

## 階層的クラスタリングに基づく応答曲面法\*

影 山 雄 介<sup>\*1</sup>, 于 強<sup>\*1</sup>

## Response Surface Method Using Hierarchical Clustering

Yusuke KAGEYAMA<sup>\*2</sup> and Qiang YU<sup>\*2</sup> Department of Mechanical Engineering and Material Science, Yokohama National University,  
79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 240 8501 Japan

In the field of the numerical analysis, response surface method is one of the most practical optimization methods. The optimum design variable is obtained from response surface approximation under constraint condition in the optimization using response surface method. The authors have proposed hierarchized response surface method (H-RSM) using hierarchical clustering analysis in order to make high-precise response surface approximations. Response surface approximation is made in the every hierarchy cluster by the classification of the design pattern. Therefore, hierarchized response surface approximation is high accuracy because of approximate by the local pattern.

**Key Words:** Hierarchical Response Surface Method, Hierarchical Clustering Analysis, Design Pattern

## 1. 結 言

数値解析の分野における最適化手法の一つとして、応答曲面法(Response Surface Method: RSM)を用いた最適化<sup>(1)~(3)</sup>があげられる。一般的な応答曲面法は、問題を曲面近似することで、凸型の連続関数によって解空間を近似できる。また、近似した連続関数を用いて近似的に感度計算が容易に行えるなど、最適化問題において利点が多いといえる。応答曲面法において応答曲面近似式は、設計変数と特性値の間の近似関数を何点かの解析あるいは実験結果を用いて作成している。近年では、効率よく解析や実験点のパラメータ設定するために実験計画法<sup>(4)~(7)</sup>を用いた手法が提案されている<sup>(8)~(12)</sup>。応答曲面法を用いた最適化では、この応答曲面近似式を用いて、制約条件のもとで目的関数を満たす最適な設計変数を求める。したがって、最適解の精度は応答曲面の近似精度に依存すると言える。

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、精度が高くなるようにサンプル点の組み合わせを工夫する<sup>(8)~(10)</sup>、最適化過程において逐次的に応答曲面を更新する<sup>(11)~(12)</sup>などの方法が検討されて

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データ量に依存するため、推定範囲が広がるに伴いデータ量も増大する。また、高精度化に向け応答曲面近似式をアップデートする場合、どのようなデータが必要なのか検討することは困難である。以上のことを考慮し、本論文では、高精度な応答曲面近似式を作成するために、階層的クラスタリング(Hierarchical Clustering Analysis: HCA)<sup>(13)~(16)</sup>を応用した手法を提案する。この手法では、設計変数-特性値の集合を設計変数の形状(設計変数パターン)で階層的クラスタリングし、クラスタリングされた階層ごとに応答曲面近似式を作成する方法で、階層的応答曲面法(Hierarchical Response Surface Method: H-RSM)とした。この方法により設計変数パターンでクラスタリングすることで、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、似通った設計変数パターンで場合分けできることから、少ないデータ数で高い精度の近似式を作成することができる。また、応答曲面近似式のアップデートを行う場合、必要なデータをクラスタリングされた設計変数パターンから知ることができる。また本論文では、高精度な軸制御が要求される工作機械の熱変形における補正制御に階層的応答曲面法から導かれる階層化された近似式を適用した例を示し、この手法の有効性を確認した。

\* 原稿受付 2003 年 8 月 19 日。

<sup>\*1</sup> 正員、横浜国立大学大学院工学研究院(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)。

E-mail: kage@swan.me.ynu.ac.jp



2・3 階層的クラスタリング 特性の異なるデータ集団が混在している場合、全てのデータを同一の近似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、領域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によって、より高い近似精度を得ることがよくある。これらのデータを、いかに効率的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、データを分類する手法としてクラスター分析手法を取り上げる。クラスター分析とは、異なる性質のもの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。クラスター分析には、ファジィクラスタリング<sup>(16)(20)</sup>に代表されるような非階層的クラスタリングと階層的クラスタリングの二つに大別できる。

階層的クラスタリングとは、グループが入れ子を構成するようにクラス（個体のグループ）を生成していく方法があるのに対して、非階層的クラスタリングでは単にグループが生成される。非階層的クラスタリングは、クラスターの数をあらかじめ指定し、個体を指定した個数のクラスに分割する。この場合、はずれ値や異質なデータの影響を取り除くためには、クラスター分割に試行錯誤が必要となる。ここでは、分割数の考慮の必要ない階層的クラスタリングを取り上げる。

