関数 δ が機構のパラメータでどのように表されるかを知るために、四つの代表的な平面カム機構について前進差分と Taylor 展開を用いて、これらの近似式を求める。以下でカーテシアン座標上の誤差は δ_c で極座標上の誤差は δ_p で示す。なお、近似式を得るための式の展開は簡単ではないので直動従節カム(RCTF)機構だけ詳述する。

4.1 直動従節直進カム機構(略号: TCTF)

図4の直動従節直進カム機構の動作座標 (x, y) とフォロアの中心座標 (X, Y) は次のように与えられる。

$$x = x_d T, y = y_d S(T) + y_0 \dots\dots\dots (14)$$

$$X = x, Y = y \dots\dots\dots (15)$$

以上から

$$\delta_c \sim \frac{1}{8} y_d A(T_i) (\Delta T)^2 \dots\dots\dots (16)$$

4.2 揺動従節直進カム機構(略号: TCRF)

図5の揺動従節直進カム機構の動作座標 (x, τ) とフォロアの中心座標 (X, Y) は次のように与えられる。

$$x = x_d T, \tau = \tau_d S(T) + \tau_0 \dots\dots\dots (17)$$

$$X = x_d y - C + R \cos \tau, Y = L + R \sin \tau \dots\dots (18)$$

図5 揺動従節直進カム機構

図6 直動従節ラジアルカム機構

以上から

$$\delta_c \sim \frac{1}{8} R \tau_d \sqrt{A^2(T_i) + \tau_d^2 V^4(T_i)} (\Delta T)^2 \quad \dots (19)$$

4・3 直動従節ラジアルカム/溝カム機構(略号: RCTF) 図6の直動従節ラジアルカム/溝カム機構の動作座標 (θ, y) とフォロアの中心座標 (X, Y) は次のようになる。

$$\theta = \theta_d T, y = y_d S(T) \quad \dots (20)$$

$$X = r \cos \beta = (r_0 + y) \cos(-\theta) \quad \dots (21)$$

$$Y = r \sin \beta = (r_0 + y) \sin(-\theta) \quad \dots (22)$$

4・3・1 カートesian座標の場合 この場合 X については簡単のため $r_i = y_d S(T_i) + r_0$ とする)

$$X_i = r_i \cos(\theta_d T_i) \quad \dots (23)$$

$$X_{i+1} = \{r_0 + y_d S(T_i + \Delta T)\} \cos\{\theta_d(T_i + \Delta T)\} \quad \dots (24)$$

$$X_m = \left\{r_0 + y_d S\left(T_i + \frac{\Delta T}{2}\right)\right\} \cos\left\{\theta_d\left(T_i + \frac{\Delta T}{2}\right)\right\} \quad \dots (25)$$

$$X_h = \frac{1}{2} [r_i \cos(\theta_d T_i) + \{r_0 + y_d S(T_i + \Delta T)\} \cos\{\theta_d(T_i + \Delta T)\}] \quad \dots (26)$$

よって

$$\begin{aligned} X_h - X_m &= \frac{1}{2} \left[r_i \cos(\theta_d T_i) + \{r_0 + y_d S(T_i + \Delta T)\} \cos\{\theta_d(T_i + \Delta T)\} \right. \\ &\quad \left. - 2 \left\{ r_0 + y_d S\left(T_i + \frac{\Delta T}{2}\right) \right\} \cos\left\{ \theta_d \left(T_i + \frac{\Delta T}{2}\right) \right\} \right] \\ &\sim \frac{1}{8} (\Delta T)^2 [-r_i (\theta_d)^2 + y_d A(T_i)] \cos(\theta_d T_i) \\ &\quad - 2 y_d \theta_d V(T_i) \sin(\theta_d T_i)] \quad \dots (27) \end{aligned}$$

$$Y_i = -r_i \sin(\theta_d T_i) \quad \dots (28)$$

$$Y_{i+1} = -\{r_0 + y_d S(T_i + \Delta T)\} \sin\{\theta_d(T_i + \Delta T)\} \quad \dots (29)$$

$$\begin{aligned} Y_m &= -\left\{ r_0 + y_d S\left(T_i + \frac{\Delta T}{2}\right) \right\} \\ &\quad \times \sin\left\{ \theta_d \left(T_i + \frac{\Delta T}{2}\right) \right\} \quad \dots (30) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_h &= -\frac{1}{2} [r_i \sin(\theta_d T_i) + \{r_0 + y_d S(T_i + \Delta T)\} \\ &\quad \times \sin\{\theta_d(T_i + \Delta T)\}] \quad \dots (31) \end{aligned}$$

