

精密テーブルの運動性能に及ぼすサーボモータのセンサ特性(第1報) - 加工表面への影響 - *

川下智幸** 川井康寛*** 松尾修二**** 前田貴信** 原 孝*****

The Sensor Character of the Servo Motor Exerting on the Movement Performance of the Precise Table (1st Report) - The Effect on Surface Roughness -

Tomoyuki KAWASHITA, Yasuhiro KAWAI, Shuji MATSUO, Takanobu MAEDA, Takashi HARA

1. はじめに

NC工作機械の精密なモーションコントロールは、サーボモータを用いたサーボ制御によって実現されている¹⁾。図1に、ボールネジ機構を用いたセミクローズドループ制御方式の模式図を示す。図のように、この制御方式では、サーボモータの回転軸を精密に制御することでテーブルの位置・速度制御を行っており汎用性の高い制御方式である。

図2に、モータ回転軸とボールネジ機構の連結方式を示す。図のように、モータ回転軸とボールネジ回転軸はカップリングにより連結される。この連結の際に生じる回転軸中心のズレは、以前から問題になっており機械組み立て時に十分配慮されている。一方、サーボモータ回転軸の位置・速度検出センサとして用いられるエンコーダの回転ディスクスリット円の中心とモータ回転軸中心とのズレ（このズレを本研究では偏心と定義する）は、軸受けの精度、隙間や組み立て誤差などの問題から、技術的に解消するのが困難である。

図3に、エンコーダの波形形成の原理図を示す。ガラス材の回転ディスクにクロム蒸着されたスリットにより、透過する光量を変化させ、その光量をフォトダイオードにより電気信号に変換することで疑似正弦波を得る。そして得られた信号を用い波形

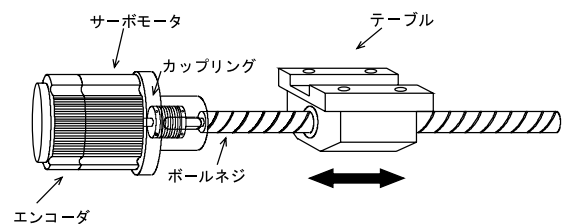


図1 セミクローズドループ制御方式

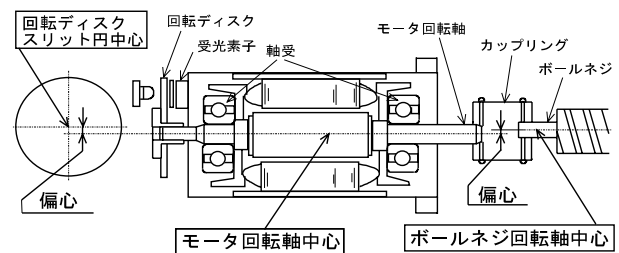


図2 サーボモータの構造とボールネジ機構との連結方式

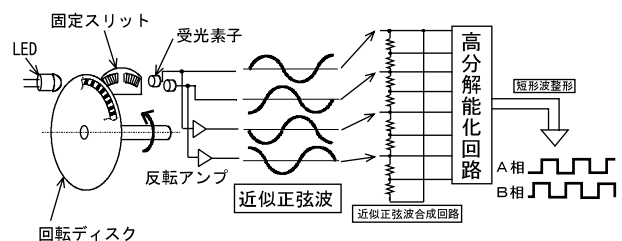


図3 エンコーダの波形形成の原理図

* 原稿受付 平成20年9月26日

** 佐世保工業高等専門学校 電子制御工学科

*** 佐世保工業高等専門学校 専攻科（現、日本精工（株））

**** 佐世保工業高等専門学校 学生課専門技術班

***** 佐世保工業高等専門学校 専攻科（現、九州工業大学大学院）

成形回路を経て2相（A，B相）の矩形波を出力する²⁾。偏心の影響は、検出される疑似正弦波の振幅・周期変動としてあらわれることから、図4に示すようにエンコーダから出力される2相（A・B相）のパルス波形のデューティ精度低下を招くことになる。速度検出は、この信号を用いてデジタル速度演算を行うので、その速度情報は誤差³⁾を含むことになる。そして、得られた速度情報は、図5に示すような速度制御のブロック図の中の、速度情報としてフィードバックされるため、モータの回転速度制御に悪影響を及ぼし、さらに、モータの回転精度は、テーブルの運動特性に影響を与えることから、最終的には工作物仕上げ面粗さに影響を及ぼすことが予想される。特に、超精密加工を行う際、テーブルは低速で送られることが多く、低回転域ではエンコーダから得られるパルス情報が少なく、わずかなパルスデューティの変動でも速度演算特性に与える影響は大きいことから、この問題は無視できない。