階層的クラスタリングにおいて、クラスターの生成は、類似度あるいは非類似度を基準として、個体を一組づつ結合し、小さなクラスターから次第に大きなクラスターにしていく。したがって、クラスター生成の手続きは、類似度（非類似度）の定義とクラスター生成の二つの段階に分けられる。ここで、個体  $x_i (1 \leq i \leq n)$  で構成される個体全体の集合  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 、個体  $x_i, x_j$  間の類似度  $d(x_i, x_j) (1 \leq x_i, x_j \leq n, x_i \neq x_j, x_i, x_j \in X)$  を定義する。また個体  $x_i$  をクラスター  $G_i$  とするとき、全てのクラスターを含むクラスター  $g$  を  $g = \{G_1, G_2, \dots, G_n\}$  とする。このとき、階層的クラスタリングのアルゴリズム (Agglomerative Hierarchical Clustering: AHC) は以下になる。

- I. 初期設定  $n$  個のクラスター（個体）について以下を定義する。

$$\begin{aligned} G_i &= \{x_i\} \\ d(G_i, G_j) &= d(x_i, x_j) \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 $1 \leq i, j \leq n, i \neq j$

- II. 類似度最大（あるいは類似度最小）のクラスター対を結合する。

$$d(G_q, G_r) = \min_{i,j} d(G_i, G_j) \quad (3)$$

ここで、 $G_q$  と  $G_r$  を  $g$  から取り除き、 $G' = G_q \cup G_r$  を  $g$  に追加する、この際、クラスター数を一つ減らす。

- III. すべての  $G_i \in g, G_i \neq G'$  についてクラスター間の類似度  $d(G', G_i)$  を再計算する。

- IV. 以後 II, III をクラスター数が 1 になるまで繰り返す。

上記 AHC II で取り上げる類似度（非類似度）はさまざまなものが提案されているが、ここでは Ward 法を取り上げる。この方法はユークリッド空間の距離（Ward 距離）による類似度を前提としている。すなわち、個体  $x_i$  を構成する  $p$  個の要素のうち  $k$  番目の要素の値を  $x_i^k$  とすると、個体  $x_i - x_j$  間の Ward 距離は、式(4)で表される。ここで要素とは、個体  $x_i$  に含まれる値である。

$$d(x_i, x_j) = \|x_i - x_j\|^2 = \sum_{k=1}^p (x_i^k - x_j^k)^2 \quad (4)$$

このときクラスター  $G$  に対する重心  $M(G)$  を式(5)のようにおくと、その各構成要素は式(6)で表される。

$$M(G) = (M^1(G), M^2(G), \dots, M^p(G)) \quad (5)$$

$$M^k(G) = \frac{1}{|G|} \sum_{x_i \in G} x_i^k \quad (6)$$

ここで、クラスター  $G$  における重心と各個体との距離の差の二乗和  $E(G)$  を式(7)のように定義すると、異なる2つのクラスター  $G_i, G_j$  間の距離の差は式(8)のように表せる。したがって、AHC II のクラスターの結合則は式(9)で表されるように、 $\Delta E$  が最小となる  $G_q, G_r$  を選択することになる。

$$E(G) = \sum_{x_i \in G} \|x_i - M(G)\|^2 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta E(G_i, G_j) &= E(G_i \cup G_j) \\ &\quad - E(G_i) - E(G_j) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\Delta E(G_q, G_r) = \min_{G_i, G_j \in g, i \neq j} \Delta E(G_i, G_j) \quad (9)$$

一方、AHC III の類似度  $d(G', G_i)$  の再計算は、結合する前の  $d(G_q, G_i), d(G_r, G_i)$  を用いて表せる。 $d(G_i, G_j) = \Delta E(G_i, G_j)$  と定義すると、初期クラスター  $G_i = \{x_i\}$  に対して、式(10)のように表せる。

$$d(G_i, G_j) = d(\{x_i\}, \{x_j\}) \quad (10)$$

$$= \frac{1}{2} \|x_i - x_j\|^2$$

ここで,  $G' = G_q \cup G_r$  のとき

$$d(G', G_i) = \frac{1}{|G_q| + |G_r| + |G_i|} \left[ (|G_q| + |G_i|) d(G_q, G_i) + (|G_r| + |G_i|) d(G_r, G_i) - |G_i| d(G_q, G_r) \right] \quad (11)$$

