メカトロソフトウェアサーボ系の制御性能に基づく エンコーダ分解能決定法*

後 藤 聡** 中 村 政 俊** 久 良 修 郭***

Method for Determining Encoder Resolution in Mechatronic Software Servo Systems Based on Control Requirement

Satoru GOTO, Masatoshi NAKAMURA and Nobuhiro KYURA

In mechatronic software servo systems, the position of the servo motors is measured by using encoders which are connected to the servo motors. For the industrial software servo systems, the velocity feedback signal is calculated by the difference operation of the accumulated pulse of the encoder. Ripples of the velocity output of the software servo systems occur because of the deterioration of the velocity feedback signal. In this paper, we analyzed the behavior of the system by using the software servo model, and obtained a relationship between the control performance and the resolution of the encoder in the software servo systems, which can be effectively used in designing the mechatronic software servo systems in industries.

Key words: software servo system, encoder resolution, control performance, ramp response, velocity ripple

1. 緒 言

NC工作機械や産業用ロボットなどのメカトロ機器の制御において、従来のアナログ回路によって制御系を構成するアナログサーボ系から、マイコンによるプログラムによって制御系を構成するソフトウェアサーボ系が用いられることが多くなってきている^{1)~4)}。ソフトウェアサーボ系は、サーボモータの回転速度検出器を必要としないためにコストを低く抑えることができ、上位システムとの情報のやりとりが容易になるといった利点を有する^{5)~7)}。ソフトウェアサーボ系では、モータの回転位置の情報はモータに取り付けられた位置検出器であるエンコーダにより読み取られ、位置の分解能はエンコーダのビット数(エンコーダ分解能)で決まる。また、アナログサーボ系では、速度検出器で連続的に速度信号を計測していたが、ソフトウェアサーボ系の場合には、速度検出器は取り付けずに、位置信号の差分演算によって計算されていることが多い。そのため、エンコーダ分解能が低いときには速度情報の分解能は更に低いものとなり、メカトロサーボ系の輪郭制御性能が劣化し、リプル状の速度変動が生じる。このリプル状の速度変動は、切削加工では加工物の面の粗さとなり、糊付けでは糊のむら、溶接加工では溶接むらとなって表れ、輪郭制御において大きな問題となる。リプルの発生原因は、機械系の非線形性やノイズや指令時間間隔の影響など諸々の原因が考えられるが、ここでは、エンコーダ分解能に着目する。このようなソフトウェアサーボ系のエンコーダから求める速度情報における問題点を解決するために、速度信号をオブザーバで推定する手法^{8)~12)}やロバストな設計を行う手法¹³⁾が提案されている。これらは、与えられたエンコーダからいかに正確に速度情報を推定するか、または、いかに不安定状態を回避するように制御を行うかについての研究である。

通常、産業界ではサーボ系の位置、速度に関する制御仕様は明確であるが、その内部に関する制御仕様はこれらを満たすように

設計しなければならないという文言的な表現が行われており、理論的な裏付けのある計算式は知られていない。実際、具体的な回路構成を踏まえ、エンコーダ分解能に関する検討事項を定式化し、制御系構成内部の種々のパラメータの関係を解析的な解として求めることは非常に困難な作業である。このようなことから、現在までほとんどの場合、制御系内部の分解能は経験に基づいて決められてきている。

本研究では、ソフトウェアサーボ系のエンコーダ分解能と制御性能の関係を明らかにするため、アナログサーボ系とソフトウェアサーボ系の違いに着目し、エンコーダ分解能による制御性能の影響を抽出したモデルを導出した。さらに、このモデルに基づく解析により、メカトロサーボ系の輪郭制御における基本的な制御性能評価量であるリプル状の速度変動に基づくエンコーダ分解能の決定法を導いた。この決定法を用いることにより、従来、作業を行う際にどの程度の正確さで位置決めを行う必要があるかという点で決定されていたエンコーダ分解能¹⁴⁾を、ソフトウェアサーボ系で要求される輪郭制御性能から適切に決定することができ、その産業応用的価値は高い。