このようなことから、本研究では、ボールネジ機構を有するNC工作機において、サーボモータ回転軸の位置・速度検出に用いられるエンコーダの回転ディスク偏心量が、工作物の加工表面へどのような影響を及ぼすのか検討したので以下に報告する。

2. 加工実験および加工表面の解析

図6および表1に、加工実験システムおよび実験条件を示す。実験システムはテーブル機構とNC工作機から構成されている。テーブル機構をNC工作機のテーブルに固定させX軸として使用し、Y軸、Z軸および主軸はNC工作機により制御した。X軸送り用のサーボモータのエンコーダの偏心量を変化させて加工を行うことで、その影響はX軸の送り方向の加工表面にあらわれると予測した。また、エンドミルの刃が接触する周期で加工表面に特徴的な現象があらわれるかどうかを確認するために、モータ回転数およびエンドミルの刃数も変化させた。なお、工作物には被削性が良いA5052を用いた。これは被削性の良い加工物であればテーブルの運動特性を加工面へ転写しやすいと考えた。加工後、接触式粗さ計および三次元測定器（WYKO）を使用して加工表面の凹凸形状の計測・解析を行った。

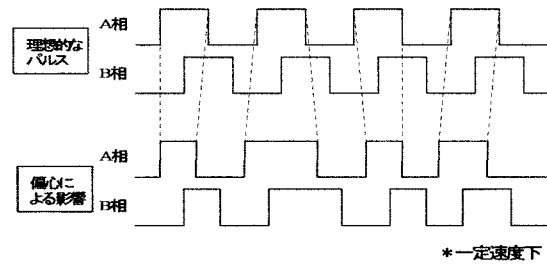


図4 パルスデューティ精度へ及ぼす偏心の影響

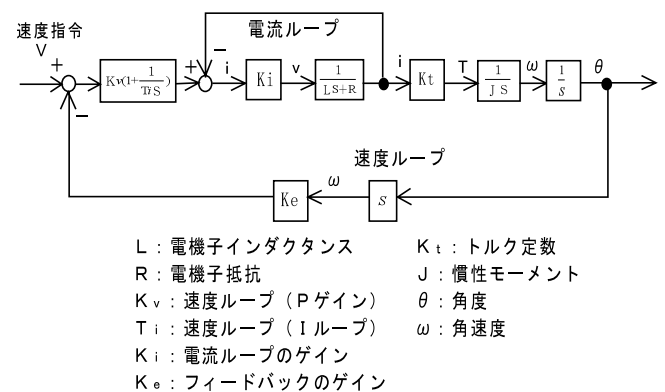


図5 速度制御ブロック図

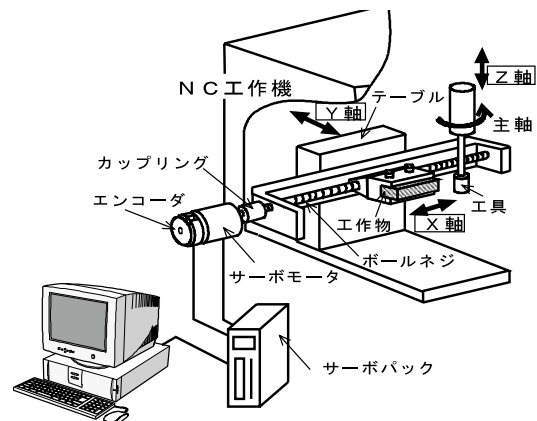


図6 加工実験装置

表1 実験装置仕様および実験条件

NC工作機械	FANUC（株）製 ROBODRILL α -T14iA
サーボモータ	（株）安川電機製 SGMG-03A2B
ボールネジ	日本精工（株）製 MCM10 リード10mm
エンコーダ	インクリメンタル型 8192 pulses/rev (A, B 相)
工作物	A5052
工具	エンドミル（2枚刃, 4枚刃）
回転ディスク偏心量	2.5 μ m, 5 μ m, 10 μ m, 15 μ m
モータ回転数	0.25rps, 0.5rps
主軸回転数	3000rpm
速度ループゲイン Kv	100
切り込み量（Y軸方向）	100 μ m