以上のように, AHCⅢの再計算は, 個体間の類似度を参照することなく, クラスター間の類似度のみを用いて再計算がなされる。

**2・4 階層的応答曲面近似式の作成** 階層的クラスタリングによって分類された各クラスターのデータを用いて応答曲面近似式を作成する。

応答曲面法は関数形状に関係なく, 近似関数を求めて最適化に使用する方法であるが, 線形関数または線形変換可能な関数は最小二乗法を用いることで, その関数の係数を統計的に推定することが可能である<sup>(24)(25)</sup>。

応答関数として2次の多項式を採用した場合, 応答曲面近似式は式(12)となる。

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (12)$$

ただし,  $k$  は設計変数の数,  $x_i$  は設計変数,  $\beta$  は多項式係数である。また2次の多項式を作成するために必要なサンプル点の個数  $S$  は式(13)となる。

$$S = \frac{(k+1)(k+2)}{2!} \quad (13)$$

したがって, 階層的クラスタリングによって階層化したデータを用いて, 各階層で応答曲面近似式を作成する場合,  $S$  を基準とする。すなわち, 図3に示すように,  $S$  を満たす階層以上の各層で応答曲面近似式を作成する。

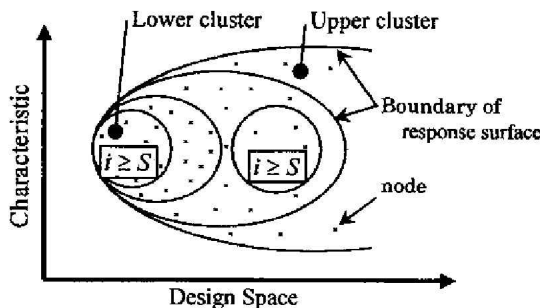


Fig. 3 Boundary of hierarchical response surface

**2・5 近似精度向上のためのモデル生成** 階層的応答曲面法は, 設計変数-特性値の集合を設計変数パターンでクラスター化し, クラスター化された各階層ごとに応答曲面近似式を作成する方法である。したがって, 図3の下層のクラスターに行くほど, はずれ値や異質なパターンの影響を取り除くことができるため, 近似精度は高い。ここで, 回帰モデルの適合性を表す指標として, 自由度調整済み決定係数  $R^2$  を取り上げる。自由度調整済み決定係数  $R^2$  は, 単位自由度あたりの残差を比較しており,  $R^2$  が1に近いほど残差が少ない。すなわち回帰モデルの適合度が高いといえる。式(12)は, 高次の変数を一次の変数に置換すると, 多変数一次式に線形化できる。回帰式の係数  $\beta$  の推定に用いるサンプル点の総数を  $n$ , 変数の数を  $k$  とすると, 式(12)は式(14)に示す線形回帰モデルに行列表示できる。ただし,  $\varepsilon$  は誤差である。

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (14)$$

$$y = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{Bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}$$

$$\beta = \begin{Bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{Bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{Bmatrix}$$

誤差2乗和を最小化することから, 係数  $\beta$  の不偏推定量  $b$  は式(15)で表される。

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (15)$$

ここから残差平方和  $SSE$  は式(16)で表される。

$$SSE = y^T y - b^T X^T y \quad (16)$$

また, 応答  $y$  の平均値まわりの変動  $S_{yy}$  は式(17)で表される。

$$S_{yy} = y^T y - \frac{\left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2}{n} \quad (17)$$

以上から, 自由度調整済み決定係数  $R^2$  は式(18)となる。

$$R^2 = 1 - \frac{SSE / (n - k - 1)}{S_{yy} / (n - 1)} \quad (18)$$

図3に示す最下層の応答曲面のモデル適合度を向上させる ( $R^2$  を1に近づける) ためには, サンプル点を増やし, 曲面近似可能なさらなる下層を作成する必要がある。これにより, 近似精度を悪化させている設計変数パターンを分離して考えることが可能となる。モデルの生成は, 最低サンプル数  $S$  で構成される最下層クラスの結合 Ward 距離  $d(G_p)$  を基準に乱数で発生させる。すなわち式(19)に示すように, 生成するモデル  $G_x$  と対象としている最下層クラス  $G_p$  との Ward 距離  $d(G_x, G_p)$  が, 対象クラスの結合 Ward 距離以内になるとき, 確実に対象クラスに属するモデルを生成することが可能となる。

$$d(G_x, G_p) \leq d(G_p) \quad (19)$$

### 3. 適用例

本章では, 前述の階層的クラスタリングに基づく階層的応答曲面近似式の有効性を確認するため, 高精度な軸制御が要求される工作機械の熱変形量をリアルタイム補正するシステムに階層的応答曲面を適用した例を以下に示す。