よって

$$\begin{aligned} Y_h - Y_m &= \frac{1}{2} \left[-r_i \sin(\theta_d T_i) \right. \\ &\quad \left. - \{r_0 + y_d S(T_i + \Delta T)\} \sin\{\theta_d(T_i + \Delta T)\} \right. \\ &\quad \left. + 2 \left\{ r_0 + y_d S\left(T_i + \frac{\Delta T}{2}\right) \right\} \right. \\ &\quad \left. \times \sin\left\{ \theta_d \left(T_i + \frac{\Delta T}{2}\right) \right\} \right] \\ &\sim \frac{1}{8} (\Delta T)^2 [\{r_i (\theta_d)^2 - y_d A(T_i)\} \sin(\theta_d T_i) \end{aligned}$$

$$- 2 y_d \theta_d V(T_i) \cos(\theta_d T_i)] \quad \dots (32)$$

したがって

$$\begin{aligned} \delta_c &\sim \frac{1}{8} \sqrt{\{y_d A(T_i) - r_i \theta_d^2\}^2 + \{2 y_d \theta_d V(T_i)\}^2} \\ &\quad \times (\Delta T)^2 \quad \dots (33) \end{aligned}$$

4・3・2 極座標の場合 この場合 X については簡単のため $r_i = y_d S(T_i) + r_0$ とする)

$$X_i = r_i \cos(\theta_d T_i) \quad \dots (34)$$

$$X_{i+1} = \{r_0 + y_d S(T_i + \Delta T)\} \cos\{\theta_d(T_i + \Delta T)\} \quad \dots (35)$$

$$X_m = \left\{ r_0 + y_d S\left(T_i + \frac{\Delta T}{2}\right) \right\} \cos\left\{ \theta_d \left(T_i + \frac{\Delta T}{2}\right) \right\} \quad \dots (36)$$

$$\begin{aligned} X_h &= r_h \cos \beta_h = \left\{ r_0 + y_d \frac{S(T_i) + S(T_i + \Delta T)}{2} \right\} \\ &\quad \times \cos\left\{ \theta_d \left(T_i + \frac{\Delta T}{2}\right) \right\} \quad \dots (37) \end{aligned}$$

よって

$$\begin{aligned} X_h - X_m &= \frac{S(T_i) + S(T_i + \Delta T) - 2S\left(T_i + \frac{\Delta T}{2}\right)}{2} y_d \\ &\quad \times \cos\left\{ \theta_d \left(T_i + \frac{\Delta T}{2}\right) \right\} \\ &\sim \frac{1}{8} y_d A(T_i) (\Delta T)^2 \cos\left\{ \theta_d \left(T_i + \frac{\Delta T}{2}\right) \right\} \quad \dots (38) \end{aligned}$$

$$Y_i = -r_i \sin(\theta_d T_i) \quad \dots (39)$$

$$Y_{i+1} = -\{r_0 + y_d S(T_i + \Delta T)\} \sin\{\theta_d(T_i + \Delta T)\} \quad \dots (40)$$

$$\begin{aligned} Y_m &= -\left\{ r_0 + y_d S\left(T_i + \frac{\Delta T}{2}\right) \right\} \\ &\quad \times \sin\left\{ \theta_d \left(T_i + \frac{\Delta T}{2}\right) \right\} \quad \dots (41) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_h &= r_h \sin \beta_h = -\left\{ r_0 + y_d \frac{S(T_i) + S(T_i + \Delta T)}{2} \right\} \\ &\quad \times \sin\left\{ \theta_d \left(T_i + \frac{\Delta T}{2}\right) \right\} \quad \dots (42) \end{aligned}$$

よって

$$\begin{aligned} Y_h - Y_m &= \frac{S(T_i) + S(T_i + \Delta T) - 2S\left(T_i + \frac{\Delta T}{2}\right)}{2} y_d \\ &\quad \times \sin\left\{ \theta_d \left(T_i + \frac{\Delta T}{2}\right) \right\} \\ &\sim \frac{1}{8} y_d A(T_i) (\Delta T)^2 \sin\left\{ \theta_d \left(T_i + \frac{\Delta T}{2}\right) \right\} \quad \dots (43) \end{aligned}$$

