適応制御による超音波モータの速度制御

正員 千住 智 信 (琉球大)

非会員 平 良 淳 (琉球大)

正員 上 里 勝 実 (琉球大)

Speed Control of Ultrasonic Motor by Adaptive Control

Tomonobu Senjyu, Member, Jun Taira, Non-member, Katsumi Uezato, Member (University of the Ryukyus)

キーワード：超音波モータ，適応制御，STC，速度制御，特性変動

1. ま え が き

超音波モータ (Ultrasonic Motor; USM) は、小形で軽量、低速、高トルク、磁気作用がないなど、従来の電磁モータにはない優れた性能と特徴を備えており、小形モータの利用分野における応用が期待されている。このモータは、固定子の機械系共振周波数近傍で回転する特殊モータであり、温度上昇による特性変動のため、駆動周波数が一定でも一定の回転速度を得ることができない⁽¹⁾。本レターは、温度上昇によるモータの特性変動に対しても、常に一定の回転速度を得るために、適応制御を適用した制御法を提案する。

2. 適応制御による速度制御

超音波モータは摩擦駆動力により回転する特殊モータであり、その動特性モデルはまだ確立されていない。そこで、プラントの動特性が未知の場合の制御法として知られている適応制御により、モータの速度制御を行う。本レターでは、適応制御の一手法である STC (Self-Tuning Controller) により制御系を構築する。

図 1 に、モータ駆動周波数 f に対する回転速度特性を示す。同図は運転前の特性 (a) と 2 分間運転後の特性 (b) を示している。同図からわかるように、モータの特性は短時間で大きく変化する。また、周波数対回転速度特性は非線形である。従って、直接周波数 f によって制御することは困難なため、ある基準となる周波数 f^* からの変化分 Δf により制御する。

STC による速度制御システムの構成図を図 2 に示す。ここで、 $y(k)$ は回転速度 (rpm)、 $y_m(k)$ は指令速度、 $u(k)$ は制御入力で Δf (kHz) である。また、 $u^* = f^* = 41.0$ kHz とする。なお、 Δf は、図 1 に

いて f を減少させる方向を正とする。

ここで、STC の対象とするモデルは (1) 式で表せるものとして、コントローラおよび同定器の設計を行う。

$$Ay(k) = q^{-d}Bu(k) + w(k) \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{cases} A = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n} \\ B = b_0 + b_1q^{-1} + \dots + b_mq^{-m} \end{cases}$$

ただし、 $w(k)$ は白色雑音、 d ($d \geq 1$) はむだ時間を表す。

コントローラは、制御入力の制限を考慮した (2) 式

図 1 駆動周波数 f 対回転速度特性
Fig. 1. Rotation speed vs. drive frequency.

図 2 STC による速度制御システム
Fig. 2. Speed control system.

図 3 STC による速度制御
Fig. 3. Speed control by STC.

の評価関数 J を最小とする $u(k)$ を構成するように設計する。

$$J = E[\{y(k+d) - y_m(k+d)\}^2 + \lambda\{u(k) - u(k-1)\}^2] \quad (2)$$

ただし、 $E[\cdot]$ は期待値作用を表しており、 λ は重み係数である。

J を最小とする $u(k)$ の関係式は、 $\partial J / \partial u(k) = 0$ とおくことにより、

$$\left\{ BR + \frac{\lambda}{b_0} \right\} u(k) = y_m(k+d) - Hy(k) + \frac{\lambda}{b_0} u(k-1) \quad (3)$$

となる⁽²⁾。ただし、 R, H は(4)式の恒等式より一意に決定される。

$$1 = AR + q^{-d}H \quad (4)$$

$$\begin{cases} R = 1 + r_1 q^{-1} + \dots + r_{d-1} q^{-(d-1)} \\ H = h_0 + h_1 q^{-1} + \dots + h_{n-1} q^{-(n-1)} \end{cases}$$

同定器は、逐次繰返し最小二乗法のアルゴリズムを用いて(1)式のパラメータを同定する。なお、多項式の次数 n, m およびむだ時間 d は、良好な制御結果が得られる値を用いる。

3. 実験結果と検討

実験は周波数 40.2 kHz 一定でモータを 2 秒間回転させた後、時刻 $t=0$ s から制御と同定を同時に開始した。制御周期は 40 ms とし、また $u(k)$ は $0 \leq u(k) \leq 1$ kHz の範囲内に制限した。

図 3 に、 $n=m=2$, $d=1$, $\lambda=5,000$ として STC を設計した場合の回転速度の制御結果を示す。ただし、 $y_m(k)=50$ rpm 一定である。また、このときのパラメータの同定過程を図 4、図 5 に示す。

図 3 より明らかなように、無制御の場合(破線)、駆動周波数が一定であるにもかかわらず、回転速度は大きく脈動し、更に温度変化に伴う特性変動により、平均回転速度が低下している。STC で制御した場合

図 4 a_i パラメータの同定過程
Fig. 4. Identification of parameter a_i .

図 5 b_i パラメータの同定過程
Fig. 5. Identification of parameter b_i .

は、回転速度に多少の脈動が生じているが、指令速度にほぼ一致していることがわかる。また、図 4、図 5 よりシステムパラメータ (a_i, b_i) も短時間で同定できることがわかる。システムに同定器がなければ、パラメータがオンラインで同定できないため、モータの良好な速度制御は困難である。

4. むすび

超音波モータの速度制御法として適応制御を適用する手法を提案し、実験により本手法の有効性を確認した。また、超音波モータのモデル式を差分方程式で表現する方法を提案した。(平成 5 年 3 月 19 日受付)

文 献

- (1) 泉野・中岡:「進全波形超音波モータ駆動系の適応制御技法による高性能化」, 電学論 D, 110, 1147 (平 2-11)
- (2) D. W. Clarke: "Self-Tuning Control of Nonminimum-phase Systems", *Automatica*, 20, No. 5, 501 (1984)

千 住 智 信 (正員)

(電学論 D, Vol. 113, No. 6, p. 800 参照)

平 良 淳 (非会員) (写真省略)

昭和 45 年 11 月 22 日生。平成 5 年 3 月琉球大学工学部電子・情報工学科卒業。同年 4 月沖縄県庁入庁。在学中は、超音波モータの速度制御法に関する研究に従事。

上 里 勝 実 (正員)

(電学論 D, Vol. 113, No. 6, p. 800 参照)