2. ソフトウェアサーボ系のエンコーダ分解能

産業用メカトロサーボ系は、機構部と、機構部に含まれる軸を動作させるサーボモータと、サーボモータとサーボコントローラを含む各軸のサーボ系と、各軸のサーボ系への指令を生成する指令生成部と、機構部とサーボ系と指令生成部の全体を管理する管理部とに分けられる。各軸のサーボ系はモータ部、電力増幅部、電流制御部、速度制御部、位置制御部と各部の信号を検出するためのセンサ(位置検出器、速度検出器、電流検出器)で構成され、機構部とハード的につながっている。産業用メカトロサーボ系では、各軸のサーボ系は通常独立に制御され、各軸の干渉や摩擦などは各軸の外乱として取り扱われており、それらは各軸のサーボ系が適切に補償しているため、各軸を独立に取り扱うことができる¹⁵⁾。

産業界では速度制御部にPI制御器、位置制御部にP制御器が用いられていることが多く、位置の制御を考える場合には電流制御部と電力増幅部の特性は理想的に行われるものとして無視でき

* 原稿受付 平成10年10月15日

** 正 会 員 佐賀大学大学院工学系研究科(佐賀市本庄町1番地)

*** 正 会 員 近畿大学九州工学部(飯塚市柏の森11-6)

る。また、速度制御部のI動作は、トルク負荷に対する速度のオフセットを補償するために用いられており、トルク負荷とI動作を相殺させ、P制御器で表現できる¹⁶⁾。

ソフトウェアサーボ系では位置制御部と速度制御部とがソフトウェアで構成されている。また、電流制御部までもソフトウェアで構成されているものもある。本論文では、位置に関する制御を問題とするため、電流制御部と電力増幅部の特性は理想的に行われるものとして無視し、位置制御部と速度制御部について考える。このようなソフトウェアサーボ系の構成を図1に示す。

ソフトウェアサーボ系の位置決め精度は、サーボモータに取り付けられているエンコーダの分解能、すなわち、モータの1回転をどれだけ細かく分割してモータの位置を検出するかによって決定される。サーボモータの位置出力は、エンコーダのパルス出力がカウンタで累積され、サンプリング時間間隔ごとにデータとしてサーボコントローラに取り込まれた値で検出される。

アナログサーボ系では、速度検出器で連続的に速度信号を計測することが可能であったが、ソフトウェアサーボ系の場合には、速度検出器はコストを削減するため取り付けずに、位置信号から速度を計算している。産業界で通常用いられている速度計算は、位置の単純な差分によって速度を求める方法であるため、本解析においてはこの差分演算による速度計算を行うものとする。ソフトウェアサーボ系ではパルスの差分演算から決定される分解能でしか速度を計算できないため、アナログサーボ系と比較して速度フィードバックの精度が劣化する。この差分演算による速度フィードバック信号の分解能の低下により制御性能が劣化し、結果としてサーボ系の出力にリプル状の速度変動が生じる。このソフトウェアサーボ系における速度変動がアナログサーボ系の速度検出器における速度リプルと異っている点を述べる。速度検出器における速度リプルは、回転速度の検出ノイズとして生じるため、この検出ノイズを適切に除去することにより、速度リプルを防ぐことができる。しかし、ソフトウェアサーボ系のリプル状の速度変動は、後に述べるが、変動の周波数が目標速度に依存するためフィルタなどで除去することができない。そこで、速度変動が許容範囲に収まるように適切にエンコーダ分解能を決定する必要がある。

ここで、本論文で対象とするメカトロソフトウェアサーボ系の産業界における使われ方をまとめる。

- サーボコントローラの構成が、位置フィードバックと速度フィードバックにより構成されており、速度制御部にPI制御器、位置制御部にP制御器が用いられている。
- 速度フィードバックに用いられる速度フィードバック信号の推定には、単純な差分演算が用いられている。
- 輪郭制御に用いられる速度領域は定格速度の1/5以下程度である。
- 制御器中のパラメータであるサーボパラメータは適切に調整されている。

