II. デジタルモーションコントロールの最新技術

キーワード

モーションコントロール, デジタル制御

正員 大石 潔

長岡技術科学大学

1. はじめに

モーションコントロールへのデジタル制御装置の導入は、精度や応答性能を向上させただけでなく、システムの柔軟性を著しく増大させ、生産システムの統合化を促進させている。「アドバンスデジタルモーションコントロール調査専門委員会」では、モーションコントロールのデジタル化の諸問題や非線形要素のモデル化とその制御手法などの調査研究を行った。本稿では、デジタルモーションコントロールの最新技術の一端を述べてみる。

2. デジタル制御系の実現法

デジタル制御では、入出力変数の情報が時間的にも大さき的にも量子化されてしまう。これは、量子化誤差や有限語長問題になる。 $\mathcal{H}_\infty$ 制御器に代表される高次の補償器では、平衡実現の状態方程式で構成することが一般的に望ましいとされる。量子化誤差や有限語長問題に対しても、平衡実現は有効な対策の1つであることも知られている。さらに量子化誤差の影響の受けにくい実現法として、鈴木らは語長制限に起因する係数量子化誤差の影響を最小にする状態方程式表現を提案し、実機によって有効性を確認している⁽¹⁾。この表現法も通常の平衡実現と同様に、状態方程式の A 行列、 b 行列、 c 行列の中は係数で埋め尽くされてしまう。産業用サーボ系では、計算時間やメモリの制限などから、計算ステップ数と係数の多い実現法は好まれない。計算ステップ数と係数の少ない伝達関数表現の方が好まれる。したがって、高次補償器の実際の実現には、制御屋にもサーボ屋にも、まだまだ越えなければならないハードルが存在している。

デジタル補償器を状態方程式表現で実現する場合、通常の Z 変換より差分変換（デルタ演算子表現）で表現した方が、量子化誤差や有限語長問題の影響が少なくなることがある。金井らは、サンプリング時間 T が短くなればなるほどこの傾向は強く現れることを示している⁽²⁾。通常の Z 変換で離散時間系の状態差分方程式にすると (1) 式になる。(2) 式のデルタ演算子を用いて、状態差分方程式を求めると

(3) 式になる。(3) 式に (2) 式を代入して整理すると (4) 式になる。(4) 式の $x(k)$ の項をまとめると (1) 式になるが、あえてそれをしないのがデルタ演算子の効能となる。サンプリング時間 T が小さいと、例えば、 e^{AT} に 0.995 や 0.9995 の係数が多く存在し、小数点以下の 9 が増えるだけ有限語長問題を起こしやす。そこで、デルタ演算子は $1 - 0.005$ や $1 - 0.0005$ で表現することで有限語長問題を起こりにくしている。計算ステップは多くなるが、差分計算の 1 つのテクニックとして知っておいて損はない。

$$x(k+1) = e^{AT}x(k) + \int_0^T e^{A\tau}d\tau bu(k) \quad \dots (1)$$

$$\delta = \frac{z-1}{T} \quad \dots (2)$$

$$\delta x(k) = \frac{e^{AT} - I}{T}x(k) + \int_0^T e^{A\tau}d\tau \frac{b}{T}u(k) \quad \dots (3)$$

$$x(k+1) = x(k) + (e^{AT} - I)x(k) + \int_0^T e^{A\tau}d\tau bu(k) \quad \dots (4)$$

3. アンチwindアップアルゴリズム

デジタル制御系は、線形演算はもちろん非線形演算も容易に出来る。今までに、同定アルゴリズムやセルフチューニング機能を挿入して、高性能な制御系がいろいろと報告されてきている。また、メモリ機能を積極的に使えば、一度、制御系の操作量（出力）を演算した後に、その値が不適当と判断されれば、再度、制御系の演算を行って適当な操作量に修正することも出来る。PI 補償器のアンチwindアップシステム⁽³⁾は、アナログ回路でも出来るが、デジタル演算ではもっと容易に実現できる。さらに、PI 補償器のような伝達関数の分母と分子が同じ次数の補償器、すなわちプロパーな補償器の一般的な補償器に対するアンチwindアップ制御法として、補償器の入力を修正する方法が提案され、その妥当性も証明されている⁽⁴⁾。

4. 速度制御系のアンチwindアップアルゴリズム

サーボモータの速度制御系は、電流 PI 補償器と速度 PI

"Digital Motion Control".

Advanced Technology of Digital Motion Control.

