

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2報) - Matlab/Simulink によるシミュレーション解析 -*

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

The Sensor Character of the Servo Motor Exerting on the Movement Performance of the Precise Table (2nd Report) - An Analysis by Matlab/Simulink -

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

1. はじめに

第1報において、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偏心量が工作物の加工表面に及ぼす影響について報告した。その結果、加工表面に存在する加工条痕の中で、エンドミルの切れ刃の回転周期に伴い形成される加工条痕の谷の深さと偏心量との間には相関がみられ、偏心量が大きくなると仕上げ面凹凸は大きくなることわかった¹⁾。このようなことから、さらに偏心量の影響を詳しく解析するには、レーザ測定器を用い実際にテーブルの運動特性を計測する必要があると考えられる。しかし、その計測を実施するにあたり、各種制御ゲインを幅広いレンジで設定する必要があり、偏心量の設定調整も煩雑なことから非効率な計測実験になることが推察される。したがって、効果的に実験を行うためには、予め、それら設定条件と偏心量との関係を把握しておく必要がある。

このようなことから、本研究ではサーボモータの位置・速度制御に用いられるエンコーダの回転ディスク偏心量がボールねじ機構におけるテーブルの運動特性に及ぼす影響について、Matlab/Simulink によるシミュレーションを行い、各種ゲインの影響や制御特性の検討を行ったので以下に報告する。

* 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, 九州工業大学大学院)
 **** 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, 日本精工 (株))

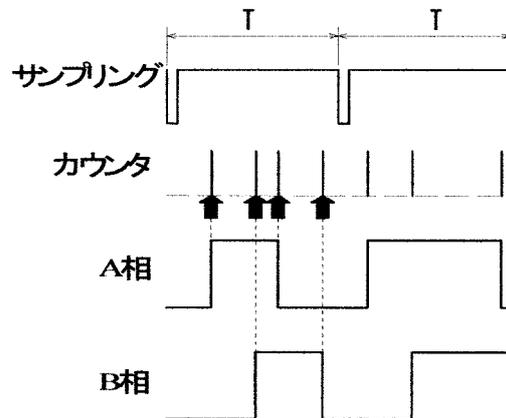


図1 デジタル速度演算の原理図

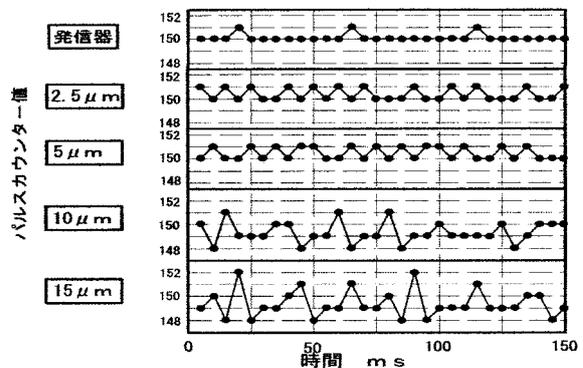


図2 偏心量とカウンタ値の関係

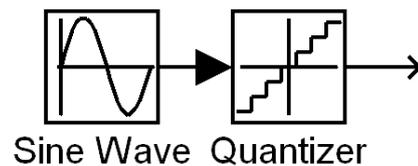


図3 外乱構成ブロック図

2. テーブル運動特性のシミュレーション解析

2.1 シミュレーションモデル

(1) 偏心量の外乱モデル

図 1 に、エンコーダから出力される 2 相 (A, B) のパルス波形と実際に速度演算時に用いられるカウンター機能を示した模式図を示す。デジタル速度演算では、A, B 相の立ち上がり、立ち下がり時にカウンターを動作させ位置情報を得る。そして予め設定しているサンプリング時間 T 間での、そのカウンターのデータ変化量を用いて速度演算を行う²⁾。

