工作機械の熱変形最適補正システムの開発

白鳥正樹*・于　強**・影山雄介***

1. 緒　言

近年、工作機械の分野では、機械相互のネットワーク化とその構成要素となる個々の機械の加工精度向上という２つのキーワードを中心に機械の設計および開発が行われている。これは、高い加工精度を持つさまざまな機械を高度にシステム化し、これらを無人で長時間稼動させることにより、生産性を飛躍的に向上させることを狙いとしている。

機械の加工精度向上のためには、克服されなければならない問題が多く存在する。特に精度を長時間維持することにとって問題となるのは、機械フレームの熱変形が影響した機械の軸移動精度の経時的な変化である。機械フレームが熱変形する要因は、機械稼動中に自身が発する熱の影響と、環境温度の影響の２点が挙げられる。機械フレーム上の不均一な温度分布が影響する熱変形は、これら２つの要因が複雑に作用しあい、精密な熱変形量を予期することを困難にしている。

そこで本論文では、機械の熱変形量を高精度に予測し機械の補正制御を行うための手法として、応答曲面法とクラスター分析手法を組み合わせた、階層化応答曲面を提案する。

ここで、応答曲面法とは、n 個($n>1$)の予測変数 x_i ($i=1, 2, \cdots, n$)から予測される応答 y の関係式を近似したものであり、式(1)で表される。

$$y=f(x_1,x_2,\cdots,x_n)+e \qquad (1)$$

ここで e は誤差を表す。式(1)の応答曲面近似式は多項式で表されるが、適当な変数変換を行うことで線形化可能な非線形関数も表すことが可能であり、現在では構造最適化の分野で一般的な手法となっている。一方、クラスター分析は、外的基準なしに分類を自動的に行う方法である。ここで分類とは、対象としているデータ同士がが似ているか似ていないかにより判断を行い、いくつかのグループに分けることを表す。データマイニング手法に１つとして確立している。

本論文で提案する、階層化応答曲面は、実験計画から１つの応答曲面を求める従来の方法とは異なり、実験計画から得られるデータをあらかじめクラスターリングし階層化したグループごとに応答曲面を作成する。この手法の場合、異質なデータを排除することにより、応答曲面近似式を高精度にすることを可能にする。

2. 工作機械の熱変形とその影響因子

工作機械の分野では応答性の良さ、制御の容易さ等から油圧機器を用いた機械が多く存在する。しかしながら、機械稼動時間の増加とともに油圧機器の温度が上昇するため、油圧機器が熱源となり機械が熱変形し、機械の精度を変化させる。機械の精度を悪化させる熱変形は、機械フレーム上の不均一な温度分布によって引き起こされる。また、機械フレームの熱変形は温度分布のパターン（温度分布の形状）の影響を受ける。つまり、図１の例に示すように、ある２点(A, B)間にさまざまな温度分布パターンが存在し、かつA点およびB点の温度がそれぞれの温度分布パターンで同じ値であっても、そのパターンの形状が異なれば、そのときの熱変形量や変形の方向は異なることが考えられる。したがって、機械フレームの熱変形量を説明する場合、機械フレーム上の温度分布パターンを取り上げなければならない。したがって、機械フレームの熱変形量を推定する場合、その説明変数は温度分布パターンを採用することになる。

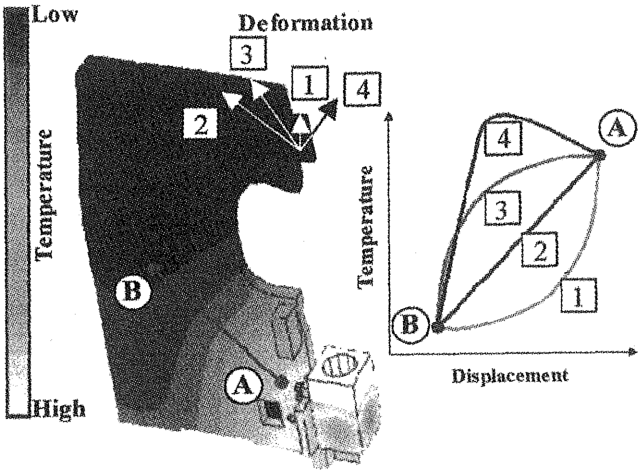

Fig.1 Relationship between the thermal deformation and the temperature distribution pattern