したがって

$$\delta_p \sim \frac{1}{8} y_d A(T_i) (\Delta T)^2 \quad \dots (44)$$

ちなみにこの式は直動従節直進カムのカーテシアン座標での誤差 δ_c の式(16)とまったく同じである。

4・4 揺動従節ラジアルカム/溝カム機構(略号: RCRF) 図7の揺動従節ラジアルカム/溝カム機構の動作座標 (θ, τ) とフォロアの座標 (x, y) は次のようになる。

$$\theta = \theta_d T, \tau = \tau_d S(T) + \tau_0 \quad \cdots \cdots (45)$$

$$x = -C + R \cos \tau, y = L + R \sin \tau \quad \cdots \cdots (46)$$

このときフォロアの中心座標 (X, Y) は次式で与えられる。

$$X = -C \cos \theta + L \sin \theta + R \cos (\tau - \theta) \quad \cdots \cdots (47)$$

$$Y = C \sin \theta + L \cos \theta + R \sin (\tau - \theta) \quad \cdots \cdots (48)$$

4・4・1 カーテシアン座標の場合 以上から(簡略化のため $\tau_i = \tau_d S(T_i) + \tau_0$ とおく)

$$\delta_c \sim \frac{1}{8} \sqrt{F} (\Delta T)^2 \quad \cdots \cdots (49)$$

ここで

$$F = \{R\tau_d A(T_i) - C\theta_d^2 \sin \tau_i - L\theta_d^2 \cos \tau_i\}^2 + \{R\{\tau_d V(T_i) - \theta_d\}^2 - C\theta_d^2 \cos \tau_i + L\theta_d^2 \sin \tau_i\}^2 \quad \cdots \cdots (50)$$

4・4・2 極座標の場合 この機構の誤差 δ_p の略近式はまだ求められていない。

5. カム輪郭分割のシミュレーション

輪郭制御のめに次の三つの方法で制御点を発生させ、全分割数の比較を行った(以下のシミュレーションでは図4~7の太線部分だけを対象にした)。

・経験的等分割法(TED): θ_d [式(20), (45)], x_d [式(14), (17)]を等分割する方法。ここでは1mmあるいは1deg.を三等分した。

・最大誤差等分割法(MED): 等分割法の一つであり、誤差の最大値が δ になるような一定の ΔT を用いる方法。 $\delta_c(\Delta T)$ [式(16), (19), (33), (44)]または

$\delta_p(\Delta T)$ [式(49)]の近似式を使用する。これらの式はいずれも $\delta \sim G \times (\Delta T)^2$ の形式で表されている。このとき関数 G の T に関する最大値 $G_{\max}$ を求めて、 $\Delta T = \sqrt{\delta/G_{\max}}$ として ΔT を求める。

・誤差一定法(CER): 誤差 δ が全区間にわたって一定になるように ΔT を求める方法。カーテシアン座標の場合は式(6)を、極座標の場合は式(13)を用いる。 δ は無次元時間 T の関数であり、通常 ΔT の単調増加関数であるので、ここでは「はさみうち法」を使って δ を一定にする ΔT を求めた。またこの数値計算での収束条件は $0.000495 \leq \delta \leq 0.000505$ mm (目標値は0.0005mm)になったとき収束したと判定した。

またシミュレーションに用いたそれぞれの機構の諸元は表1に示した次のとおりである。カム曲線は変形正弦曲線を用いた。シミュレーションの結果分割数は表2, 3のように得られた(*この事例では誤差の最大値が0.5dを超えていた)。

6. 結 論

(1) 平面カムの輪郭分割に関して、カーテシアン座標および極座標上で直線補間したときの輪郭誤差を定義し、この誤差を基準に分割すべきであると提案した。

表1 シミュレーションに用いた機構の諸元

Mechanism	Data
TCTF	$x_d = 100\text{mm}, y_d = 40\text{mm}$
TCRF	$C = 40\text{mm}, L = 20\text{mm}, R = 20\sqrt{4}\text{mm},$ $x_d = 100\text{mm}, \tau_0 = -\arctan \frac{1}{2}, \tau_d = 2\tau_0$
RCTF	$r_0 = 40\text{mm}, y_d = 30\text{mm}, \theta_d = 100(\text{deg})$
RCRF	$C = -80\text{mm}, L = 45\text{mm}, R = 70\text{mm},$ $\theta_d = 100(\text{deg}), \tau_0 = 159.5(\text{deg}), \tau_d = -13.4(\text{deg})$