図 2 に、サンプリング時間 5 m s における偏心量とカウンターの变化量を示す。偏心量が大きくなるに従い、図のようにカウンタ変動の周期と变化量が大きくなる事がわかる。また、その変化形態は、正弦波に類似している。これらのことから、正弦波を量子化することで偏心による影響を外乱として再現できると考えた。シミュレーションは、Matlab/Simulink によって行うが、その機能の中で、偏心量を速度フィードバックのパルス情報に対する外乱としてモデル化する場合、図 3 に示すように正弦波を量子化し、外乱としてフィードバック情報に与えることにした。図 4 に、具体的な外乱の波形図を示す。解析には、正弦波の周期を外乱周期、正弦波の量子化数を外乱パルス数と定義した。このように偏心量を外乱モデル化することにより、エンコーダの分解能 (パルス数) に合わせて量子化した位置情報を与えることで、速度制御への影響を検討することができる考えた。

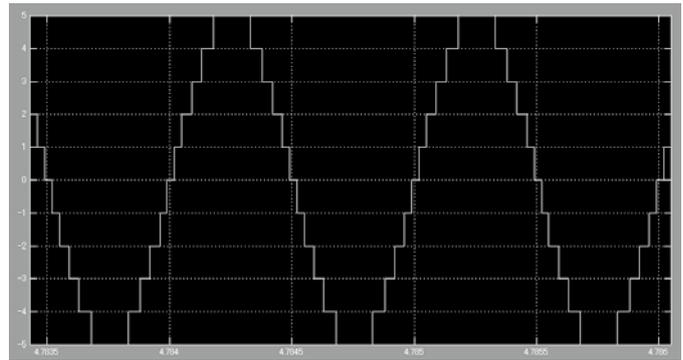


図 4 外乱の出力例 (外乱パルス数 ±5 の場合)

表 1 ブロック線図のパラメータ 表 2 パラメータへの入力値

Kp :	速度ループ比例ゲイン	Kp =	$2\pi * K_v$
Ti :	速度ループ積分ゲイン	Ti =	0.02
Ki :	電流ループゲイン	Ki =	1000
Kf :	フィードバックゲイン	Kf =	1
L :	インダクタンス	L =	12.7[mH]
R :	抵抗	R =	2.47[Ω]
Kt :	トルク定数	Kt =	1.03[N*m/A]
J :	イナーシャ	J =	8.7675[kg*m ²]
Pulse1 :	位置-パルス変換	Pulse1 =	$32768 / (2\pi)$
Pulse2 :	パルス-位置変換	Pulse2 =	$2\pi / 32768$

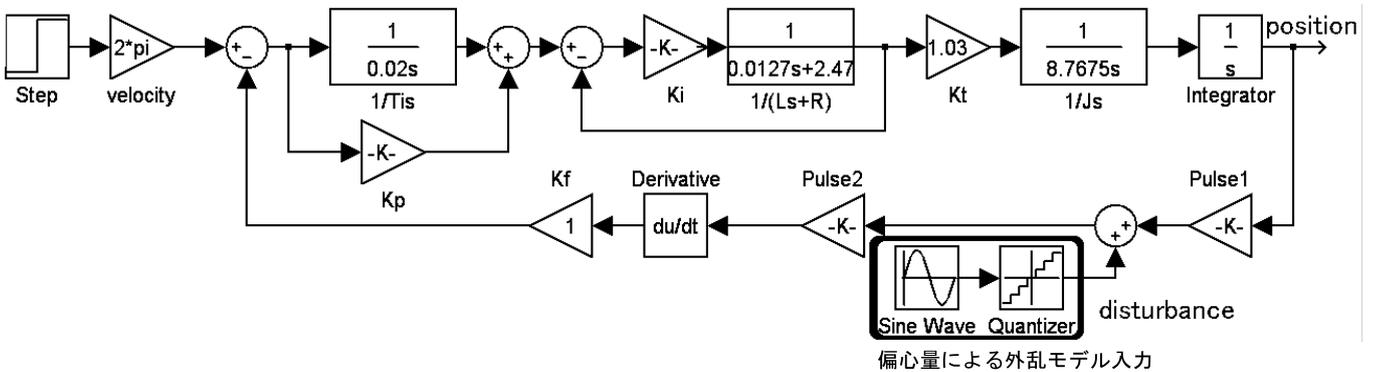


図 5 速度制御ブロック図

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2報)