3. 熱問題の解決手段

3・1 熱変形補正システムのコンセプト 機械の熱変形を補正制御する手段として、熱変形量の応答曲面近似式を用いることとした。このとき、特性値として機械フレームの熱変形量、説明変数として温度分布パターンを採用した。作成された応答曲面近似式は、機械の熱変形の補正に使用するため、高精度に推定できなければならない。従来から、高精度な応答曲面近似式を作成するための方法として、有意な説明変数項のみを採用する逐次選択法、3次以上の高次モデルへの拡張等の検討が行われてきた。いずれの場合にも、その推定精度は応答曲面近似式を作成するためのトレーニングデータ量に依存するため、推定範囲が広がるに伴いトレーニングデータ量も増大する。また、高精度化に向け近似式をアップデートする場合、どのようなトレーニングデータが必要なのか検討することは困難である。これらのことを考慮し、高精度な応答曲面近似式を作成するために、本論文では、クラスター分析を応用した。ここでは、説明変数である温度分布パターンでクラスター化した分布空間ごとに応答曲面近似式を作成し、全体として階層化する手法の検討を行った。この手法の場合、推定範囲が広範囲にわたっても、はずれ値の影響を排することができること、似通った説明変数パターンで場合分けした近似式を作成できることから、その近似精度は高くなることが考えられる。また、近似式のアップデートを行う場合、必要なトレーニングデータをクラスター化された説明変数パターンから知ることができる。また、クラスターの下層に行くほど、統計的に似通ったデータでクラスターがまとまっているため、特定のパターンでの近似精度は非常に高くなることが考えられる。

ここでクラスター化した温度分布パターンのデータベースと、それぞれの階層に対応する応答曲面近似式を用いて、実際の熱変形の補正は図2に示す手順で行う。

図2の手順は大きく分けて3つの部分から成り立っている。第1は温度分布パターン実測部である。第2に実測された温度分布パターンとデータベースの間でパターン照合を行う部分である。第3はパターン照合で得られた最も適切な応答曲面近似式を用いて、機械の補正を行う部分である。

また、手順第2で用いるデータベース、すなわち熱変形補正の核となる温度分布パターンのクラスターとそれぞれのクラスターに対応する応答曲面近似式からなるデータベースは図3の手順で作成した。

図3の手順は、大きく分けて3つの部分から成り立っている。第1は特性値抽出部である。ここでは、偏りのない多数のデータを得るために、直交表を用い実験計画を行った。この直交表で設定した条件に基づき汎用解析ソルバを用いて計算を行い、その結果の特性値を抽出する。第2は、クラスター分析部である。ここでは直交表で割り振った制御変数の条件を、似通ったパターン同士でクラスター化させる部分である。第3は、応答曲面近似式作成部である。ここでは、個々のクラスター内で、特性に対し相関の高い説明変数を選択し、さらに有意な次数成分や交互作用成分を逐次選択法で選択しながら応答曲面近似式を作成する。なお、近似式の精度が必要な場合、すなわち有効なトレーニングデータを増やす場合、どのようなデータが必要か対応するクラスターのパターン形状から容易に予想ができるため、範囲を絞った実験計画のズーミングが可能である。