以上の条件を満足する場合に、次章でエンコーダ分解能決定法を

Fig. 1 Block diagram of software servo system

Fig. 2 Model of the software servo system for the analysis of encoder resolution

導出する。

3. エンコーダ分解能に着目した数式モデルと分解能決定法

3.1 ソフトウェアサーボ系の数式モデル

本論文では、産業用メカトロサーボ系の1軸に着目し、その1軸におけるエンコーダ分解能を適切に決定する手法を導出する。この1軸というのは、産業用ロボットアームでは関節座標系における各関節の中の1つの軸に相当し、NC工作機械では動作の1自由度分に相当する。産業用メカトロサーボ系は、通常輪郭制御を行う際に用いられる速度領域であるモータの最大速度の1/5以下の速度動作条件においては、1軸のダイナミクスを各軸独立に2次系

$$Y(s) = \frac{K_p K_v}{s^2 + K_v s + K_p K_v} U(s) \quad (1)$$

で表すことができる¹⁷⁾。ここで、 $Y(s)$ はサーボ系の位置出力、 $U(s)$ はサーボ系の位置入力、 K_p 、 K_v はそれぞれ、位置ループゲインと速度ループゲインである。式(1)で示されるメカトロサーボ系の2次モデルの特長をまとめる。

- メカトロサーボ系を厳密に表現しようとする、1つの軸に13次の微分方程式が要求され、飽和特性まで入れると非線形高次微分方程式で表す必要がある。しかし、輪郭制御で通常の使われ方をされるときは、2次モデルで表現できる。
- 産業用メカトロサーボ系の通常の使われ方において、2次モデルはメカトロサーボ系を適切に表す数式モデルであり、ロボットアームやNC工作機械などの機種が一つ決まれば、パラメータまでを含めて一つの2次モデルですべての動作範囲を表すことができる。
- ロボットアームの姿勢の変化や工具等の取り換えなどによりモータにかかる慣性モーメントが原理的には変化するが、その変化はメカトロサーボ系の通常の使われ方においては無視できるような大きさであり、モデル中のパラメータを変更する必要はない。
- ロボットアームやNC工作機械などの機種が異なれば、2次モデル中のサーボパラメータが異なる。

この式(1)で示されるメカトロサーボ系の制御系をそのままソフトウェアサーボ系に適用した図1のソフトウェアサーボ系から、エンコーダ分解能の解析に必要な部分のみを抽出したソフトウェアサーボ系のモデルを図2に示す。これは、ソフトウェアサーボ系の構成(図1)から、差分演算によって計算される速度フィードバック信号を外部入力とみることによって、取扱いを容易にしている。ただし、この外部入力とは図1の速度信号と同じ信号を便宜的に外部入力としただけであり、図1と本質的には同じものである。この外部入力は、アナログサーボ系の場合には、速度出力が連続的にフィードバックされるが、ソフトウェアサーボ系では、離散的にフィードバックされる。位置信号の基本単位は1 pulseであり、速度信号はこの位置信号の差分演算によって計算されるため、

差分演算による速度信号の計算の基本単位は、 $1/\Delta t_p$ (pulse/s) となる。ここで、 Δt_p (s) はサンプリング時間間隔を表す。

3.2 制御性能とエンコーダ分解能との関係

エンコーダ分解能によって生じるリプル状の速度変動と、サーボパラメータとの関係式を導出する。本節においては、産業界で最もよく用いられる一定速度のサーボモータの動作時における速度変動について解析する。図2に従って信号の流れを考えると