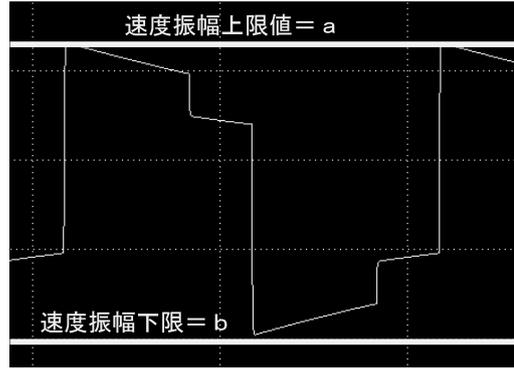


図6 速度解析結果例(速度振幅)

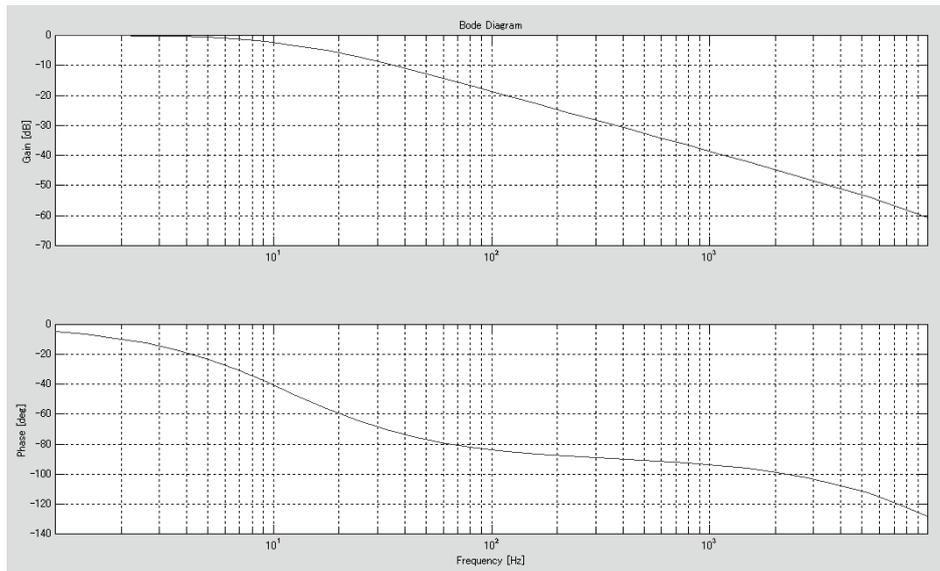


図7 速度制御のボード線図

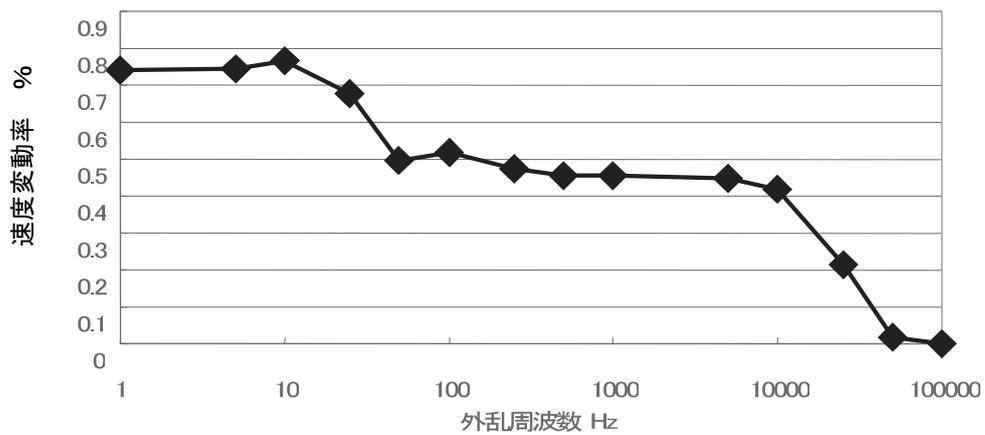


図8 外乱周期に対する周波数特性

(2) シミュレーションのブロック線図

実際の速度制御系のブロック線図は、第1報¹⁾で示したものをを用いて、Matlab/Simulinkでは図5に示すように構築した³⁾。また、ブロック線図のパラメータを表1に示す。このブロック線図は電流ループと速度ループより構成されており、制御方式はPI制御になっている。速度入力にはステップ入力を用いている。このステップ入力に対し 2π をかけてことで、ステップ入力の値を回転数[rps]と対応させている。エンコーダのパルスカウンタ値を再現するために、速度情報に積分演算を行い位置情報へ変換した後、位置情報に対してエンコーダの分解能(32768pulses/rot)に合わせて量子化を行っている。このパルスカウンタ値に対して先の外乱を入力することで、偏心による影響を与える。外乱の入力後は変換に用いた値の逆数をかけることで、位置情報に戻している。

したがって、ステップ入力を1とした場合、速度指令として 2π が入力される。速度情報から積分された位置情報は $2\pi \times \text{時間}$ となり、これに $32768/(2\pi)$ をかけてことでパルスカウンタの積算値となる。この値に外乱を与えるとパルスカウンタの値が増減し、速度が変動することになる。

2.2 検討項目と実験条件

シミュレーションでは外乱の影響として、外乱周期と量子化数が与える影響を検討した。また、速度ゲインがテーブルの運動特性に与える影響も合わせて検討した。

