短い直線セグメントからなる多角形平面輪郭誤差の拡大表現*

丘 華^{*1}Magnifying Representation of Contouring Errors for Polygonal Planar Profile
Composed of Short Linear SegmentsHua QIU^{*1}^{*1} Kyushu Sangyo Univ., Dept. of Mechanical Engineering
Matsukadai 2-3-1, Higashi-ku, Fukuoka City, 813-8503 Japan

This paper proposes a new representation approach to magnifying the contouring errors of a polygonal planar profile composed of short linear segments. In comparison with other methods, the proposed approach requires the less computation work in date operation process and enables to employ a larger magnification constant under a condition of effectively preventing the occurrence of jumping loops in obtained error curves. The practical examples, for evaluating the motion trajectory error of a machining center and the machining error of a finished work piece, are presented together with detailed discussions. These examples sufficiently illustrate the effectiveness of the proposed approach.

Key Words : Contouring Error, Motion Trajectory Error, Magnifying Representation, Polygonal Planar Profile

1. 緒 言

マシニングセンタ (MC) を用いて複雑な曲線輪郭を加工する際に、微小線分 (直線セグメント) からなる工具経路がよく利用される。この場合、セグメント間の NC 加減速運動により、指令経路に対して工具の実際経路に誤差が発生し、加工物の精度が低下することがある⁽¹⁾。MC の運動精度に及ぼす NC 加減速運動の影響を明らかにするためには、短い直線セグメントからなる MC の運動軌跡または加工した工作物の輪郭を測定し、得られた結果を指令する運動経路または工具経路と詳細に比較して検討する必要がある^{(2), (3)}。通常、指令経路の寸法に比べて実際の運動軌跡と工作物輪郭の誤差ははるかに小さいので、指令経路全体に対して実際の運動軌跡と工作物輪郭の誤差を拡大して表現すれば、検討作業の遂行は容易になる。運動軌跡誤差と工作物輪郭誤差の拡大表現が同様な問題であるので、説明を簡潔にするため、以下には指令する運動経路と工作物の理想輪郭を理論輪郭、測定した運動軌跡と工作物輪郭を実測輪郭と呼ぶ。

直線セグメントからなる多角形平面輪郭誤差の拡大表現に関しては、従来図1に示す手法が利用されている⁽⁴⁾。理論輪郭の各頂点 (直線セグメントの接続点) において、輪郭の内側 (前後のセグメントのなす角度が 180° より小さい側) に角 2 等分線、輪郭の外側 (内側と反対する側) には頂点から前後のセグメントの垂直線を引いて、誤差を拡大表現するための各領域を定める。輪郭の内側にはいる実測輪郭の測定点、例えば、図中の点 A と点 B について、角 2 等分線を境として、それぞれ対応するセグメントへの垂直線の垂足から測定点までの距離 MA と NB を測定点 A と B の誤差とする。また、垂直線にそって、垂足からの距離が誤差値と誤差拡大倍率 k の積 $k \times MA$ と $k \times NB$ になる点 A' と点 B' を測定点 A と B の輪郭誤差の拡大表現位置とする。一方、輪郭の外側にはいる実測輪郭に関しては、理論輪郭の頂点とセグメントの垂直線からなる扇形領域に属する測定点、例えば、図中の点 C について、扇形の頂点 T から点 C までの距離 TC を測定点 C の誤差とし、点 T から点 C を通る直線上に距離が $k \times TC$ になる点 C' を測定点 C の輪郭誤差の拡大表現位置とする。輪郭の外側に位置して扇形領域にはいない測定点、例えば、図中の点 D について、その誤差と誤差拡大表現位置は輪郭の内側における測定点と同じ方法で決める。

* 原稿受付 2013 年 4 月 6 日

^{*1} 正員, 九州産業大学工学部 (〒813-8503 福岡県福岡市東区松香台 2-3-1)
E-mail: chiu@ip.kyusan-u.ac.jp

Fig. 1 Error magnification by traditional method

Fig. 2 Error magnification by Ibaraki-Matsubara's method

測定点の順番にそって各測定点の誤差拡大表現位置をつなぐと、実測輪郭の誤差曲線が得られる。この誤差拡大表現法は簡単であるが、理論輪郭の頂点のまわりに実測輪郭が理論輪郭の内側にはいると、本来の実測輪郭にないループ状の部分が誤差曲線に現れ、誤差形状の詳細を判読しづらくなる問題がある⁽⁴⁾。

