

コンピュータ制御のためのソフトウェアによるPWM波の発生

— シグマデルタ変調の応用 —

The Generation of the PWM Waveform by the Software for Microprocessor Control — The Application of the Sigma Delta Modulation —

青 木 立¹⁾

Tatsu Aoki¹⁾

Abstract: Embedded mechatronic systems adopt H-bridge driver circuits with Pulse Width Modulator for actuator control, since there are many design constraints such as power consumption, size, cost, and so on. Microprocessors without PWM generating modules are still used as embedded controllers. In such cases additional electronic circuits are needed for generating PWM waveform. Thus, in order to generate a PWM waveform at low speed sampling without additional electronic circuits, this paper proposes the methodology based on a sigma-delta modulator followed by a low-pass filter with an output gate. The proposed method increases the number of the quantization steps of equivalent output voltage, comparing the conventional method based on a triangle waveform. In order to evaluate the proposed method, simple proportional feedback control systems are considered. Simulation results show that the plant output controlled by the proposed PWM waveform is more stable than that controlled by the conventional one at low sampling rate. The effectiveness of an output gate is also made clear. Therefore the proposed method can be used to control the embedded mechatronic systems.

Keywords: Pulse Width Modulation, Digital controller, Microprocessor control

1. はじめに

組込み型メカトロニクスシステムでは大きさやコストなどシステム設計上多くの制約条件がある。このため、DCモータは線形増幅器の代わりにパルス幅変調 (Pulse Width Modulation, PWM) 及びHブリッジドライバ回路によって駆動される[1]。近年、PWMモジュールを内蔵しているマイクロプロセッサが開発されているが、PWMモジュールを内蔵していないマイクロプロセッサも低コストのため多用されている。これらのマイクロプロセッサでは、PWM波をハードウェアにより発生させるため新たに電子回路が必要になる。このことは、システム全体の電力消費量、大きさ、コストが高くなる。

一方、PWM波をマイクロプロセッサ上のソフトウェアにより発生させる手法について考える。一般に、三角波と基準値を比較し、基準値より高い場合には1、そうでない場合には0を出力することによりPWM波を作成する。図1に制御系のサンプリング周期1ms毎に更新する周期が10ms、振幅が5の三角波を示す。図1からパルス幅は1ms, 3ms, 5ms, 7ms, 9msの5段階で調節可能である。さらに、最大値10と最小値0を考慮するとPWM出力は7段階で調節可能である。この調節ステップ数は8ビットD/Aコンバータの256段階に比べ非常に少なく、ソフトウェアによるPWM波では、アクチュエータの高精度な制御は期待できない。

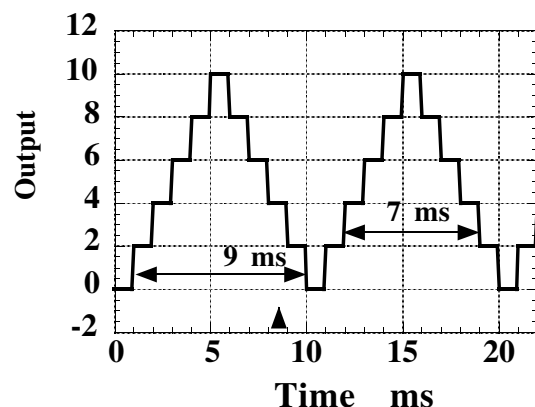


Fig. 1 PWM waveform generation based on triangular wave

そこで、本研究では、ソフトウェアにより高精度なアクチュエータ制御が可能なPWM波の発生手法の開発を目的とする。まず、PWM波の発生手法としてA/Dコンバータなどの信号処理で用いられるシグマデルタ変調の制御系への応用可能性を示した[2]。しかし、シグマデルタ変調に基づいたPWM波によりアクチュエータを駆動すると、ステップ応答において定常的な振動が発生した。本論文ではこのシグマデルタ変調に基づいた手法を改良し、プラントの出力に含まれる定常的な振動を抑制する手法を提案する。

