一般円筒形状部品の旋削作業における加工精度補償システム*

松村 隆^{*1}, 石井章宏^{*2}, 臼井英治^{*1}

Error Compensation in Turning Process of General Cylindrical Shape

Takashi MATSUMURA^{*3}, Akihiro ISHI and Eiji USUI^{*3} Tokyo Denki University, Dept. of Mechanical Engineering,
2-2 Kanda Nishiki-cho, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8457 Japan

Error compensation system in longitudinal turning process is developed with prediction model. This paper discusses dimensional error of general product shapes having taper steps for practical use of the system. Expression of product shape is an important issue of this study because geometrical features can not be specified before operations. One shot cutting is performed before operations so that system can acquire compliance of workpiece to be machined. System can recognize the geometrical features as compliance of each cutting position. In prediction model, cutting force, cutting temperature, and flank wear are analyzed; and then dimensional error is associated with past similar operations by neural network. System, therefore, predicts dimensional error for the recognized shape in any cutting conditions with cutting tool geometry; and compensates for predicted error by modifying depth of cut. Some experiments, where workpiece has a taper step, show the system can keep high machining accuracy with considering the effect of cutting conditions, coolant, flank wear, and the change of product shape on machining error.

Key Words: Turning, Accuracy, Error Compensation, Cutting Force, Cutting Temperature, Tool Wear, Compliance, Neural Network

1. まえがき

製品生産において所定の加工精度を確保し維持するためには、使用工具と製品形状に基づく幾何学的な工具軌跡だけでなく、切削状態を考慮した工具経路生成が重要となる。このような加工精度補償に関し、切れ刃位置をインプロセス測定によって補正する補償法¹⁾と、加工誤差の数学的モデルに基づいて補正するもの²⁾がある。著者らは単純丸棒の旋削加工を対象として、後者の観点から切削状態を考慮した加工誤差予測モデルとこれに基づく精度補償システムを提案した³⁾。しかしながら実際の加工現場では段付き、テーパ等を有する種々の工作物を加工している場合が多く、このような一般的な円筒形状部品に対する加工精度補償が実用的に重要であることは言うまでもない。

以上の背景を踏まえ本報では一般円筒形状部品の外径長手旋削加工の精度補償システムについて報告する。一般形状の場合は単純丸棒と異なり予め形状パラメータを特定できないため、形状特徴をいかに表現し精度補償に反映するかが問題となる。本報ではテーパ段付きを有する工作物形状を例として、まず工作物コンプライアンスを形状パラメー

タとした加工誤差予測モデルとこれに基づく加工精度補償について示す。次いで実切削の精度補償試験により、開発したシステムの妥当性、実用性を示す。

2. 加工精度補償システム

2.1 対象作業問題 ここでは図1に示すテーパや段付き等を有する一般的な円筒形状部品のNC旋盤による外周長手旋削加工を対象として、直径誤差の精度補償について議論する。また仕上げ作業として、製品を長手方向1パスで加工する場合を考える。工具はスローアウェータイプを使用し、工具ホルダーは所定の突き出し長さでタレットに装着されているものとする。びびり振動による加工精度悪化については切削条件の変更等のびびり振動対策によって精度の大幅な改善が可能であるため、ここではびびり振動のない安定した切削作業の加工精度補償について議論する。またNCによる連続加工の場合工具摩耗の進行にともなう刃先後退によって幾何学的な加工誤差が生じるだけでなく、切削力や切削熱が増加しこれらが加工精度に影響する。ここでは幾何学的な誤差に対しては刃先補正値を変更することを前提とし、工具摩耗による切削状態の変化が加工誤差に及ぼす影響について議論する。

2.2 加工誤差予測 図1の作業における加工誤差要因のうち切削状態に関するものは、主に切削力による工作物の変形と、切削熱の発生による工具と工作物の熱膨張であ

* 原稿受付 1999年5月17日。

^{*1} 正員、東京電機大学工学部 (〒101-8457 東京都千代田区神田錦町2-2)。^{*2} (株)東京精密 (〒300-0006 土浦市東中貫町4)。
E-mail: tmatsumu@cck.dendai.ac.jp