表2 シミュレーションの結果-カーテシアン座標

Methods	TCTF	TCRF	RCTF	RCRF
TED	300	300	300*	300
MED	236	240	309	276
CER	180	203	228	220

表3 シミュレーションの結果-極座標

Methods	RCTF	RCRF
TED	300*	300
MED	204	-
CER	155	117

図7 揺動従節ラジアルカム機構

(2) 平面カムの四つの代表的機構に対して前進差分法と Taylor 展開を用いた輪郭誤差の近似式を求めた。

(3) 極座標上での直線をカーテシアン座標に射影すると、その座標原点に対して射影された直線が凸性をもつことが明らかにされた。したがってラジアルカムのような円盤状のカムの輪郭制御にはサーキュラ軸を使った、直線補間が有利であることがわかった。

(4) 従来の等分割法、最大誤差等分割法および誤差一定法をシミュレーションによって比較し誤差一定方がほかの方法に比べて分割数が少なくて済むことが明らかにされた。

(5) ラジアルカムについてはカーテシアン座標系の直線補間より分割数が少なくて済むことがわかった。

(6) 従来の等分割法では、最大誤差が許容値を越えることがありうることも明らかになった。

(7) リンク機構を含むより複雑なカム機構でも、それらのリンク機構の特性がフォロア節においてカム曲線の形で取り込まれるので本研究の四つの事例はより大きな一般性があると考えてよい。

(8) 本計算手順によって、平面カムの直線補間による制御点の決定手順が明確にされかつデータ圧縮効果が高いことが証明された。

なおシミュレーションの計算過程で δ と δ_c , あるいは δ と δ_p の数値の比較によって、式 δ_c , δ_p の精度を調べたが、およそ有効数字 4 けた程度を見たので近似式は極めて精度の高いものと認めることができる。

7. 付録—Taylor 展開と前進差分

本論文中の誤差を求めるためには $|\Delta T|$, $|x| \ll 1$ な

る ΔT , x に対して次のように二次の項までとれば、よいことがわかったので、次のような式を作り近似式を求めるために用いた。

カム曲線

$$S(T + \Delta T) = S(T) + V(T)\Delta T + \frac{1}{2}A(T)(\Delta T)^2 + \dots \quad (51)$$

$$S\left(T + \frac{1}{2}\Delta T\right) = S(T) + \frac{1}{2}V(T)\Delta T + \frac{1}{8}A(T)(\Delta T)^2 + \dots \quad (52)$$

余弦関数・正弦関数

$$g(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots \quad (53)$$

とすると $\cos g(x)$ の Taylor 展開は次のようになる。

$$\cos g(x) = \cos a_0 - (a_1 \sin a_0)x - \frac{1}{2}(2a_2 \sin a_0 + a_1^2 \cos a_0)x^2 + \dots \quad (54)$$

また $\sin g(x)$ の Taylor 展開は次のようになる。

$$\sin g(x) = \sin a_0 + (a_1 \cos a_0)x + \frac{1}{2}(2a_2 \cos a_0 - a_1^2 \sin a_0)x^2 + \dots \quad (55)$$

文 献

- (1) FANUC Series 15-MA/15-MF/150-MA 取扱説明書, B-61224/05, FANUC LTD, (1988), 36-68.
- (2) 西岡, 平面カム機構の輪郭制御(第1報), カーテシアン座標系におけるカム輪郭の分割法, 機講論, No. 930-63, E (1993-10), 237.
- (3) 西岡, 平面カム機構の輪郭制御(第2報), 極座標系におけるカム輪郭の分割法, 山梨講演会講演論文集, (1993-10), 72.
- (4) Nishioka, M., Locus Compensation of Tool for Contouring of Cams by Specific Machine Tools, *Missenschaftliche Zeitschrift der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock*, ISSN 0863-1204(1987), 32.