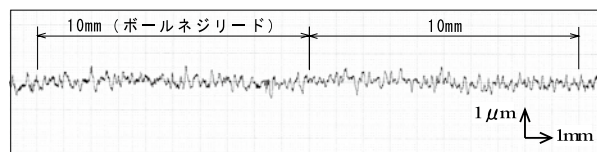


図7 工作物加工表面の粗さ計測定結果

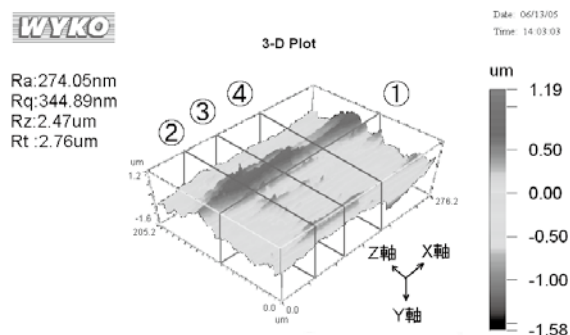


図8 工作物加工表面の3次元計測結果

3. 実験結果および考察

ボールネジ軸とサーボモータ軸の連結部における回転中心のズレの影響を検討するために、工作物のX軸方向（テーブル送り）の加工表面を接触式粗さ計で測定した結果を図7に示す。テーブル送り速度は、2.5mm/s（モータ回転数：0.25rps）である。影響は、ボールネジ1回転を周期としてあらわれると考えられるため、ボールネジリード10mmごとに区切ってデータをみたところ、周期的な形状変化はみられないことから、ボールネジ軸とモータ軸の中心のズレによる影響は無いと判断できる。

これは、実験装置を組み立てる際に、中心のズレを、最小限に抑えることに注意を払い行った効果によるものと考えられる。よって、エンコーダの回転ディスク偏心量による影響のみを対象に検討を進めても問題ないと判断できる。

図8に工作物の加工表面の凹凸形状を三次元測定したデータ例を示す。測定レンジは276.2 μ m×205.2 μ m（X軸方向×Z軸方向）で、Y

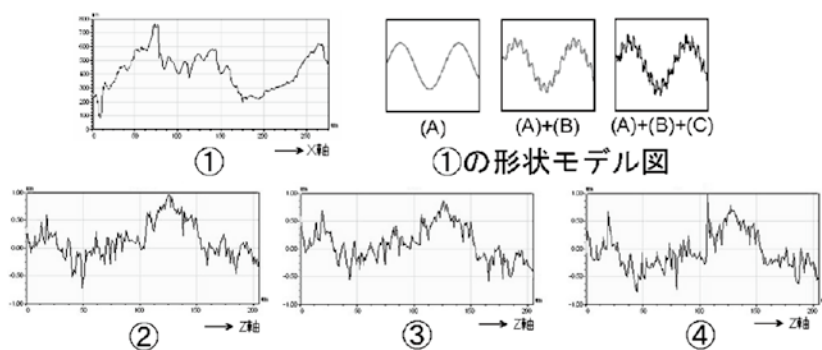


図9 工作物加工表面の解析

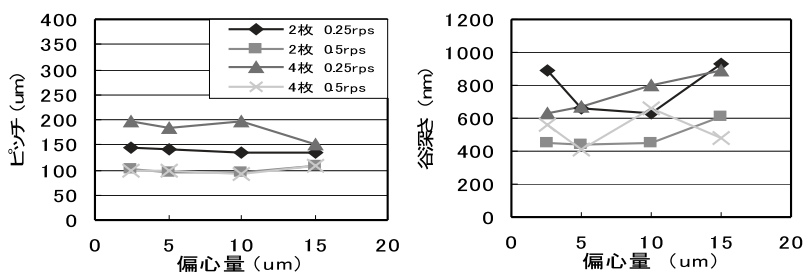


図10 偏心量と工作物加工表面のピッチおよび谷深さの関係

軸（切り込み）方向に関しては、高低差を赤から青の色の变化で表している。（表示範囲, $2.77\mu\text{m}$ ）さらに、図 9 に示したような X 軸および Z 軸方向断面に分けて解析を行った。Z 軸方向に関しては図中の②、③および④から判断して、どの断面を見ても形状が類似していることがわかる。実験では、Y 軸に $100\mu\text{m}$ の切り込み量を設定し、X 軸方向のみの送りを行い加工を行っていることから、これらの断面は、刃物の回転形状を転写していると判断できる。

一方、図中の①のような X 軸方向断面に関しては、凹凸形状が様々なピッチの条痕で形成されていると考えられたため、以下の 3 パターンの条痕に分別し、解析を行った。