上述の問題を解決するために、Ibaraki と Matsubara は図 2 に示す誤差拡大表現法を提案した⁽⁵⁾。その方法では、理論輪郭の外側にはいる実測輪郭の誤差とその拡大表現が従来の方法と同じであるが、理論輪郭の内側にはいる実測輪郭に関しては次のように取り扱う。すなわち、図 2(a)に示すように、拡大倍率を考慮して誤差表示の最大範囲の値を前もって決め、この値に基づいて理論輪郭の内側に輪郭の各構成直線セグメントのオフセット直線を引き、隣り合うオフセット直線の交点を定め、これらの交点から対応する 2 つの直線セグメントへ垂直線を引く。そうすると、1 つの直線セグメントの内側には 3 つの領域が生成される。つまり、セグメントの両端において、セグメントの端点、オフセット直線の交点、この交点からセグメントへの垂直線の垂足で構成される 2 つの三角形領域と、セグメントの中央部の矩形領域である。矩形領域にはいる実測輪郭の測定点、例えば、図 2(a)における点 A の場合、その誤差と拡大表現位置の決め方は従来の方法と同じである。三角形領域にはいる実測輪郭の測定点、例えば、図中の点 B については、オフセット直線の交点 C から点 B を通る直線と直線セグメントとの交点 N の位置を決め、点 N から点 B までの距離 NB を測定点 B の誤差とする。点 N から点 B を通る直線上に距離が誤差拡大倍率と NB の積になる点 B' を測定点 B の輪郭誤差の拡大表現位置とする。Ibaraki と Matsubara の方法は、比較的長い直線セグメント間の接点付近に現れる誤差曲線のループ形状の解消に有効であるが、多数の短い直線セグメントからなる理論輪郭に対して誤差曲線の生成に手間が増える。また、場合によって誤差の拡大できる倍率に強い制限がかかる可能性がある。例えば、図 2(b)に示すように、理論輪郭の k 番目セグメントの両端点における角 2 等分線の交点 C は、誤差を拡大表現するための三角形領域の最大範囲を定めている。誤差曲線にループ形状が発生しないことを保証するには、測定輪郭内側の三角形領域に位置する測定点の最大表現誤差の大きさが線分 EC の長さを超えてはいけない。

以上のことをふまえて、本研究では、多数の短い直線セグメントからなる平面輪郭を対象とし、誤差曲線上のループ形状発生を有効に抑えけるとともに、データ処理が簡単で誤差拡大倍率の制限が少ない新しい輪郭誤差拡大表現方法を提案する。また、実際の MC 運動軌跡と工作物輪郭の誤差評価例を通して、提案方法の有効性を示す。

2. 誤差拡大表現方法

理論輪郭を n 個の直線セグメントで構成する場合、 i 番目セグメント ($i=1, 2, \dots, n$) の終点 T_i の座標を $(x_{t,i}, y_{t,i})$ とし、その始点 T_{i-1} の座標を $(x_{t,i-1}, y_{t,i-1})$ とする。図 3(a)に示すように、 i 番目セグメントと $i+1$ 番目セグメントの接点 T_i (理論輪郭の i 番目頂点と呼ぶ) における角 2 等分線の傾き角 ϕ_i の値は次式による。

$$\begin{cases} \phi_i = (\theta_i^- + \theta_i^+)/2 \\ \theta_i^- = \text{atan2}\{(y_{t,i-1} - y_{t,i}), (x_{t,i-1} - x_{t,i})\} \\ \theta_i^+ = \text{atan2}\{(y_{t,i+1} - y_{t,i}), (x_{t,i+1} - x_{t,i})\} \end{cases} \quad (1)$$

式中の $\text{atan2}(Y, X)$ は Y/X の逆正接関数であり、その値は Y と X の符号の組合せによって $[0, 2\pi]$ の領域で唯一に決まる。頂点 T_i での角 2 等分線は次式で表される。

Fig. 3 Proposed magnifying presentation method for contouring errors of polygonal planar profile

$$y - y_{t,i} = \tan \phi_i (x - x_{t,i}) \quad (2)$$

i 番目頂点と $i-1$ 番目頂点での角 2 等分線の式を連立して解けば、その交点 C_i (以下、 i 番目の中心点と呼ぶ) の座標 $(x_{c,i}, y_{c,i})$ が得られる。