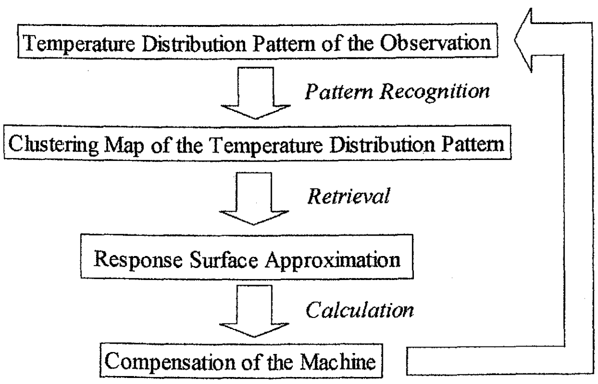

Fig.2 Optimum compensation system for the thermal deformation

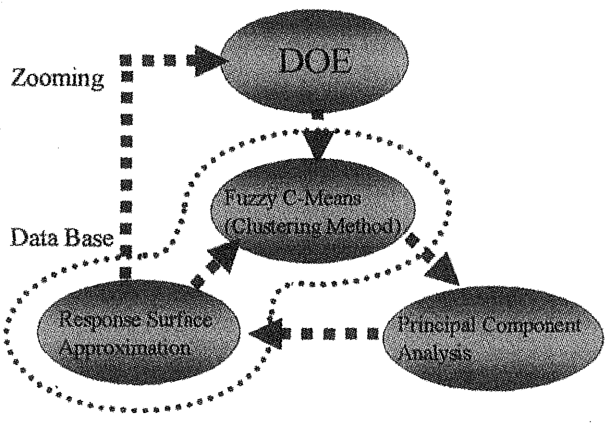

Fig.3 Method of the making of response surface database using clustering

3・2　データベースの作成　直交表を用い実験計画を作成する。ここでは、作動油の温度と環境温度を水準にふった。この直交表の実験計画を元に、汎用解析ソルバを用いて計算を行い、その結果得られた特性値である熱変形量と以降の説明変数となる温度分布パターンを抽出する。なお抽出する温度分布パターンは特性値の変動を最もよく表すパターンを選択した。

特性の異なるデータが混在している場合、全てのデータを同一の関数により回帰することが好ましくない場合がある。このとき、データを分割することにより局所的に、あるいはグループごとに回帰分析を行うことが必要となる。これらのデータを、いかに意味のある体系に組織立てるか、すなわちいかに分類を行うかが問題となる。ここでは、得られた温度分布パターンのデータ集合に対しクラスター分析を行った。クラスター分析とは、異なる性質のもの同士が混ざり合っている集団（対象）の中から、互いに似たものを集めて集落（クラスター）を作り、対象を分類しようとする方法の総称である。クラスター分析では、個体間の類似の度合いを表す方法として、個体間の距離（非類似度）を用いている。このとき、距離の小さいものほど類似度が高いということになる。このような非類似度を手がかりにして、階層的クラスター分析を行うプロセスは、以下の手順をたどる。

I.　1つずつの対象を構成単位とするn個のクラスターから出発する。

II.　クラスター間の非類似度行列から、最も類似度の高い2つのクラスターを融合して1つのクラスターを作成する。

III.　新しく作られたクラスターと他のクラスターとの非類似度を計算し、非類似度行列を更新して2に戻る。

IV.　クラスターが1つになっていれば終了し、そうでなければ2から3を繰り返す。

個体間の非類似度の計算方法は、さまざまなものが提案されている。ここでは最も一般的である、ユークリッド平方距離によるウオード法を取り上げた。

n個の対象が存在し、n個体が $x_{1n}, x_{2n}, \cdots, x_{mn}$ のようにm変量の観測値を持つとき、個体 i と j 間の非類似度 d_{ij} を表すユークリッド平方距離は式(2)により定義される。

$$d_{ij} = \sum_{h=1}^{m} \left(x_{hi} - x_{hj}\right)^2 \tag{2}$$

クラスター(p)に含まれる i 番目の対象を考え、その変量 x_i に関する観測値を $x_{ii}^{(p)}$ と表せば、クラスター(p)内の偏差平方和の合計 S_p は式(3)で表される。

$$S_p = \sum_{j=1}^{m} \sum_{i=1}^{n} \left(x_{ji}^{(p)} - \bar{x}_j^{(p)}\right)^2 \tag{3}$$