**3・1 工作機械の熱変形** 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<sup>(23)~(25)</sup>。しかしながら, 機械稼動時間の経過とともに油圧機器内に流れる作動油の温度が上昇するため, 作動油および油圧機器が熱源となり, これらの熱源から機械フレームに熱が伝わり, 機械フレームが熱変形する。また, 環境温度および運転履歴の影響による機械フレーム上の温度の変化も機械フレームの熱変形を起こさせる。機械フレームの熱変形による機械の精度の変化は, これら三つの要因が複雑に作用

し合うため, その予測が非常に困難であった。ここでは熱変形による精度の変化が重要な問題となるプレスブレーキを取り上げる。図4にプレスブレーキを示す。図4に示すプレスブレーキは, 特に薄板を曲げ加工することに特化したプレスブレーキである。このプレスブレーキは, 左右の側板と上下のテーブルからその機械フレームが構成されている。上部テーブルは左右の側板の上部突起P点で結合されている。一方, それぞれの側板下部にはシリンダが配設しており, ピストンを介して下部テーブルと結合されている。シリンダのピストンは, 油圧により  $z$  方向に上下運動を行う。したがって, 曲げ加工を行う場合, 上部テーブルと下部テーブルの間に加工材を挿入し, 下部テーブルを上昇させ曲げ加工を行う。ここで取り上げたプレスブレーキの場合, 左右の側板に配したシリンダおよびピストンが大きな熱源となるため, この影響で左右側板や下部テーブルが熱変形し, 上下テーブル間の刃間精度を変化させる。このプレスブレーキは熱源の影響により,  $z$  方向の刃間精度に最大約 0.060mm の誤差が生じるため, 曲げ加工の精度は角度にして約 1 度以上の誤差が生じてしまう。

図5に図4で取り上げた上昇式プレスブレーキの片側側板における熱伝導解析結果の温度分布コンター図の例を示す。ここで取り上げた上昇式プレスブレーキは, 上部の突起P点に上部テーブルを取り付けるため, P点は絶対的な位置として保証されなければならない。しかしながら, シリンダから伝わる熱の影響で機械フレームが熱変形し, P点は  $x-z$  平面上のさまざまな量・方向に移動する。

プレスブレーキの熱変形による機械精度の変化の問題に対し現状では, 図4の検出板による機械的補正を行うのが一般的となっている。検出板は上部突起P点にピン支持固定されている。また, 検出板下部は  $z$  方

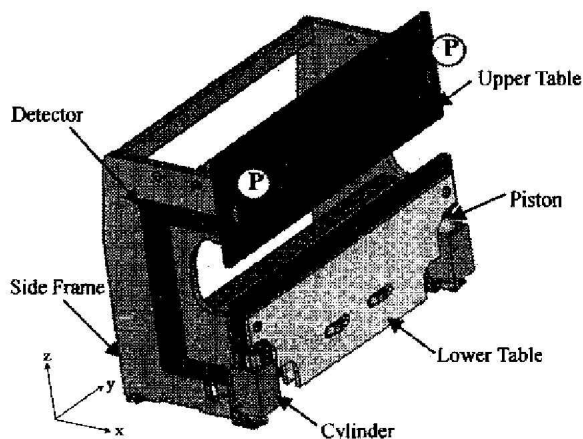


Fig. 4 Structure of up acting press brake

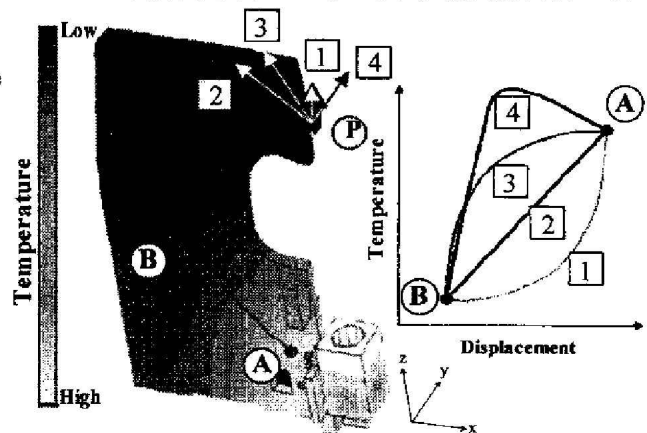


Fig. 5 Relationship between thermal deformation and temperature distribution pattern