Fig. 1 Turning operation

Diameter $a = 23.6 \sim 29.9\text{mm}$, Diameter $b = 13.6 \sim 19.9\text{mm}$

Fig. 2 Prediction model

る⁴⁾。なお文献⁵⁾によれば、長手方向に1パスの切削で仕上げる作業では、工作物の熱膨張が加工精度に及ぼす影響を無視できる。したがって工作物形状は主に力学的要因として加工精度に影響すると見なせる。一般に各誤差要因と加工誤差との関係は複雑なため、予測においては図2のように加工誤差要因をニューラルネットワークの入力情報とした加工精度予測モデルによって、切削各点の工作物直径誤差を予測する。すなわちニューラルネットワークは幾つかの実作業における加工誤差を学習することにより、実施する作業と類似な学習事例から加工誤差を連想するのである。なお切削条件として与えている切込みは、あくまでも見掛けのものであり、それより加工誤差を差し引いた本来の切込みとは異なるが、ここでは見掛けの切込みに対して加工誤差を予測するようにニューラルネットワークを学習している。以下にニューラルネットワークの入力情報を示す。

- (1) 工作物コンプライアンス
- (2) チャックから切削点までの距離
- (3) 切削力
- (4) 切削時間
- (5) 切削面積とその部分での平均切削温度との積

入力情報のうち(1)から(3)は切削中の力学的な誤差要因に

関するものであり、(4)と(5)は工具の熱膨張に関するものである。単純丸棒の加工では工作物形状情報として長さや直径といった量を入力することが可能であるが、本報で対象としているテーパや段付きなどを有する工作物に対しては、あらかじめ形状パラメータをニューラルネットワークの入力情報として特定できない。そこで工作物形状が加工誤差の力学的要因となっていることに着目し、形状パラメータのかわりに工作物コンプライアンスを入力情報とする。本来このコンプライアンス情報は有限要素法による解析が可能であるが、切削各点のコンプライアンスを計算するには膨大な時間がかかること、切れ刃と工作物の接触点やチャック保持部の境界条件の設定が困難であることから実用的ではない。そこで加工する工作物形状に対し一回の試行切削で加工誤差 ε を求め、後述の解析で得られる切削背分力 F_t を用いて次式のコンプライアンス ν を計算する。

$$\nu = \frac{\varepsilon}{F_t} \quad (1)$$

なお試行切削では加工誤差の熱的要因の影響を取り除くため湿式で行う。また本来は切削主分力による工作物上下方向のたわみも考慮すべきではあるが、この主分力方向の変位が加工誤差に及ぼす影響は水平方向のそれより小さいの

Fig. 3 Three dimensional cutting model

Table 1 Orthogonal cutting data and thermal constants

ϕ , shear angle; β , friction angle on tool face; τ_s , shear stress on shear plane; and l_c , tool-chip contact length; V , cutting speed; t_1 , undeformed chip thickness

$$\phi = \exp(-0.073V + 1.458 \times 10^3 t_1 + 0.780\alpha - 1.471) \text{ rad}$$

$$\beta = \exp(-0.040V - 1.522 \times 10^3 t_1 + 0.597\alpha + 0.037) \text{ rad}$$

$$\tau_s = \exp(0.009V - 2.011 \times 10^2 t_1 + 0.414\alpha + 4.045) \times 9.8 \text{ MPa}$$

$$l_c = t_1 \exp(-0.096V - 5.255 \times 10^3 t_1 - 0.504\alpha + 2.797) \text{ mm}$$

	Work	Tool
Thermal conductivity W/(m · K)	46.05	67.0
Specific heat J/(kg · K)	502	398
Density kg/m ³	784	1120