- (1) 位置信号の差分演算によって決定される速度分解能 $1/\Delta t_p$ によって切り捨てられる誤差分が累積され、その累積値が速度分解能を超えた時点で、速度フィードバック信号が $1/\Delta t_p$ だけ付加されることになる。この付加された速度フィードバック信号が速度変動の原因となる。
- (2) 付加された分の速度フィードバック信号に速度ループゲイン K_v を掛けることによって、モータへの入力 $K_v/\Delta t_p$ (pulse/s²) だけステップ的に変化する。
- (3) モータの速度出力の、付加された速度フィードバック信号による変化は、モータへの入力をサンプリング時間間隔 Δt_p で積分することによって、 $(K_v/\Delta t_p) \times \Delta t_p = K_v$ (pulse/s) となる。

すなわち、速度分解能の影響によって速度フィードバックに付加された信号によって生じる速度変動の大きさは、速度ループゲイン K_v の値と一致する。そこで、単位に注意してこの関係を表現すると

$$\Delta N = \frac{60K_v}{R_E} \quad (2)$$

と表すことができる。ここで、 ΔN (rev/min) はリプル状の速度変動の振幅、 R_E (pulse/rev) はモータ1回転に割り当てられたエンコーダのパルス数で定義されるエンコーダ分解能を表す。ここで導いた式(2)は、次のエンコーダ分解能決定の基本となる式である。式(2)で表されるリプル状の速度変動の振幅は、ロボットアームやNC工作機械などの機種ごとに K_v が調節されるため、機種ごとに与えられることになる。

次に、リプル状の速度変動の周期と目標軌道の速度との関係を導出する。目標軌道の速度を V_{ref} (pulse/s) とすると、差分演算によって得られる速度フィードバックは、速度分解能が $1/\Delta t_p$ であるため $[V_{ref}\Delta t_p]/\Delta t_p$ となる。ここで、 $[x]$ は x 以下の最大整数を表す。(1)によりこの誤差がサンプリング時間間隔ごとに累積され、 $1/\Delta t_p$ を超えた時点でリプル状の速度変動が生じるため、 $1/\Delta t_p$ を超えるまでのサンプリングの回数を n とすると

$$n \left(V_{ref} - \frac{[V_{ref}\Delta t_p]}{\Delta t_p} \right) = \frac{1}{\Delta t_p} \quad (3)$$

となる。式(3)から速度変動の周波数 f_r (Hz) は

$$f_r = \frac{1}{n\Delta t_p} = \frac{V_{ref}\Delta t_p - [V_{ref}\Delta t_p]}{\Delta t_p} \quad (4)$$

と計算される。この式(4)から、速度変動の周波数 f_r は目標軌道の速度 V_{ref} に依存し、必ずしも V_{ref} に関しての単調関数とならないため、ローパスフィルタなどを用いて平滑化できないことがわかる。

3.3 エンコーダ分解能決定法

3.2節で導いた速度変動とエンコーダ分解能との関係式である式(2)を用いて、エンコーダ分解能の決定式を求める。モータを一定速度で動作させた場合に、その速度がどの程度変動するかの仕様として速度変動幅と最高速度の比で定義される速度変動率 R_N が用いられている。このことから、ソフトウェアサーボ系においては、エンコーダ分解能に起因する速度変動率 R_N を

$$R_N = \frac{\Delta N}{N_{\max}} \quad (5)$$

と表すことができる。ここで、 $N_{\max}$ (rev/min) はサーボモータの最高速度である。式(5)を式(2)に代入し、エンコーダ分解能 R_E について解くことによって、エンコーダ分解能は

$$R_E = \frac{60K_v}{R_N N_{\max}} \quad (6)$$

で決定することができる。式(6)は、本節で導いた最終の結果であり、この式によって、最高速度 $N_{\max}$ と速度ループゲイン K_v からサーボモータの用途によって決まる速度変動率 R_N を満たすように、適切にエンコーダ分解能 R_E を決定できる。式(6)には、負荷の慣性モーメントなど制御対象の特性が陽には含まれていないが、メカトロサーボ系の機種に応じて式(1)の2次モデルのサーボパラメータ K_p , K_v が調整されるため、適切なエンコーダ分解能も機種に応じて決定される。