クラスター(p)と(q)を融合してクラスター(t)を作成するとき、クラスター内平方和の合計の増分ΔS_{pq}は式(4)で表される。

$$\Delta S_{pq} = \frac{n_p n_q}{n_p + n_q} \sum_{j=1}^{m} \left(\bar{x}_j^{(p)} - \bar{x}_j^{(q)}\right)^2 \tag{4}$$

ウオード法では、クラスター内平方和ができるだけ小さいことを望ましいと考え、各段階でクラスターの融合による平方和の増分が最も小さい(p)と(q)を融合する。

2つのクラスター(p), (q)を融合して作られたクラスター(t)と、別のクラスター(r)を融合するときの平方和の増分ΔS_{tr}は式(4)で表される。

$$\begin{aligned}\Delta S_{tr} &= \frac{n_t n_r}{n_t + n_r} \sum_{j=1}^{m} \left(\bar{x}_j^{(t)} - \bar{x}_j^{(r)}\right)^2 \\ &= \frac{n_p + n_r}{n_t + n_r} \Delta S_{pr} + \frac{n_q + n_r}{n_t + n_r} \Delta S_{qr} - \frac{n_r}{n_t + n_r} \Delta S_{pq}\end{aligned} \tag{5}$$

したがって、式(5)から非類似度の更新は式(6)のように表される。

$$d_{tr} = \frac{n_p + n_r}{n_t + n_r} d_{pr} + \frac{n_q + n_r}{n_t + n_r} d_{qr} - \frac{n_r}{n_t + n_r} d_{pq} \tag{6}$$

次に、クラスター化された個々の階層のデータに対する応答曲面近似式を作成する。作成する応答曲面近似式の説明変数としてさまざまな場所の温度分布パターンを取り上げるが、説明変数どうしの相関が強いため、多重共線性の問題が生じる。そこで、説明変数の変動を最もよく説明できる主成分を抽出し、これら主成分を用いて応答曲面近似式を作成した。ここでは主成分分析*2 と回帰の同時分析を行った。回帰主成分分析では、説明変量$x_1, x_2, \cdot\cdot\cdot, x_s$ からp個（一般に$p<s$）の総合特性値 $z_1, z_2, \cdot\cdot\cdot, z_p$

$$\begin{aligned} z_1 &= l_{11}x_1 + l_{12}x_2 + \cdots + l_{1s}x_s \\ &\vdots \\ z_p &= l_{p1}x_1 + l_{p2}x_2 + \cdots + l_{ps}x_s \end{aligned} \tag{7}$$

を選び、zに対して重回帰、

$$x_{s+i} = \gamma_{i1}z_1 + \gamma_{i2}z_2 + \cdots + \gamma_{ip}z_p + e_i \tag{8}$$

を行ったときに、誤差e_iの分散の和が最小になるような総合特性値を得ることを目的とする。すなわち、主成分回帰分析では説明変量の変動を最も多く説明できる主成分をzとして用いているのに対して、回帰主成分分析

では目的変量の変動を最も多く説明できる総合特性値を用いることを目的としている。具体的には説明変量 $x_1, x_2, \cdots, x_{s+t}$ との相関が最大となるように、線形結合の係数 l を求める。

ここで、説明変量間の分散・共分散行列を

$$S = (s_1, \cdots, s_s) = \{s_{ij}\} \tag{9}$$

説明変量と目的変量間の共分散行列を

$$R = (r_1, \cdots, r_t) = \{r_{ij}\} \tag{10}$$

目的変量間の分散・共分散行列を

$$W = (w_1, \cdots, w_t) = \{w_{ij}\} \tag{11}$$

とすると、$\{x_1, x_2, \cdots, x_s \quad s\ ; x_{s+1}, x_{s+2}, \cdots, x_{s+t}\}$ の分散・共分散行列は下式となる。