で、ここでは無視している。入力情報のうち、切削力と切削温度は解析的に計算される。また所与の逃げ面摩耗幅に対し、文献⁶⁾の方法を用いて摩耗面の応力分布と温度分布を計算し、逃げ面摩耗による切削力の増加、切削温度の上昇を得る。この加工誤差予測モデルではニューラルネットワークの学習後、システム実行時においても加工しようとする工作物形状に対して最低一回の試行切削と誤差測定が必要であるが、ひとたびコンプライアンス特性が得られれば、上述の解析により任意の切削条件、工具形状、逃げ面摩耗幅に対して各切削点における加工誤差を予測できる。またシステムの運用においては各工作機械ごとにニューラルネットワークを用意し、それぞれの機械上で得られた加工誤差データを学習する。これにより工作機械特性をネットワークの重み係数の形で取り込むことが可能となる。したがってシステムはある程度の学習を繰り返すことによって、工作機械特性と切削状態を考慮しながら加工誤差を精度良く予測できるようになる。以下に予測手順を示す。

- (1) エネルギー解析法⁷⁾によって、摩耗のない切れ刃で切削する場合の切削三分力を計算する。エネルギー解析法では、図3のように三次元の切削モデルを切り屑流出角 η_c によって決まる切り屑流出方向と切削速度方向を含む二次元化断面の切削モデルの集積と考えて、切削

Table 2 Results of energy approach

Cutting conditions: material cut, 0.45% carbon steel; tool, carbide P20 (0,5,11,6,15,15,0.8); cutting speed, 200 m/min; depth of cut, 1.0 mm; feed rate, 0.2 mm/rev; lubrication, dry.

Chip flow angle	η_c	20.28 deg
Effective rake angle	α_e	4.69 deg
Effective shear angle	ϕ_e	23.95 deg
Friction angle	β	40.24 deg
Tool-chip contact length	l_c	1.441 mm
Shear velocity	V_s	211 m/min
Chip velocity	V_c	86.0 m/min
Principal component	F_H	472 N
Feed component	F_V	254 N
Radial component	F_T	197 N

Fig. 4 Prediction of temperature distribution

Cutting conditions are the same as in Table 2, where flank wear land is 0.2mm.

力を計算する。ただし切り屑流出角は、表1に示す二次元切削データを用いて、せん断面のせん断仕事とすくい面の摩擦仕事の和を計算し、これが最小となる方向に設定する。表2は、エネルギー解析法によって得られた切削モデルの諸量と切削三分力の一例である。

- (2) 得られた切削力に基づきせん断面せん断応力 τ_s 、すくい面摩擦応力 τ_f を図3のように分布させる。逃げ面摩耗痕上には、図示の応力分布 σ_f , τ_f を仮定する。ただし摩擦係数は1であり、垂直応力と摩擦応力は等しい⁶⁾。
- (3) 有限差分法により切削温度分布を計算する。表1に解析で用いた工具と被削材の物性値を示す。発熱源はせん断面のせん断仕事と、すくい面および逃げ面の摩擦仕事で与えられる。
- (4) 工具すくい角を α 、逃げ角を γ とすれば、逃げ面の摩耗速度 dV_B/dt は次式の摩耗特性式で計算できる。

$$\frac{dV_B}{dt} = C \sigma_f \exp\left(-\frac{\lambda}{\theta_f}\right) \left(\frac{1}{\tan \gamma} - \tan \alpha\right) V \quad (2)$$

ただし C , λ は摩耗特性定数, σ_f , θ_f は逃げ面上の応力と温度, V は切削速度である。本報では炭素鋼 S45C と超硬工具 P20 の組み合わせに対するものとして、文献⁸⁾の手法により得た $C=1.728 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{N}$, $\lambda=9845 \text{ K}$ を用いた。

- (5) 逃げ面摩耗痕上のすべての点での摩耗速度が一定で

Fig. 5 Compensation algorithm
 Δ_{lim} is a convergence parameter.

なければ, (2)で仮定した応力分布 σ_f と τ_f を修正し, 摩耗速度が一定となるまで(3)~(5)を繰り返す. これにより最終的に摩耗痕上の応力分布と摩耗速度, およびその時の温度分布が求まる. 図4に逃げ面摩耗幅が0.2mmの時の切込み中央部での切削速度と切り屑流出速度を含む面内の切削温度分布を示す.