向に自由度をもつように支持されており下部テーブルの稼動原点となっている。したがって、機械フレームの熱変形によりP点が移動すると、下部テーブルの稼動原点がそれとともに移動することで、機械のz方向の熱変形量をキャンセルする構造となっている。しかしながら、検出板による補正は機械的補正のため、検出板結合部のガタや検出板自体の熱変形等の問題があり、検出板による機械の熱変形補正には限界がある。

**3・2 熱変形の影響因子** 図5左に示すように、機械側板上に二点A、Bをおく。図5右に示すように、二点A-B間に1から4の温度分布パターンが存在する場合、この2点間のパターンの形状が異なれば、そのときのP点の熱変形量や変形方向は図5左の1から4のように異なる。また、機械側板上の温度分布形状は、環境温度の影響により容易にその形状は変化する。これらのことを考慮すると、機械側板の熱変形量および熱変形方向を説明する場合、機械側板上の温度分布形状を用いて説明しなければならないといえる。また、この熱変形問題は、温度分布パターンの微妙な形状の違いにより非常に強い多峰性を示す問題である。

**3・3 工作機械の熱変形補正システム** 前述から、機械の熱変形量および熱変形方向といった特性に対し、特定の形をした温度分布パターンが対応していることが考えられる。ここでは、階層的クラスタリングに基づく階層的応答曲面近似式を用いて、機械の熱変形に対するリアルタイム最適補正システムを構築した。これは、機械側板上の温度分布を計測し、そのパターンによる分類に基づいて、各クラスター層で作成される該当するパターンにおいて最も精度よく熱変形量をあらわせる応答曲面近似式を用いて機械の補正を行おうとするものである。ここで作成した応答曲面近

似式の設定変数(制御変数)は機械側板上に現れる温度分布のパターンを取り上げた。ここで、温度分布パターンとは、数点で離散化した温度の勾配の集合とした。機械の熱変形最適補正システムの概要を図6に示す。これは、大きく分けて三つの部分から成り立っている。第一は、機械の温度分布パターンを実際に測定する部位の決定である。この測定は、機械側板に直接熱電対を貼り付けて行う。なお熱電対による測定場所は、構造解析において特性に対し影響度の高い部分をあらかじめ特定しておく。第二は、近似式を導くためのデータベース部分である。ここは、構造解析から抽出した様々な温度分布パターンを階層的にクラスタリングし、その分布情報とそれぞれの階層に対応する熱変形量を表す応答曲面近似式から成り立っている。したがって、第一で実測された温度分布パターンと第二のデータベースの階層的クラスタリングした分布を照合(パターン認識<sup>(25)(27)</sup>)させることで、最も似ているパターンの階層を特定し、対応する応答曲面近似式を抽出することが可能となる。第三では、ここで抽出された応答曲面近似式を実測の温度分布パターンで計算し、計算値(熱変形量すなわち補正值)を機械にフィードバックし下部テーブル稼動原点の補正を行う。これらの試行を、機械稼動中に随時行う。これにより、機器の温度・環境温度の変化、すなわち機械側板の温度分布パターンの変化に応じた最適な補正を機械自体がリアルタイムで行うことが可能となる。

**3・4 データベースの作成** この熱変形補正システムは、機械側板上のさまざまな温度分布パターンを階層的クラスタリングした分布情報、クラスター各階層で作成される温度分布パターンを制御変数とする応答曲面近似式を補正のためのデータベースとしている。