一方、図 3(a)からわかるように、次の条件を満たせば、実測輪郭の測定点 $J(x_j, y_j)$ が点 T_{i-1}, T_i, C_i からなる扇形領域に位置する。

$$\begin{cases} \phi_{i-1} < \text{atan2}\{(y_{c,i} - y_j), (x_{c,i} - x_j)\} \leq \phi_i & \text{if } \phi_{i-1} < \phi_i \\ \phi_{i-1} > \text{atan2}\{(y_{c,i} - y_j), (x_{c,i} - x_j)\} \geq \phi_i & \text{if } \phi_{i-1} > \phi_i \end{cases} \quad (3)$$

また、点 J と中心点 C_i をつなぐ直線および i 番目セグメント直線の式はそれぞれ式(4)と式(5)である。

$$y - y_j = (x - x_j)(y_{c,i} - y_j)/(x_{c,i} - x_j) \quad (4)$$

$$y - y_{t,i-1} = (x - x_{t,i-1})(y_{t,i} - y_{t,i-1})/(x_{t,i} - x_{t,i-1}) \quad (5)$$

式(4)と(5)を連立して解けば、両直線の交点 S の座標 (x_s, y_s) が得られる。線分 SJ を測定点 J の誤差とする。さらに、誤差曲線上の測定点 J の対応点 $\tilde{J}$ の位置を点 J と中心点 C_i を通る直線上に置き、その座標 $(\tilde{x}_j, \tilde{y}_j)$ は誤差拡大倍率 k を用いて次式から定める。

$$\begin{cases} \tilde{x}_j = x_s + k(x_j - x_s) \\ \tilde{y}_j = y_s + k(y_j - y_s) \end{cases} \quad (6)$$

また、明らかにほかのセグメントより長いセグメント、例えば、図 3(b)における $i-1$ 番目セグメントの場合、隣の i 番目セグメントに対応する中心点 C_i から $i-1$ 番目セグメントに垂線を引き、その垂足 T_{i-1}^* 、頂点 T_{i-1} 、中心点 C_i からなる三角形領域にはいる実測輪郭の測定点 N の誤差を上述の方法で表現するが、直線 $C_i T_{i-1}^*$ の右側の測定点 M の誤差を従来の方法で表現すると、輪郭誤差の形状判読と理解は容易になる。

一方、理論輪郭を構成する直線セグメントの中で非常に短いものがある場合、その端点における角 2 等分線による三角形領域が小さく、誤差曲線上のループ形状の発生を回避するために使用できる誤差拡大倍率の値も小さくなる。ループ形状の発生を回避しながら、より大きな誤差拡大倍率を使用しようとするときは、中心点の位置を適切に調整することが有効な方策である。例えば、図 3(c)に示すように、 $k-2$ 番目 $\sim k+2$ 番目のセグメントに関連する輪郭誤差拡大表現領域を大きくするために、関係する 5 個の中心点 $C_{k-2}, C_{k-1}, \dots, C_{k+2}$ を図示する位置に移動すると、新しい中心点 C^* とそれぞれの頂点で構成する各三角形の領域は大きくなる。それによって、これらの三角形領域にはいる測定点について、より大きな誤差拡大倍率の使用が可能となる。

従来の方法および Ibaraki と Matsubara の方法と比べて、提案した誤差拡大表現法は、誤差曲線上のループ形状の発生を最大限に回避することができ、しかもデータ処理が最も簡単である。ただし、得られた輪郭誤差曲線は従来の輪郭偏差の表現と一致していない面がある。それに対して、輪郭誤差の形状を理解しやすくするためには、必要に応じて輪郭の各頂点と対応する中心点とつながる直線を補助線として誤差曲線に併記すればよい。

Fig. 4 Polygonal profile used in the example

Fig. 5 Error curves obtained by the traditional method

Fig. 6 Error curves obtained by Ibaraki-Matsubara's method

3. 輪郭誤差曲線の例

MC の運動軌跡と加工輪郭形状の測定結果に提案方法を適用し、その効果を確認する。

ワシノ製 WMC-4 型の立形 MC の主軸に高速スピンドルを取付け、それに直径 3mm の 2 枚刃エンドミルを装着して図 4 に示す平面輪郭を仕上げた。この輪郭は Y 軸に対称になり、1 個の長い直線セグメント (100mm) とその両側に順に接続している 83 個の長さ 0.257mm~3.916mm の直線セグメントからなる。輪郭の仕上げは長いセグメントの右端点から始め、時計回りに 1 周して座標原点で終了する。切削条件として、工具回転数を 50000rpm、送り速度を 5000mm/min、工具軸方向の切込みを 5mm、半径方向の切込みを 0.05mm にした。ミットヨ製 BHN506 型の三次元測定機 (CMM) 上に直径 3mm のプローブを使用して加工物の輪郭を測定した。輪郭 1 周にわたる測定点の数は 3460 である。輪郭切削中に MC の NC プログラムにエンドミルの半径を補正せず、CMM の測定結果にもプローブの半径補正をしなかったため、測定した輪郭の形状はそのまま加工中の実際工具経路に対応している。一方、文献(3)に示した方法を利用して、同じ運動条件での MC 運動軌跡をシミュレーションした。その結果を加工物輪郭の形状測定結果と比較する。シミュレーション計算には、軌跡 1 周にわたって 7190 点を記録した。

