

## NC 工作機械のサーボチューニングと曲線の高速高精度加工

東京農工大学 ○岡田 滉平, 大槻 俊明, ◎笹原 弘之

## 要旨

本論文では、加工速度と誤差の観点から高速高精度性を評価し、実験計画法を用いて統計的に多数のパラメータを調整することを目的とする。実験計画法の直交表に従いパラメータを変化させ、工作機械に直交2直進軸による輪郭運動を指令し、各パラメータ組み合わせの高速高精度性を評価した。そこからパラメータの効果と最適な水準を分析し、得られた最適水準の確認実験を行い、実験計画法によるパラメータ調整の有効性を示した。

## 1. 緒言

NC(数値制御)工作機械は、工作物を所望の精度内でできるだけ速く加工する高速高精度性が要求される。高速高精度性はNC工作機械に設定されている速度制御パラメータおよびサーボパラメータに大きく依存する。これらのパラメータは多数存在し、トレードオフの関係にある速度と精度を所望の水準になるよう調整することは難しい。現在パラメータの調整はメーカーの熟練技術者によって行われている。しかし、人の手による調整には限界があり、経験に基づく調整は再現性が低い。

本研究では、加工速度と誤差の観点から高速高精度性を評価し、実験計画法を用いて統計的に多数のパラメータを調整する方法を提案する。

## 2. 実験の概要

実験計画法の直交表に従ってパラメータを変更し、工作機械に2次元経路を指令する。交差格子エンコーダを用いて、加工速度と誤差を測定し、高速高精度性を評価する。

指令する経路は半径25mmの円に内接する正多角形とした。256角形、128角形、64角形、32角形、16角形、8角形、4角形、8角星形の8つである。線分長が小さく、方向変化角の小さい256角形や128角形は金型加工に、線分長が大きく、方向変化角の大きい4角形や8角星形は部品加工に対応する。指令速度はF10000とした。

実速度 $V_m$ は指令経路長 $L_c$ と測定時間 $T_m$ から $V_m = L_c/T_m$ として計算した。誤差は最大誤差 $E_{max}$ として評価した。誤差の評価には内向法<sup>[1]</sup>を用いた。高速高精度性は速度に比例し、誤差に反比例する。したがって高速高精度性評価関数 $F$ は以下のものとする。

$$F = V_m^n / E_{max} \quad (1)$$

$n$ は正の実数であり、各テストケースにおいて、直交表で様々なパラメータを変更した際の実速度と最大誤差の幅(最大値/最小値)が揃う $n$ を設定する。

各テストケースを同等に扱うため、テストケース毎にデータの標準化を行う。標準化とはデータを一次式で変換し、データの平均と標準偏差を揃える作業である。変換前のデータを $X$ 、その平均値、標準偏差をそれぞれ $\bar{x}$ ,  $\sigma$ 、変換後のデータを $Y$ とすると、標準化は次式(2)で行われる。

$$Y = \mu + s \times \frac{X - \bar{x}}{\sigma} \quad (2)$$

$\mu$ ,  $s$ はそれぞれ変換後のデータの平均値と標準偏差である。 $\mu = 50$ ,  $s = 10$ とし、偏差値として計算した。

## 3. L27 直交配列表実験

表1に調整対象としたパラメータとその水準を示す。

Table 1 Parameters and their levels in the L27 orthogonal sequence listing experiment

Parameter name	Current value	level 1	level 2	level 3
Maximum acceleration / deceleration before interpolation [mm/sec <sup>2</sup> ]	2083	1666.4	2083	2499.6
Allowable acceleration of AI contour control [mm/sec <sup>2</sup> ]	0	0	1000	2000
Time constant of acceleration / deceleration after interpolation [msec]	24	16	24	32
Acceleration change time of bell-shaped acceleration / deceleration before interpolation	48	40	48	56
Allowable speed difference in corners [mm/min]	300	240	300	360
Position loop gain [0.01sec <sup>-1</sup> ]	9000	8550	9000	9450
Position feedforward coefficient [0.01%]	9900	9405	9900	10000
Load inertia ratio	384	365	384	403
Speed loop gain magnification [%]	320	304	320	336
Velocity feedforward coefficient [%]	100,150	95,142	100,150	105,158
Current loop gain magnification [%]	150	135	143	150
Acceleration feedback gain	0	0	-5	-10

速度制御パラメータの水準は、大槻ら<sup>[2]</sup>による研究を基に設定した。サーボパラメータの水準は、原則として現行値 $\pm 5\%$ で設定した。

図1に高速高精度性に対するパラメータの主効果図を示す。8個のテストケースの応答値の平均を最大化する分析を行っている。各因子の応答値の高い水準が本実験条件における最適水準である。

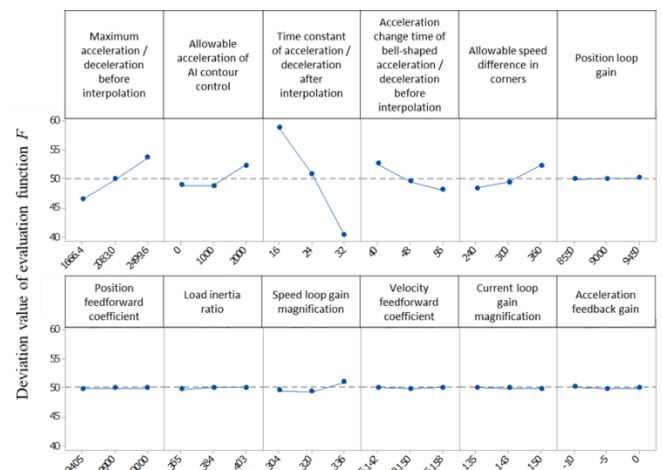


Fig. 1 Main effect plot of parameters for high speed and high precision

現行値と最適水準で同様の実験を行い、高速高精度性を確認した。表2に現行値と最適水準の応答値を示す。応答値はL27直交表の27条件を合わせて標準化したものである。すべてのテストケースで最適水準は現行値よりも優れた応答を示し、平均応答は全体を通して最大となった。