まず、P点の熱変形に影響を及ぼす機械側板上の温

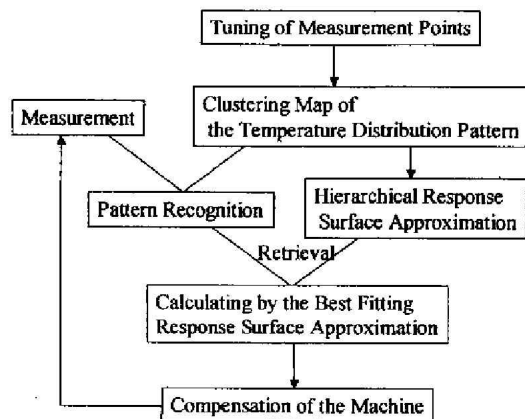


Fig. 6 Optimum compensation system for the thermal deformation of machine tools

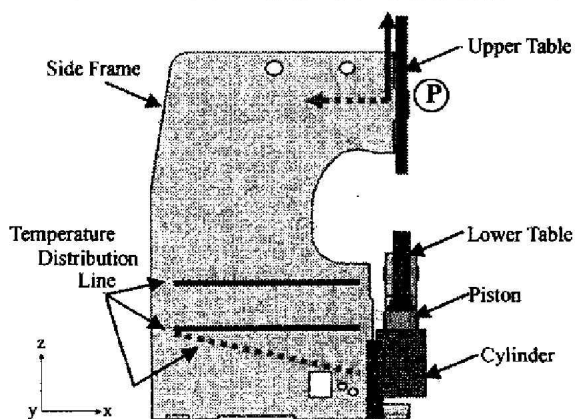


Fig. 7 Temperature distribution line on up acting press brake

度分布の場所を把握するために、数回の熱変形構造解析を行った。ここでは、作動油温度と環境温度を要因とし、実験計画法の直交表  $L16(4^5)$  を用いて構造解析を行った。水準範囲は、作動油温度が  $0^{\circ}\text{C}$  から  $60^{\circ}\text{C}$ 、環境温度は  $0^{\circ}\text{C}$  から  $45^{\circ}\text{C}$  に設定した。また、機械稼働時間は6時間とし、1時間ごとに各要因を設定した。

P 点の熱変形に影響を及ぼす温度分布の場所を特定するために、機械側板上のさまざまなラインにおける温度分布パターンと熱変形量との相関係数を計算した。ここでは式(20)に示すピアソンの積率相関係数  $r$  を用いた。

$$r = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (20)$$

ただし、 $n$  : 制御変数と特性値との組数、 $x$  : 制御変数、 $y$  : 特性値、 $\bar{x}$  : 制御変数の平均、 $\bar{y}$  : 特性値の平均である。ここで温度分布パターンは数点で離散化した各2点間の温度勾配とした。この計算の結果、ここで取り上げたプレスブレーキの場合、P 点の変形に大きな影響を及ぼす温度分布ラインは図7に示すようなラインであった。図7の温度分布ラインのうち、実線上の温度分布パターンはP 点の  $z$  方向の変形に大きく寄与し、点線上の温度分布パターンはP 点の  $x$  方向の変形に大きく寄与していることが計算からわかった。

次に、影響度の高い温度分布ラインでさまざまな温度分布パターンを発生させ階層的クラスタリングするために温度分布パターンのサンプル点を発生させる。この問題の場合、温度分布ライン上の温度勾配は直接制御できない。このため、あらかじめ制御可能な作動油温度、環境温度と温度分布ライン上の温度勾配との推定式を作成した。ここから、乱数を用いて温度分布ライン上の温度勾配を設定し、これらを満たす作動油温度・環境温度を計算し、得られた結果をもとに構造解析を行い、熱変形量を抽出する。以上から第2章の方法に従いデータベースを作成した。最終的に、階層的クラスタリングに用いた温度分布パターンの個体数(サンプル数)の組み合わせは486個、応答曲面近似式総数は102個を作成した。

**3・5 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。実験は、6時間の機械稼働の中で、機械の作動油温度と環境温度を図8-①のように随時変化させた。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下部テーブルの稼働原点の補正を行った。また、比較のために階層的クラスタリングを施さない場合の応答曲面近似による補正も行った。図8-②に実際の熱変形量と本システムによる補正量、階層的クラスタリングを施さない場合の応答曲面近似による補正量との比較を示す。また、図8-③に実際の熱変形量と本システムによる推定値との差分、実際の熱変形量と階層的クラスタリングを施さない場合の応答曲面近似による推定値との差分を示す。この結果から、開発したシステムを用いると、時間推移に関係なく機械の熱変形を  $0.005\text{mm}$  以内という非常に小さな誤差で補正することが可能であると言える。