4. エンコーダ分解能決定法の実験による検証

4.1 エンコーダ分解能と制御性能の関係の実験による検証

実験によりエンコーダ分解能と速度変動の関係を検証する。実験には、DEC-1(八幡電機精工製)を用いた。図3に実験装置の概略図を示す。このDEC-1は、実際に産業界で用いられているサーボモータとサーボコントローラから構成されており、負荷がロボットアームやNC工作機械などの機構に相当する。このDEC-1で諸々の手法の検証を行うことにより、産業界のメカトロサーボ機器にその手法を適用することが確認できる。DEC-1は本来アナログサーボ系が構成されているが、今回の実験では、パソコンを用いてソフトウェアサーボ系を実現した。すなわち、サーボモータのパルス出力をパソコンに取り付けてあるカウンタで積算し、パソコンのプログラムでサーボコントローラを実現し、その出力をD/A変換器を用いてサーボアンプに入力することによってソフトウェアサーボ系を構成した。D/A変換の分解能は、 ± 5 Vを12 bitの分解能で出力することができるD/A変換器からアンプを用いて1/100倍させて使用しており、1 bitが約 2.44×10^{-5} Vとなるようにして、制御性能への影響が無視できるようにしている。また、サーボモータの速度は、負荷発電機に取り付けてある速度検出器(タコジェネレータ)出力をデジタルデータストレージを用いて測定した。このタコジェネレータはサーボモータの回転数1000 rev/minで7 V出力する。タコジェネレータ出力には雑音成分が非常に多く含まれているため、100 Hzのローパスフィルタを用いて雑音成分を除去した。サーボモータに取り付けてあるエンコーダの分解能は2000 pulse/revであるが、パルスカウンタの入力時にエンコーダ出力の二つの信号の立ち上がり立ち下がりを検出することにより、本来1 pulseの信号を4 pulseとする4倍回路を通すことによって $R_E = 8000$ pulse/revとした。最高

Fig. 3 Experimental equipment

Fig. 4 Validation of velocity ripples in the software servo systems

速度は $N_{\max} = 1000$ rev/min, サンプル時間間隔は $\Delta t_p = 4$ ms である。位置ループゲインと速度ループゲインは、アナログサーボ系において応答に振動やオーバーシュートが生じないように、 $K_p = 12$ 1/s, $K_v = 68$ 1/s と設定している。速度変動が産業界で問題となるのは、速度変動による相対的な速度変動が大きくなる低速時であるため、DEC-1 への入力としてランプ入力 $u(t) = 40t$ pulse, すなわち、モータの回転速度としては 0.3 rev/min という低速を与えた。

定常状態における実験結果とシミュレーション結果を図 4 に示す。図 4(a), (b) から、定常状態においては振幅は実験結果、シミュレーション結果共に約 0.004 V, 周波数も両者とも約 40 Hz であり、波形の形状も両者ともほぼ三角波となっているため、実験結果とシミュレーション結果はほぼ一致していることが確認された。図 4(a) の実験結果において速度変動の大きさは約 0.004 V, すなわち、0.57 rev/min であり、式 (2) から計算される速度変動の大きさ $\Delta N = 60 \times 68 / 8000 = 0.51$ rev/min とほぼ一致することがわかる。また、速度変動の周波数も式 (4) から計算される周波数 40 Hz と一致している。検証のため、アナログサーボ系を構成して同じ条件で実験を行った結果を図 4(c) に示す。アナログサーボ系では、速度変動はまったく発生していないことがわかる。このことから図 4(a) の速度変動は、ソフトウェアサーボ系の分解能に