¹⁾東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科, 電気電子工学コース

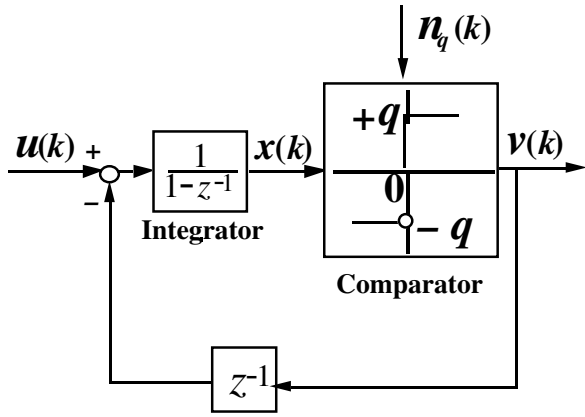


Fig. 2 The schematic diagram of sigma-delta modulator

2. シグマデルタ変調に基づいたPWM波の発生

シグマデルタ型A/Dコンバータは、低い周波数領域を扱うデジタルオーディオなどで用されている[3-4]。これは、アンチエイリアシングフィルタを高精度なアナログ素子で構成する必要がないためである。ここでは、図2に示すシグマデルタ変調器の出力が2値であることを利用して、PWM波を発生することを考える。なお、図2において n_q は出力を2値化するときが発生する量子化ノイズである。図2から以下の2式が得られる。

$$x(k) = \frac{1}{1-z^{-1}} (u(k) + v(k-1)) \quad (1)$$

$$v(k) = x(k) + n_q(k) \quad (2)$$

式(1)を式(2)に代入することにより

$$v(k) = u(k) + H_q(z)n_q(k) \quad (3)$$

が得られる。ここで、 $H_q(z)$ は

$$H_q(z) = 1 - z^{-1}$$

となり、量子化ノイズ伝達関数と呼ばれる。この演算は微分演算であり、量子化ノイズをより高い周波数領域に移動させる。さらに、オーバーサンプリングを併用することにより、高次のアンチエイリアシングフィルタが不要になる。図3に示す振幅が10、1Hzの正弦波をシグマデルタ変調器に入力したときの、2値出力 ± 10 を図4に示す。なお、サンプリング周期は1msに、 q は10に設定した。図5に得られた2値出力を14次のコムフィルタを通したときの出力を示す。量子化ノイズが混入しているが元の正弦波に復元されている。一方、図3に示す正弦波を図1に示す三角波を用いた従来型のPWM変調器に入力し、その2値出力を14次のコムフィルタを通した結果を図6に示す。図5及び図6よりシグマデルタ変調の方が従来手法より量子化ノイズが少ないことがわかる。これは、量子化ノイズが量子化ノイズ伝達関数 $H_q(z)$ により高域に移動したため、コムフィルタによるノイズの減衰がより大きくなるためである。従って、シグマデルタ変調により量子化ノイズの少ないPWM波を発生することが可能なことがわかった。さらに、シグマデルタ変調器をソフトウェアにより実現するためには、図2に示す簡単な演算のみで実現できるため、マイクロプロセッサへの負荷は小さい。