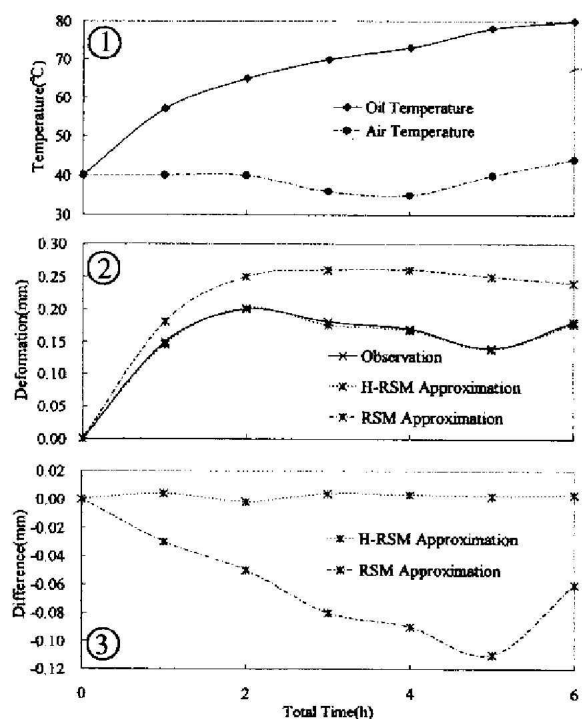


Fig. 8 The experimental results

#### 4. 結 言

本論文では、多峰性問題の応答曲面の近似精度を向上させる方法として、階層的クラスタリングを応用した階層的応答曲面法を提案した。これは設計変数-特性値の集合を設計変数パターンで階層的クラスタリングし、階層ごとに応答曲面近似式を作成する方法である。ここで提案した階層的応答曲面法の利点は以下に示す三つが挙げられる。

1. 多くのサンプル点で構成される多様な設計変数

パターンを、似通ったパターンの集合に分類して考えることができることから、多峰性を一連の簡単な応答曲面の組み合わせで表すことが可能となり、その近似が容易になる。

2. 階層化することで、大域的応答曲面から近似精度の高い局所的なグループの応答曲面まで近似できる。
3. 応答曲面の近似精度を向上させる場合、アップデートに必要なサンプル点の設計変数パターンをクラスターから容易に推測することが可能となる。

従来からの方法のように、多峰性問題の把握と近似精度の向上のために、やみ雲にデータ数を増やすということをする必要がなく、上記の利点を活かすことで、複雑な多峰性問題をいくつかの領域に論理的に分割し、全体の容易な把握と近似精度の向上を効率的に行うことができる。また、本手法から得られる設計変数パターンによる設計境界および現象境界の情報は、上流設計・詳細設計段階で非常に有効な情報となる。

また、階層的応答曲面近似式を工作機械の熱変形制御に適用しその高精度な回帰性能を確認できた。加えて、ここで取り上げた方法は、その回帰精度の高さのほかに、実測データと階層化されたクラスターとのパターン認識の処理の軽さも加え、応答曲面近似式を用いた機器のリアルタイム制御の可能性を示している。

本論文では、多峰性問題がもつ複雑な現象の近似を高精度に行うために階層的応答曲面法を提案し、適用例として「工作機械の熱変形問題」を取り上げた。今後、他の多峰性問題に本手法を適用し、その有効性を確認する必要があると考える。