起因したものであることが確認され、3.2 節の実験による検証を行うことができた。

4.2 エンコーダ分解能決定例

3.3 節で導いた式 (6) を利用して、エンコーダ分解能を決定する例題を示す。先の実験で用いた DEC-1 において、速度変動率 $R_N = 1 \times 10^{-3}$ と与えた場合に必要なエンコーダ分解能は、式 (6) から $R_E = 60 \times 68 \times 1000 / 1000 = 4080$ pulse/rev となることがわかる。逆に実際に取り付けてあるエンコーダ分解能 $R_E = 8000$ pulse/rev では、速度変動率が $R_N = 60 \times 68 / (1000 \times 8000) = 5.1 \times 10^{-4}$ となることがわかる。このように、エンコーダ分解能決定式である式 (6) を用いることによって、要求される速度変動率から容易にエンコーダ分解能を決定できることがわかる。

5. 結 論

- (1) メカトロソフトウェアサーボ系において、リプル状の速度変動とサーボパラメータの関係を理論的に導出した。
- (2) この関係を用いることによって、メカトロサーボ系の動作に関する要求制御性能から適切にエンコーダ分解能を決定する手法を提案した。
- (3) 提案法の妥当性を、実際に産業界で用いられているサーボコントローラとサーボモータから構成される実験装置を用いて検証した。
- (4) 本解析により、リプル状の速度変動とエンコーダ分解能の関係から、エンコーダ分解能を適切に決定することができる。

参 考 文 献

- 1) 久良修郎, 元村直行: サーボ系におけるこれからの制御技術, 計測と制御, **31**, 1 (1992) 138.
- 2) 菅野和宏: ソフトウェアサーボ系第 1 回総論・処理速度の向上で実用期へ, 日経メカニカル, **4**, 4 (1988) 96.
- 3) 特集 デジタルサーボを使いこなす, オートメーション, **36**, 11 (1991).
- 4) 作久田博司, 吉谷 豊, 米沢隆広: ソフトウェアサーボによるロボットアームの防振制御 (第 2 報), 日本機械学会論文集 (C 編), **54**, 497 (1988) 217.
- 5) C. de Wit: Robust Control for Servo-mechanism under Inexact Friction Compensation, Automatica, **29**, 3 (1993) 757.
- 6) (株) 安川電機製作所編: 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) 96.
- 7) 武藤高義: アクチュエータの駆動と制御, コロナ社, (1992) 22.
- 8) S. Arimoto, V. Parra-Vega and T. Naniwa: Hyper-stable Servo Controllers without Velocity Measurement for a Class of Nonlinear Mechanical Systems, Trans. Soc. Instrument and Control Eng., **31**, 10 (1995) 1666.
- 9) S. Nicosia and P. Tomei: Robot Control by Using Only Joint Position Measurement, IEEE Trans. Autom. Control, **35**, 9 (1990) 1058.
- 10) 渡辺正彦, 大前 力, 久保謙二, 松田敏彦: 速度推定オブザーバを用いたデジタルサーボ, 電気学会論文誌, **107-D**, 12 (1987) 1468.
- 11) 久保謙二: デジタル速度オブザーバ, 機械設計, **34**, 17 (1990) 158.
- 12) 藤田光悦, 海田英俊: イナート同定機能を付加した瞬時速度検出, 機械設計, **35**, 8 (1991) 164.
- 13) 堀 洋一, 今野雄介: 低精度エンコーダを用いたサーボモータのロバスト制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '92 講演論文集, Vol. A (1992) 167.
- 14) 藤野義一, 久良修郎: モーション・コントロール, 産業図書, (1996) 107.
- 15) 鄭 俊忠, 中村政俊, 後藤 聡, 久良修郎: 産業用メカトロサーボ系の輪郭制御性能に着目したモデル構成とサーボパラメータ決定法, 精密工学会誌, **64**, 8 (1998) 1158.
- 16) 加来靖彦: サーボ技術の現状, 機械設計, **35**, 8 (1991) 30.
- 17) 久良修郎: ニューメカ講座, サーボ技術, 位置ループと速度ループの関係, 日経メカニカル, **226**, 8 (1986) 135.