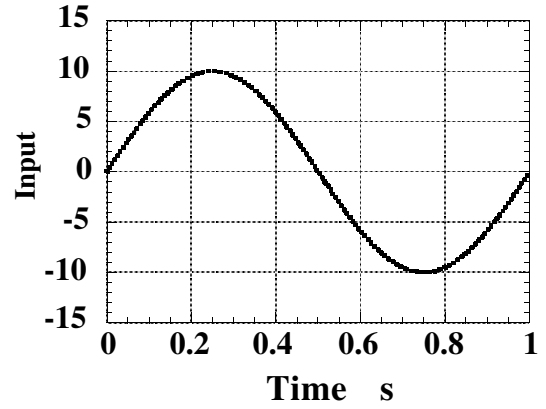


Fig. 3 Sigma-delta modulator input

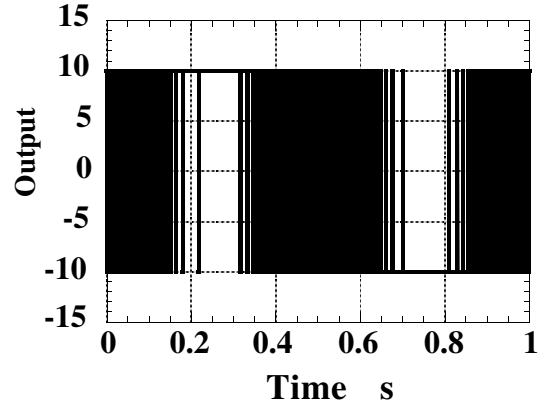


Fig. 4 Sigma-delta modulator output

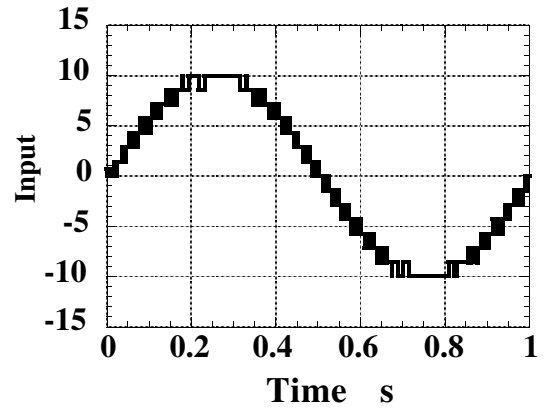


Fig. 5 Filtered output of sigma-delta modulator

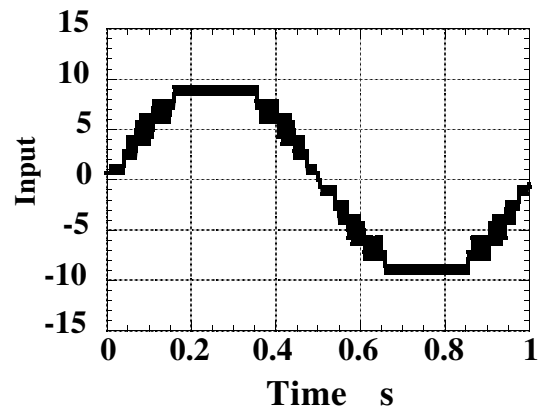


Fig. 6 Filtered output by using conventional method

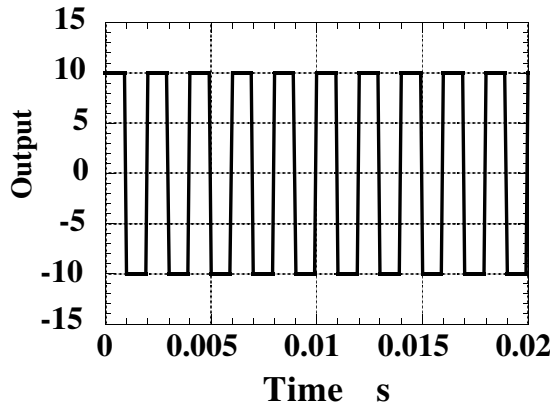


Fig. 7 Sigma-delta modulator output for 0

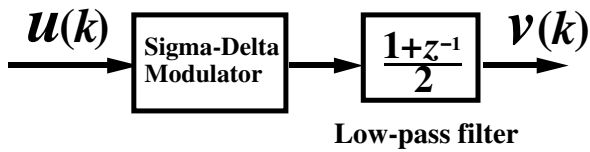


Fig. 8 Sigma-delta modulator with a low-pass filter

3. シグマデルタ変調器の制御系への応用

3.1 ローパスフィルタの導入

フィードバック制御では、目標値と制御量の偏差が0のとき、アクチュエータの指令値は0になる必要がある。しかし、図7に示すようにシグマデルタ変調器に0を入力したとき、その出力は0ではなく、サンプリング周期毎に10と-10が交互に出力される。このチャタリングにより制御対象の高次モードが励振されたり、駆動メカニズムが磨耗したりする。このチャタリングを防止するため、図8に示すようにローパスフィルタ $H_f(z^{-1})$