従来の誤差拡大表現方法を用いて得られた加工物輪郭の誤差と工具経路のシミュレーション誤差を図 5 に示す。誤差曲線に各セグメントの接続点の付近でループ形状が発生し、特に短いセグメントの接続点部分において複数個のループが絡み合っている。

輪郭頂点まわりの三角形領域を最大限に設定し、Ibaraki と Matsubara の方法を使用して得られた加工物輪郭の誤差と工具経路のシミュレーション誤差を図 6 に示す。図 5 の結果と比較すると、誤差曲線にループ形状の発生箇所が少なくなり、程度も軽くなっているが、約 20 個の輪郭頂点の付近でループ形状の発生が確認された。

提案した方法を用いて得られた加工物輪郭とシミュレーションした工具経路の誤差を図 7 と図 8 に示す。図 7 に使った誤差拡大表現領域の詳細を図 4 の左下に示している。つまり、各中心点を理論輪郭の対応頂点における

Fig. 7 Error curves obtained by the proposed method with a standard area division

Fig. 8 Error curves obtained by the proposed method with an adjusted area division

角 2 等分線の交点として定めた。ただし、1 個目のセグメントについて、その両端に接続するセグメントの対応中心点 C_2 と C_{84} から垂直線を下して三角形領域を生成し、中央部に矩形領域を設けた。図 7 からわかるように、輪郭の左右側に最も短い 4 つのセグメント (2 番目と 3 番目, 83 番目と 84 番目) の頂点まわりに誤差曲線にループ形状が発生した。このループ形状を解消するために、図 4 の右下に示したように、中心点 $C_2 \sim C_5$ の位置を C_6 の位置に、中心点 $C_{81} \sim C_{84}$ の位置を C_{80} の位置に移動した。新しい中心点位置に対応する誤差曲線を図 8 に示す。誤差曲線にループ形状が全く発生していない。また、図 6 と図 7 における誤差曲線 A 部の形状を比較すると、両者の違いがほとんど見られない。なお、図示した結果から、シミュレーションした工具経路の誤差が実測した工作物輪郭の誤差とよく一致していることがわかった。

以上の結果から、提案した誤差拡大表現方法の有効性ととも、文献(3)に示した方法を利用すれば供試 MC の運動軌跡に及ぼす NC 加減速運動の影響を精度よく推定できることも確認された。

4. 結 言

MC の運動軌跡や多角形平面輪郭の形状を詳細に検討するために、多数の短い直線セグメントからなる平面輪郭の誤差を拡大して表現する新しい方法を提案した。この方法を利用すれば、誤差曲線の生成アルゴリズムが非常に簡単になり、誤差曲線上にループ形状が発生しないための、使用可能な誤差拡大倍率も大きい。実際の MC 運動軌跡と加工物輪郭の誤差評価例に適用した結果、提案方法の有効性が確認された。

文 献

- (1) 高橋宣行, 入口健二, 加藤清敬, “面補間 NC における加減速補償による高品位加工”, 精密工学会誌, Vol. 71, No. 10 (2005), pp. 1309-1314.
- (2) 森本喜隆, 市田良夫, 大橋利仙, 佐藤隆之介, 加藤勝彦, “工作物測定結果に基づくマシニングセンタの精度補償に関する研究 (第 1 報) — 直交 3 軸の幾何学的誤差および寸法誤差の計測とその補償 —”, 精密工学会誌, Vol. 69, No. 12 (2003), pp. 1718-1723.
- (3) 丘華, 久保明雄, 岡本経寿, “セグメント間の加減速運動に起因するマシニングセンタの直線補間工具経路の誤差推定”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, No. 770 (2010), pp. 2719-2728.
- (4) ACCOM User's Manual (English ed.), (2010/10), p.98, Dr. Johannes Heidenhain GmbH.
- (5) Ibaraki, S. and Matsubara, A., “On the magnification of two-dimensional contouring errors by using contour-parallel offsets”, Precision Engineering, Vol. 33, No. 4 (2009), pp. 322-326.