## 文 献

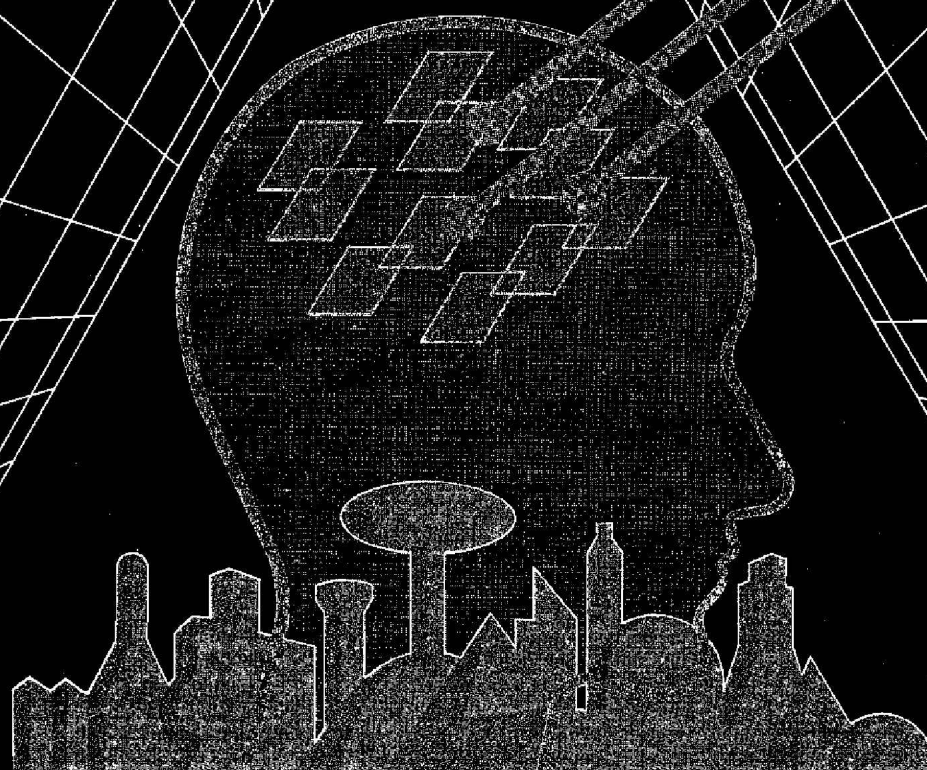
- (1) Myers, R. H., Montgimery, D. C., Response Surface Methodology Process and Product Optimization Using Designed Experiments, Wiley Series in Probability and Statistics, John Wiley & Sons, Inc, (1995).
- (2) Montgomery, D. C., Design and Analysis of Experiments 4<sup>th</sup> edition, John Wiley & Sons, Inc, (1996).
- (3) Kodiyalam, S., Lin, J. S. and Wujek, B. A., Design of Experiments Based Response Surface Models for Design Optimization, The 39<sup>th</sup> AIAA /ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, (1998).
- (4) 田口玄一, 実験計画法 第3版上下, (1976), 丸善.
- (5) 朝木善次郎, 実験計画法, (1980), 共立出版.
- (6) 田口玄一, 開発・設計段階の品質工学, (1991), 日本規格協会.
- (7) 田口玄一, 統計解析, (1972), 丸善.
- (8) 柏村孝義・白鳥正樹・于強, 実験計画法による非線形問題の最適化, (1998), 朝倉書店.
- (9) 柏村孝義・白鳥正樹・于強・国府田勲, 実験計画法, 数理計画法を用いた構造最適化, 機論, 62-601, A(1996), 2180-2185.
- (10) 長谷川浩志・酒井新吉・渡辺隆之, iSIGHT による曲面近似手法ベースの最適化設計における実験計画法利用について, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference '99 講演会論文集, (1999), 195-198.
- (11) 長谷川浩志・都築新・酒井新吉・渡辺隆之, 実験計画法と近似手法を利用した最適化設計支援環境の構築について, 第4回日本計算工学会講演論文集, (1999), 429-432.
- (12) 廣畑賢治・川上崇・向井稔・川村法靖・于強・白鳥正樹, 応答曲面法およびベイズ理論に基づく構造信頼性設計手法の提案, 機論, 67-660, A(2001), 1297-1304.
- (13) 西田英郎, クラスタ分析とその応用, (1988), 内田老鶴圃.
- (14) 岡本彬訓・今泉忠, 3 元データの分析・多次元尺度構成法とクラスター分析法, (1990), 共立出版.
- (15) 宮本定明, クラスタ分析入門・ファジィクラスタリングの理論と応用, (1999), 森北出版.
- (16) 萩原一郎・施勤忠・小机わかえ, 目的関数のニューラルネットワーク推定による衝撃最適設計法の開発 (第1報, 簡易非線形モデルでの基礎検討), 機論, 63-616, A(1997), 2510-2517.
- (17) 川面恵司・横山正明・長谷川浩志, 最適化理論の基礎と応用, (2000), コロナ社.
- (18) 長谷川浩志・酒井新吉・渡辺隆之, 実数型交差モデルと応答曲面モデルを用いた逐次的近似最適化に関する一試行, 日本計算工学会 Transactions of JSCES 講演会論文集, (2000).
- (19) Bezdek, J. C., Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms, Plenum Press, (1981).
- (20) Bezdek, J. C. and Coray, C., Gunderson, R., Detection and Characterization of Cluster Substructure 1. Linear Structure Fuzzy c-Lines, SIAM j. Appl. Math, (1981).



- (21) 奥野忠一・芳賀敏郎, 多変量解析法, (1981), 日  
科技連出版社
- (22) Manly, B. F. J., 多変量解析の基礎, (1992), 培風  
館.
- (23) Koenigsberger, F., 工作機械の設計原理, (1967),  
養賢堂.
- (24) 中山一雄・上原邦雄, 機械加工, (1997), 朝倉書店.
- (25) 日本機械学会編, 超精密加工技術 超精密シリー  
ズ, (1998), コロナ社.
- (26) 大津展之, 関田巖, 栗田多喜夫, パターン認識  
理論と応用 行動計量学シリーズ, (1996), 朝倉  
書店.
- (27) 上坂吉則・尾関和彦, パターン認識と学習のアル  
ゴリズム, (1990), 文一総合出版.
-

# 日本機械学会論文集

TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS



A