Table 2 High-speed and high-precision response value

Test conditions	Current value	Optimal level	Test conditions	Current value	Optimal level
Polygon with 256 corners	51.634	75.415	Octagon	47.619	78.059
Polygon with 128 corners	48.145	70.911	Square	48.996	63.072
Polygon with 64 corners	52.801	66.550	Star shape with 8 corners	46.431	87.686
Polygon with 32 corners	48.668	75.513	Average response	49.757	72.885
Hexadecagon	47.538	76.034			

#### 4. 応答曲面計画実験

L27 直交配列表実験ではあらかじめ設定した 3 水準の中から最適水準を導出した。これに対して、応答曲面法は水準間の応答を予測する高度な実験計画法である。そのため、実験の試行回数が直交配列表実験と比べて多くなる。そこで本実験は L27 直交表実験に適用した 12 個から調整の余地がある 4 個のパラメータを選んで行った。表 3 に対象としたパラメータとその水準を示す。

Table 3 Parameters and their levels in response surface methodology

Parameter name	Current value	level -2	level -1	level 0	level 1	level 2
Allowable speed difference in corners [mm/min]	300	240	270	300	330	360
Allowable acceleration of AI contour control [mm/sec <sup>2</sup> ]	0	0	500	1000	1500	2000
Speed loop gain magnification [%]	320	304	312	320	328	336
Load inertia ratio	384	364	374	384	394	404

実験の結果、応答曲面法に適用した 4 パラメータについて、現行値、L27 直交配列表による最適水準および応答曲面法による最適水準を表 4 に示す。

Table 4 Current value and optimal level

	Current value	Optimal level in L27	Optimal level in response surface methodology
Allowable speed difference in corners [mm/min]	300	360	248.4848
Allowable acceleration of AI contour control [mm/sec <sup>2</sup> ]	0	2000	2000
Speed loop gain magnification [%]	320	336	305.2929
Load inertia ratio	384	384	395.1111

表 4 の最適水準を用いて、L27 直交表実験の時と同様に確認実験を行った。結果として、L27 直交表実験の最適水準のほうが優れた応答を示した。本実験における最適水準は L27 直交表実験の最適水準とする。

応答曲面法で最適化が行えなかった理由として、適用した 4 パラメータ以外のパラメータに大きな交互作用があった、水準の幅が狭く、最適な水準を探索できなかったことなどが考えられる。

#### 5. 任意テストケースによる確認実験

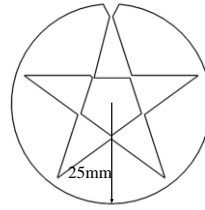


Fig. 2 Test case

現行値と最適水準を比較するために、図 2 のような円弧補間と直線補間を組み合わせたテストケースを用意した。円弧半径は 25 mm である。このテストケースは、多角形テストケースと異なり、円弧補間や線分長と方向変化角の異なる直線補間が含まれている。これにより最適水準パラメータが様々な形状に対応しうるかを検証できる。

表 5 に実速度  $V_m$ 、最大誤差  $E_{max}$ 、高速高精度評価関数  $F (n=1)$  を示す。最適水準のほうが速度、精度共に高く、優れた高速高精度性を示していることが分かる。

Table 5 Speed and error in the test case

	Real speed $V_m$ [mm/min]	Maximum error $E_{max}$ [mm]	High speed and high accuracy $F$ [min <sup>-1</sup> ]
Current value	5017.3297	0.01661719	301936
Optimal level	5341.1058	0.01221500	437258

図 3 は現行値と最適水準の誤差拡大図である。円弧補間において、現行値では誤差が内側に生じているのに対し、最適水準では誤差が外側に生じている。円弧補間の精度は最適水準のほうが優れている。直線補間部分では、現行値では瞬間的に大きな内回り誤差が発生している。これに対し最適水準では、内回り誤差は低減されているものの振動が発生している。

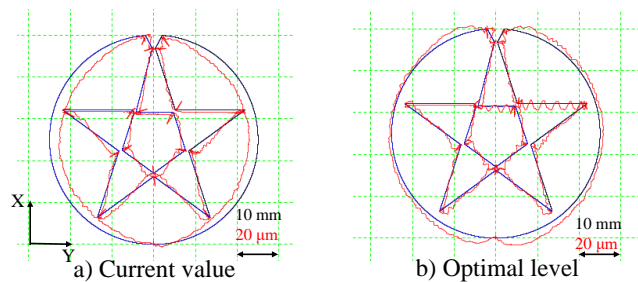


Fig. 3 Enlarged error of the test case

#### 6. 結論

本研究において、次の知見が得られた。

1. 速度と精度の観点から評価関数を設定し、高速高精度性を評価できる。
2. 実験計画法により、各パラメータの高速高精度性に対する影響を評価できる。
3. 評価関数の標準化により、様々なテストケースを平等に評価できる。
4. 直交配列表実験により、評価関数応答を最大化できる。
5. 速度と精度の観点のみから高速高精度性を高めようとする と振動が発生してしまう。

#### 文献

- 1) T. Otsuki, H. Sasahara, R. Sato, A method for the evaluation and magnified representation of two-dimensional contouring error, Precision Engineering, 50 (2017) pp. 433-439.
- 2) 大槻俊明, 笹原弘之, 実験計画法と速度・誤差 2 次元表示による CNC パラメータ調整方法, 2019 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp601-602, 2019