By Kiyoshi Ohishi, Member (Nagaoka University of Technology)

図1 PI速度制御系の操作量飽和を考慮したシステム

補償器の直列系で構成する場合がほとんどである。アンチwindアップアルゴリズムを各々のPI補償器に挿入することで、windアップ現象を回避させることは、ほとんど達成されるが完全ではない。サーボモータは、速度と負荷の状態によって、各リミット値が変動するからである。サーボモータの速度が高速になると、誘起電圧が高くなり、加減速トルクの電流のための電圧のダイナミックレンジが小さくなる。重負荷時には、定常トルクの電流値が高くなり、電流リミッタで速度PI補償器の電流指令を制限しても、実際にはそれよりも電流は流せない。すなわち、電流PI補償器と速度PI補償器の各リミット値は、モータの状態の関数であり2重の非線形要素となっている。

そこで、図1のような操作量飽和を考慮するシステムを構成する⁽⁵⁾。PI補償器を(5)式と(6)式のように構成する。補償器がプロパーなシステムでは、入力が出力に直接影響する直達項が存在するので、現サンプリングの操作量 $y(k)$ で、操作量を防ぐことが可能である。(6)式より、補償器出力(操作量)がリミット値 y_{max} より大きい場合は状態 $x(k+1)$ を修正し、操作量の飽和を考慮する。 $x(k+1)$ は入力 $e(k)$ によって修正することになる。このときの修正入力 $\tilde{e}(k)$ は、(7)式によって求まる。(7)式を用いて、(8)式の $\tilde{x}(k+1)$ を計算することで、各々のPI補償器の操作量飽和を考慮することが出来る。

$$x(k+1) = x(k) + be(k) \quad (5)$$

$$y(k) = cx(k) + de(k) \quad (6)$$

$$\tilde{e}(k) = e(k) - \frac{y(k) - y_{max}}{d} \quad (7)$$

$$\tilde{x}(k+1) = x(k) + b\tilde{e}(k) \quad (8)$$

次に、図2の速度制御系では、速度補償器の操作量 $I_a^{cmd}(k)$ を、電流補償器に適用した本アルゴリズムによって修正された実際の操作量 $\tilde{I}_a^{cmd}(k)$ とする。既に速度補償器から $I_a^{cmd}(k)$ は出力されているので、現サンプリングでの入力 $e_\omega(k)$ を(9)式により修正し、(10)式を用いて次サンプリングの状態変数 $x(k+1)$ を修正することで、電流PI補

償器と速度PI補償器の直列結合した系の操作量飽和をより考慮することができる。

$$\tilde{e}_\omega(k) = e_\omega(k) - \frac{I_a^{cmd}(k) - \tilde{I}_a^{cmd}(k)}{d} \quad (9)$$

$$\tilde{x}(k+1) = A\tilde{x}(k) + b\tilde{e}_\omega(k) \quad (10)$$

5. ま と め

最近のデジタルモーションコントロールの技術動向の一部を記述した。モーションコントロールの分野では、デジタル制御が単にアナログ制御のデジタル版から、デジタル制御でなければ出来ない制御へ発展している。本稿が、産業応用分野での新しい制御技術の進歩に貢献すれば幸いである。

(平成9年10月31日受付)

文 献

- (1) 小川, 熊谷, 鈴木, 大熊:「2 慣性共振系の有限語長プロセス上の一実現法」, 電学論C, Vol.117-C, No.8, pp.1055-1061, (1997)
- (2) 金井, 堀:「デジタル制御システム入門」, 槇書店, (1992)
- (3) K.J.Åström and T.Hagglund, "Automatic Tuning of PID Controllers", Instrument Society of America, (1988)
- (4) R.Hanus, M.Kinnaert and J.L.Henrotte, "Conditioning Technique, a General Anti-windup and Bumpless Transfer Method", Automatica, Vol.23, No.6, pp.729-739, (1987)
- (5) 間下, 大石:「操作量飽和が考慮したデジタルサーボ系の構成法」, 電気学会産業計測制御研究会資料, IIC-97-17, (1997)

大石 潔(正員) 1957年10月14日生まれ。1981年3月慶応大学工学部電気工学科卒業。1986年3月同大学大学院工学研究科博士課程修了。大阪工業大学講師, 助教授を経て, 1993年4月長岡技術科学大学電気系助教授, 現在に至る。工学博士。主として, 制御工学, パワーエレクトロニクス, ロボティクスに関する研究に従事。IEEE会員など。