$$\begin{pmatrix} S & R \\ R^T & W \end{pmatrix} \tag{12}$$

ただし、上付き文字 T は転置を表す。x_{s+i} と総合特性値 z との相関係数 μ_i は

$$\mu_i = (l^T r_i)(l^T S l)^{-1/2} (w_{ii})^{-1/2} \tag{13}$$

であるので、μ_i の線形和の最大化、すなわち

$$\max \sum_i \mu_i m_{0i} = l^T R m \tag{14}$$

$$\text{s.t.} \quad l^T S l = 1 \tag{15}$$

$$m^T m = 1 \tag{16}$$

なる最適化問題の解 l が求めるべき l である。ただし、m の要素 m_i は

$$m_i = (w_{ii})^{-1/2} m_{0i} \tag{17}$$

であり、式(15)、式(16)の拘束条件は唯一の l, m を得るためのものである。求まった l により定まる分散が 1 である総合特性値（正準変量）を用いて重回帰を行うことで、回帰式が得られる。

以上から、熱変形補正システムで利用するデータベースとして、クラスター化した温度分布パターンとそれに対応する応答曲面近似式を作成した。

4. システム妥当性の検討

上記の熱変形補正システムの妥当性を検討するため、実際に機械にシステムを導入し実験を行った。実験の熱条件は、6 時間の機械稼動の中で、機械の作動油温度と環境温度を随時変化させた（図 4-①）。一方で、開発した熱変形補正システムにより補正量をリアルタイムに機械にフィードバックし軸補正を行った。図 4-②に実際の熱変形量と推定との比較を示す。この結果から、開発したシステムは、機械の熱変形を 5 μm 以内という非常に小さな誤差で推定することが可能であるといえる（図 4-③）。また作動油や環境温度の変化に対する機械の熱変形の応答遅れも非常によく推定できるといえる。

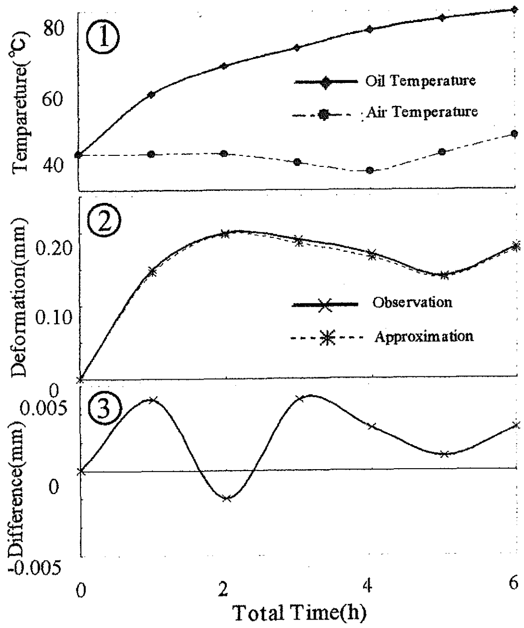

Fig.4 The experimental results

5. まとめ

本論文では、直交表とクラスタリング手法を組み合わせ、階層化した応答曲面を作成する手法を示した。この手法により、推定精度の高精度化と推定値計算速度の効率化を行うことが可能となった。すなわち、異質なデータパターンやはずれ値の影響を受けない高い精度を持つ応答曲面近似式群を得ることが可能であり、また、温度分布パターンによって階層化しているので、実測された温度分布パターンと最も似たデータベース中のパターンとの照合は、非常に効率よく行うことが可能となるため、機械の制御でのリアルタイム処理には有効であるといえる。ここで取り上げた手法は、応答曲面近似式を用いた制御システムに、その高精度性と効率的処理をもたらすものであり、工作機械の制御に限らず、その適応範囲は広く、特に劣悪な温度環境下に置かれる機器への応用に有効であると考えられる。

参考文献

1) 西田、クラスター分析とその応用、内田老鶴圃、(1988)

2) 稲垣、数学シリーズ・数理統計学、裳華房、(1999)

* 横浜国立大学大学院 工学研究院 教授

** 工学研究院 助教授

*** 株式会社アマダ 要素開発部