今回のシミュレーションにおいて、各パラメータに入力する数値を表2に示す。これらの入力数値は実験装置において計測した値を用いている。また、電流ループゲイン K_i は、実際の装置と同じように速度制御に影響を与えない範囲で設定している。

実験条件は、それぞれ以下のように設定した。

- (a) 外乱周期：0.1, 1, 10[ms]
(外乱パルス数 ± 1 , $K_v = 100$)
- (b) 外乱パルス数： ± 1 , ± 3 , ± 5 [pulse]
(外乱周期1[ms], $K_v = 100$)
- (c) 速度ループゲイン K_v ：
1, 10, 100, 250, 500, 750, 1000[1/s]

(外乱周期1[ms], 外乱パルス数 ± 1)

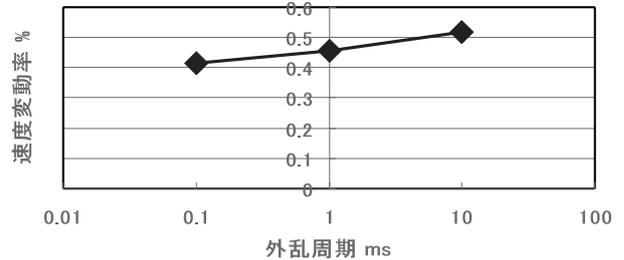


図9 外乱周期と速度変動率の関係

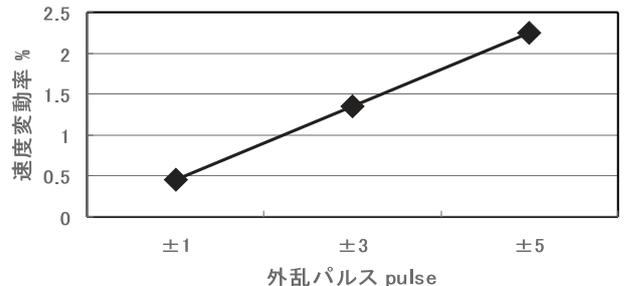


図10 外乱パルス数と速度変動率の関係

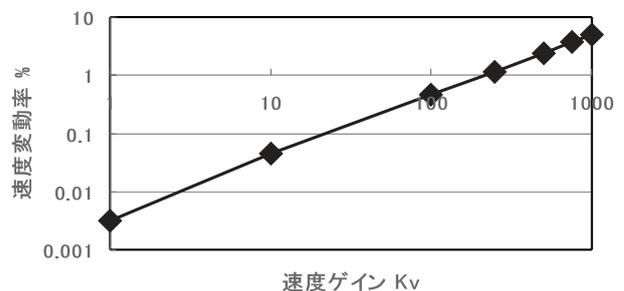


図11 速度ループゲインと速度変動率の関係

図6に、速度制御への影響を定量化するために速度変動率 [%] を定義している。定常状態における速度振幅の上限値 = a と下限値 = b を用いて以下のように処理する。

$$\begin{aligned} & \text{速度変動率 [\%]} \\ & = (a - b) \times 100 / (\text{定常状態における平均速度}) \\ & \text{注) } (a - b) \text{ は速度振幅の幅になる。} \end{aligned}$$