- (6) 摩耗幅 V_b における背分力方向と送り分力方向を含む面内にかかる逃げ面力 F_{ff} と, 主分力方向にかかる逃げ面力 F_{fn} を次式で計算する.

$$\begin{cases} F_{ff} = \int_S \int_0^{V_b} \sigma_f dlds \\ F_{fn} = \int_S \int_0^{V_b} \tau_f dlds \end{cases} \quad (3)$$

ただし S は切削している切れ刃の長さである. これらを(1)で得られた切削力に加算し, ニューラルネットワークの切削力情報とする.

- (7) 工具の熱膨張量を評価するために, (5)で得られた温度分布から, すくい面上の切り屑接触域と逃げ面摩耗痕部での平均温度を計算する. この結果とこれらの接触面積との積をネットワークの入力情報とする.
- (8) 工作物コンプライアンス, チャックと切削点間の距離とそれに対応した切削時間, (6), (7)の結果をニューラルネットワークに入力し, 加工誤差を予測する. ただし冷却水使用時は, 切削時間によって変化する工具の熱膨張量を無視するために切削時間を0とする.

2.3 加工精度補償 加工精度を補償するために, 前項の加工誤差予測に基づいて各切削点の切込みを調節し, NCプログラムを修正する. 図5は切込み補正のアルゴリズムである. ここで切込みの補正によりニューラルネットワークの入力情報である切削力と切削温度が変化し加工誤差の予測値も変わる. そこで同図のように所定の加工精度が得られるまで切込みの補正と加工誤差の予測を繰り返す. 以下に精

度補償アルゴリズムを示す.

- (1) 要求切込み d を設定し, これを最初の d_{mod} とする.
- (2) 前項の手順に従い, 切込み d_{mod} に対する加工誤差 ε を予測する. ただし削りすぎを負, 削り残しを正とする.
- (3) 次式により補正值 Δ を計算する.

$$\Delta = d - (d_{mod} - \varepsilon) \quad (4)$$

- (4) $\Delta^2 < \Delta_{lim}$ ならば d_{mod} を最終的な切込み補正值とし終了する. ただし Δ_{lim} は補正繰り返しの終了条件である.
- (5) 新しい d_{mod} を次式で計算し, (2)にもどる.

$$d_{mod} \leftarrow d_{mod} + \Delta \quad (5)$$

2.4 システムの運用 ニューラルネットワークに基づく加工誤差予測モデルでは, ネットワークの学習が不可欠である. そこで開発したシステムは学習モードと実行モードによって運用される. 学習モードでは種々の工作物形状に対し, システムは以下の要領で学習する.

- (1) 試行切削を実施し各切削点の加工誤差を測定する. システム内部ではこの切削条件に対する切削力を計算し, 式(1)より各切削点でのコンプライアンス特性を得る.
- (2) 同形状の工作物を種々の切削条件で加工し, 各切削点の加工誤差を測定する. システム内部ではこれらをニューラルネットワークの出力情報として登録する.
- (3) システム内部では実施した各切削条件に対する切削力, 切削温度を計算し, これらにもとづいてニューラルネットワークの入力情報を得る. ただし工作物コンプライアンスは(1)で得られたものを用いる. したがって各切削条件に対してコンプライアンス特性を計算する必要はない.
- (4) ニューラルネットワークの入力情報と出力情報の組み合わせを教師データとし, バックプロパゲーション法に基づいてニューラルネットワークの学習を実行する.

ニューラルネットワークの学習後, 加工する工作物に対し下記の実行モードで精度補償用のNCプログラムを生成する.

- (1) 試行切削により各切削点の加工誤差を測定する. システム内部では学習モードと同様にコンプライアンス特性を計算する.
- (2) 実施しようとする作業の切削条件, 工具形状, 工具摩耗幅を入力する. システム側では入力条件に対する切削状態を予測し, ニューラルネットワーク処理により加工誤差を予測する.
- (3) 加工誤差予測と切込みの調整を前項の補償処理手順に従って繰り返し, NCプログラムを修正する.

3. システムの妥当性, 実用性の評価

開発したシステムを用い図1の工作物形状に対して切削試験を実施し, 以下の観点からシステムの妥当性を示す.