- (A) 比較的大きなピッチを持つ条痕
- (B) エンドミルの回転周期に伴うピッチの条痕
- (C) (A) や (B) よりもさらに短いピッチを持つ条痕

図 10 に、偏心量と (A) の条痕の谷深さおよびピッチの関係を示す。図から谷深さが大きいもので $1\mu\text{m}$ 近くあり、加工表面の最大粗さを最も支配しているといえる。さらにそのピッチは $150\sim 180\mu\text{m}$ (形成ピッチから周波数に換算すると $12\sim 45\text{Hz}$) で、このピッチの変化はエンドミルの刃の枚数やサーボモータの速度指令（トルク指令）の周期との関係はない。ボールネジ機構の機械系の固有振動数を測定したところ、 40Hz 近傍にあることを確認しておりそれらの影響によるものと推測している。

図 11 に、偏心量と (B) の条痕の解析結果を示す。実験では、エンドミルの刃数やテーブル送り速度を変化させて加工面にエンドミルの刃の接触周期によって条痕が形成されているかを確認するとともに、その接触周期で形成される谷の深さを計測した。なお、ここで計測した谷のピッチは、エンドミルの刃から次の刃が接触するまでに工作物が送られる距離の $\pm 20\%$ のピッチをもつ条痕の谷深さを測定した。この図から偏心量が大きくなると谷深さが深くなる傾向がみられ、この条痕に偏心量の影響があらわれていることがわかった。

(C) の条痕に関しては、 50nm 以下の凹凸で形成されており丹念にその谷深さを測定解析したが、その値は条痕 (A) (B) に比べると 50nm 以下と小さく、周期性も見られなかった。従って、その凹凸の大きさから判断しても、加工表面の粗さに大きく影響を及ぼし

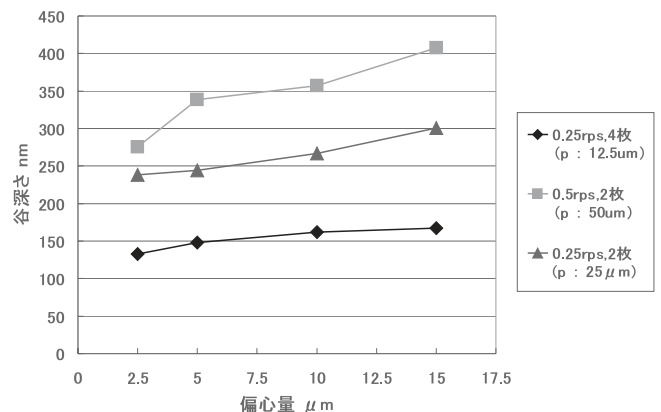


図 11 偏心量と工作物加工表面の谷深さの関係

ているとは考えにくく、また、偏心量との関連も見いだすのは困難であった。

4. まとめ

サーボモータに搭載されているエンコーダの回転ディスクの偏心量が工作物の加工表面に及ぼす影響について検討を行った。解析に際しては、加工表面の条痕をそのピッチの大きさから三つに分類し解析を行った。また、ボールネジ軸とサーボモータ軸の偏心が加工表面に及ぼす影響についても調べ、以下のような結論を得た。

- (1) 本実験装置では、ボールネジ軸とサーボモータ回転軸の中心のズレを最小限に抑えるように組み立てたことで、それにより発生する加工面への影響については考慮する必要はない。
- (2) (A) 比較的大きなピッチ ($150\sim 180\mu\text{m}$) を持つ条痕は、周波数に換算すると $12\sim 45\text{Hz}$ で、ボールネジ機構の機械系の固有振動数の影響によるものと推測される。また、その条痕の凹凸は他の条痕より大きく、加工表面の最大粗さを左右する要因になっている。
- (3) (B) エンドミルの刃の回転周期に伴うピッチの条痕は、偏心量が大きくなると谷深さが深くなるという傾向がみられ、偏心量の影響はエンドミルの刃の接触周期に伴う条痕の凹凸の大きさにあらわれることがわかった。

- (4) (C)は(A)や(B)よりもさらに短いピッチを持つ条痕で、谷深さも小さく加工表面の粗さに大きな影響を及ぼすとは考えられない。

最後に、本研究を行うにあたり実験にご協力頂いた松瀬孝弘君(平成15年度専攻科特別研究テーマ)、岩男翔君、西勇一君(平成15年度卒業研究テーマ)に謝意を表します。また、平成15年度(財)メカトロニクス高度化財団の研究助成金を活用したことを記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) (株)安川電機編：メカトロニクスのためのサーボ技術入門，日刊工業新聞社，1986.
- 2) 土谷武士，深谷健一：メカトロニクス入門，森北出版（株），1994.
- 3) 川下智幸，中島聡，久留須誠，前田貴信：サーボ制御用エンコーダのデジタル速度演算に関する研究，佐世保工業高等専門学校，研究報告第36号，P43－P48.