3. 実験結果と考察

図7に、速度制御系のボード線図を示す。ゲインが-3dB および位相が -45° 程度に低下するのは、10Hz~20Hz間にあることがわかる。この値は、一般的な、NC工作機より、若干低い値になっていると思われるが、今回、シミュレーションにおいて用いた各パラメータは、実際の値を用いていることから、この実験システム自体がこの特性を有するものと判断して検討を進めることにした。

図8は、外乱に対する周波数特性をあらわしたものである。図7に示した結果からも推測できたが、図のように周波数が高くなるほど、速度変動への影響が小さくなることがわかる。したがって、速度フィードバックに入る外乱の影響は、低周波領域を検討することが必要になると判断できる。

図9は、外乱周期を0.1, 1, 10[ms]として、速度変動率として示したものである。図8の結果と同様、外乱周期が大きくなるにつれて（低周波数域ほど）速度変動率も大きくなることがわかる。これは、外乱周期が短い場合は（高周波数域ほど）、図8の結果からも推測できるが、速度変動として制御特性が追従できなくなるためである。

図10に、外乱パルス数と速度変動率の解析結果を示す。なお、この場合の外乱周期は1msである。図のように、外乱パルス数が大きくなるにつれて速度変動率も大きくなることが解る。これは、外乱によるパルス変動が大きくなると、速度変動の振幅にも大きな影響を及ぼすことを意味しており、偏心量は、速度制御系の特性へ高感度で影響を及ぼすことになると言える。

図11に、速度ループゲインと速度変動率の解析結果を示す。図のように、速度ループゲインが大き

くなるにつれて速度変動率も大きくなることがわかる。これは速度ループゲインが大きくなることで外乱への追従性が向上することになり結果的に速度変動を大きくすることになるものと考えられる。したがって、速度ループゲインを大きくすると偏心による影響も大きくなることが予想される。

4. まとめ

1) 外乱周期と速度変動率の関係

外乱周期の影響は、速度制御の周波数特性からも判断できるように、外乱周期が短い場合（高周波数）は、速度変動への影響は少ない。したがって、偏心量により速度検出の変動は低周波数帯の影響のみを考慮すればよい。

2) 外乱の量子化数と速度変動率の関係

外乱の量子化数が多くなると速度変動率は大きくなった。したがって、偏心量によるカウンタの変動値は、テーブルの運動特性へ大きな影響をおよぼすことになる。

3) 速度ループゲインと速度変動率の関係

速度ループゲインが大きくなるにつれて速度変動率は大きくなった。これは、速度ゲインが大きくなることによって敏感に外乱に追従するためと考えられる。したがって、速度ループゲインを高くすると偏心量の影響を受けやすいことになる。

以上シミュレーションの結果より、外乱（偏心量）は、テーブルの運動特性へ影響を与えることが確認できた。今後、この結果を考慮して、効率的な計測条件にてレーザ測定システムを用いたテーブルの運動特性の解析を行いたいと考えている。また、レーザによる計測結果を、今回構築したシミュレーションモデルに反映させることでシミュレーションによる解析精度を高め、実測なしで、偏心量がテーブルの運動性能に及ぼす影響について解析できるように研究を進めて行きたいと考えている。

最後に、本研究を行うにあたり実験にご協力頂いた久田孝仁君（平成18年度卒業研究テーマ）に謝意を表します。

参考文献

- 1) 川下智幸, 川井康寛, 松尾修二, 原孝, 前田貴信: 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 -, 佐世保工業高等専門学校, 研究報告第 45 号, 掲載決定.
- 2) 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.
- 3) 本田昭, 長崎仁典: 図解とシミュレーションで学ぶサーボ制御技術入門, 日刊工業新聞社, 2004.