- (1) 試行切削によるコンプライアンス特性獲得法の妥当性

Fig. 6 Compliance of workpiece shape in Fig. 1(a)

Fig. 7 System configuration

- (2) ニューラルネットワークの学習性, 学習効果
- (3) ニューラルネットワークによる予測性, 連想効果
- (4) 精度補償アルゴリズムの妥当性

また実用性としてシステムが以下の影響を考慮できることを示す。

- (1) 冷却水の有無が加工精度に及ぼす影響
- (2) 工具逃げ面摩耗が加工精度に及ぼす影響
- (3) 工作物形状の変化が加工精度に及ぼす影響

まず工作物半径方向に静的荷重を加え, 半径方向変位と荷重からコンプライアンスを計算し, これと試行切削によるコンプライアンス特性獲得法で得られた特性とを比較した。図6は図1(a)の工作物形状に対する結果である。若干の誤差はあるものの両者はほぼ一致しており, 試行切削によるコンプライアンス特性獲得法の妥当性が確認できる。

次に図7のハードウェア構成で加工精度補償試験を実施した。実験ではターニングセンタのチャックに装着された被削材の外径を, レーザ外径測定器(KEYENCE, LS-3032)を用いて測定する。ただしチャックとレーザ外径測定器が干渉するため, 保持部より 28.0mm 離れた点まで計測した。測定データはパソコンを経由してエンジニアリングワークステーション(HP9000/715)に送られ, 学習モードではニューラルネットワークがこれらのデータを学習する。一方実行モードでは加

(a) Training results of neural network

Cutting speed is 100 m/min, which neural network has learned.

(b) Association results of neural network

Cutting speed is 180 m/min, which neural network has not learned.

Fig. 8 Prediction and compensation of machining error

Diameter of workpiece: $a = 25.8\text{mm}$, $b = 15.8\text{mm}$ in Fig. 1(a). Cutting conditions: material cut, 0.45% carbon steel; tool, carbide P20 (0,5,11, 6,15,15,0.8); depth of cut, 1.0 mm; feed rate, 0.2 mm/rev.

工誤差予測と精度補償処理を行い, パソコンを介して NC データを NC コントローラに転送する。

ここでは 12 条件 4 形状の加工事例で得た 912 の教師データを用いてニューラルネットワークの学習を行った。また学習モード, 実行モードとも工作物のコンプライアンス特性を獲得する際には, 切削速度 200m/min, 切込み 1.0mm, 送り 0.2mm/rev の湿式で試行切削をした。図 8(a)はニューラルネットワークが学習した図 1(a)の工作物形状の一切削事例に対し, システムが予測した各切削点の加工誤差と精度補償後の加工誤差であり, 同図(b)はニューラルネットワークが学習していない切削事例についての結果である。また比較のため精度補償していない加工誤差を示す。なお誤差は削りすぎを負, 削り残しを正としている。両図ともシステムが予測した加工誤差と実際のそれとがよく一致しており, ニューラルネットワークの学習性, 予測性が確認できる。また精度補償した切削作業における加工誤差は同図(a)については $\pm 2\mu\text{m}$ 以内, (b)についても $\pm 4\mu\text{m}$ 以内に改善されており精度補償の妥当性も確認できる。これらの結果は加工誤差に対する冷却水の効果を示したものである。冷却水を使用した場合, 主な加工誤差要因は工作物の変形による削り残しであり, 被削材自由端側は加工誤差が大きくなっている。一方冷却水を使用しない場合, 切削時間とともに工具が熱膨張

Fig. 9 Error compensation of the operation with flank wear
Workpiece shape and cutting conditions are the same as in Fig. 8(a), where flank wear land is 0.1mm.

する。したがってチャック部分に近づくほど、被削材の剛性が増して変形量が少なくなるとともに、工具の熱膨張により実質の切込みが大きくなり同図(a)の乾式切削の結果では削りすぎとなっている。一方同図(b)の高切削速度では切削時間が短く工具熱膨張が小さいことから削りすぎになっていない。システムが予測した加工誤差はこれらの傾向とよく一致しており、予測の妥当性が確認できる。図9は逃げ面摩耗の有無に対するシステムの誤差予測と精度補償効果を調べたものである。逃げ面摩耗によって逃げ面力が大きくなるため、全体的に切れ刃が鋭利な場合より削り残しになっており、システムがこの傾向を十分に予測できていることがわかる。また精度補償により加工精度が $\pm 4\mu\text{m}$ 以内に改善されている。図10はニューラルネットワークが学習した工作物と異なる図1(b)の形状に対する結果である。なおこれはシステムが工作物形状を認識できるように、試行切削によってコンプライアンス特性を獲得し、試行切削の切削条件と異なる条件で加工したものである。予測した加工誤差と実際のそれとの誤差がほぼ一致しており、また精度補償の結果加工精度が $\pm 4\mu\text{m}$ 以内に改善されている。これよりニューラルネットワークの連想による予測性が確認でき、システムが工作物の形状変化に対しても十分に対応できることがわかる。

4. 結 論

テーパ、段付き等を有する一般的な円筒形状部品の外周長手旋削加工を対象として、加工誤差予測法とこれに基づいた切込み補正による加工精度補償システムを開発し、以下の結論を得た。

- (1) 一般的な円筒形状部品の加工誤差予測モデルでは、工作物形状パラメータとして加工誤差に対する力学的影響を考慮し、各切削点におけるコンプライアンスを用いる。コンプライアンス特性は一回の湿式による試行切削で測定された加工誤差と解析的に得られる切削力を用いて計算する。
- (2) 加工誤差予測では切削力、切削温度、逃げ面摩耗による切削力、切削熱の変化を解析的に求め、これをニューラ

Fig. 10 Error compensation of the workpiece shape in Fig. 1(b)
Diameter of workpiece: $a = 23.7\text{mm}$, $b = 13.7\text{mm}$ in Fig. 1(b).
Cutting conditions are the same as in Fig. 8(a).

ルネットワークの入力情報として各切削点での加工誤差を予測する。これによりひとたび工作物のコンプライアンス特性が得られれば、切削条件、冷却水の有無、逃げ面摩耗が加工精度に及ぼす影響を考慮した加工誤差予測ができる。

- (3) 精度補償においては、切込みの変更により予測される切削状態が変わるため、切込みの補正と加工誤差の予測を繰り返す。これにより高精度な円筒形状の加工が実現できる。

引用文献

- 1) 例えば河野嗣男, 面田学, 岡崎裕一, 小沢則光, 三井公之:インプロセス計測加工精度補償の研究, 精密工学会誌, 54-8 (1988), 1463-1468.
- 2) 浅尾晃通, 坂本正史, 水垣善夫: NC 命令補正方式による高精度旋削加工, 精密工学会誌, 57-7 (1991), 1241-1246.
- 3) 松村隆, 臼井英治: 工具摩耗を考慮した旋削作業の加工精度補償システム, 日本機学会誌論文集 C 編, 63-615 (1997), 4031-4036.
- 4) Matsumura, T., Obikawa, T., Shirakashi, T., and Usui, E.: An Adaptive Prediction of Machining Accuracy in Turning Operation, Trans. of NAMRI/SME, 22, (1994), 305-312.
- 5) 竹内芳美, 坂本正史, 佐田登志夫: NC 旋盤の工具熱変形補正による加工精度の向上, 精密機械, 46-11 (1980), 1392-1397.
- 6) Usui, E., Shirakashi, T., and Kitagawa, T.: Analytical Prediction of Cutting Tool Wear, Wear, 100, (1984) 129-151.
- 7) Usui, E., Hirota, A., and Masuko, M.: Analytical Prediction of Three Dimensional Cutting Process, Trans. of the ASME, 100, (1978), 222-228.
- 8) Matsumura, T., Obikawa, T., Shirakashi, T., and Usui, E.: Autonomous Turning Operation Planning with Predicting Tool Wear and Surface Roughness, Trans. of NAMRI/SME, 21, (1993), 359-366.