$$H_f(z^{-1}) = \frac{1+z^{-1}}{2} \quad (4)$$

をシグマデルタ変調器の後に挿入する。式(5)から式(8)に各入力に対するフィルタ出力を示す。

- $u(k) = 10.0$

$$\frac{0 \times 0 + 1 \times (10)}{0 + 1} = 10.0 \quad (5)$$

- $u(k) = 5.0$

$$\frac{2 \times 0 + 2 \times (10)}{2 + 2} = 5.0 \quad (6)$$

- $u(k) = -7.5$

$$\frac{2 \times 0 + 6 \times (-10)}{2 + 6} = -7.5 \quad (7)$$

- $u(k) = -8.0$

$$\frac{2 \times 0 + 8 \times (-10)}{2 + 8} = -8.0 \quad (8)$$

従来の三角波に基づいたPWM波ではPWM周期は一定であるが、シグマデルタ変調器では図9から図12より入力値に従って変化する。このため、デューティ比の可変段階が従来手法より多くなり、より精度良く制御可能になる。

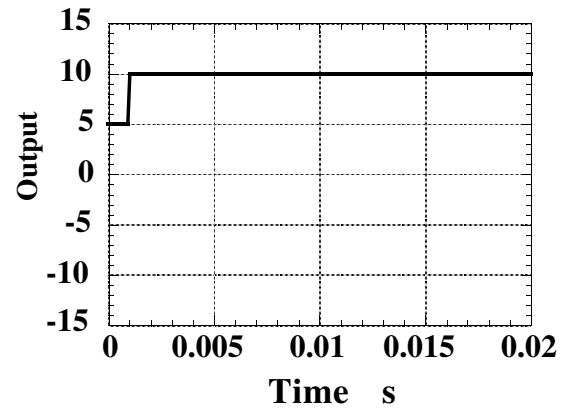


Fig. 9 Sigma-delta modulator output with a low-pass filter for 10

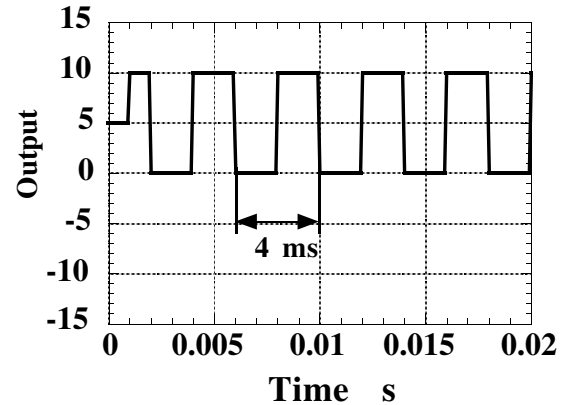


Fig. 10 Sigma-delta modulator output with a low-pass filter for 5

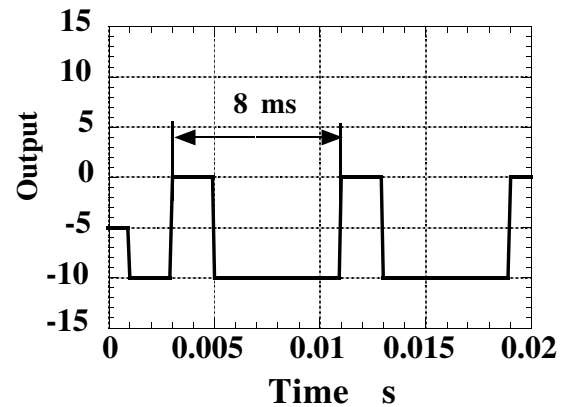


Fig. 11 Sigma-delta modulator output with a low-pass filter for -7.5

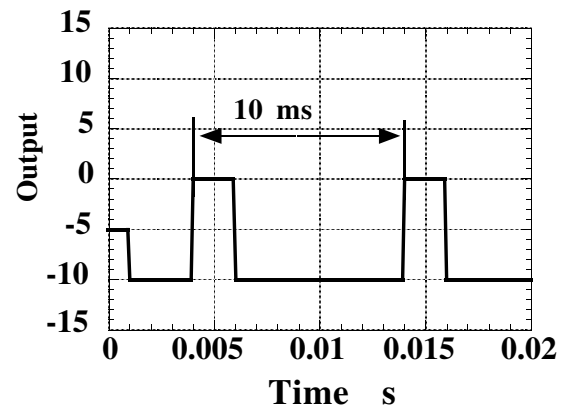


Fig. 12 Sigma-delta modulator output with a low-pass filter for -8

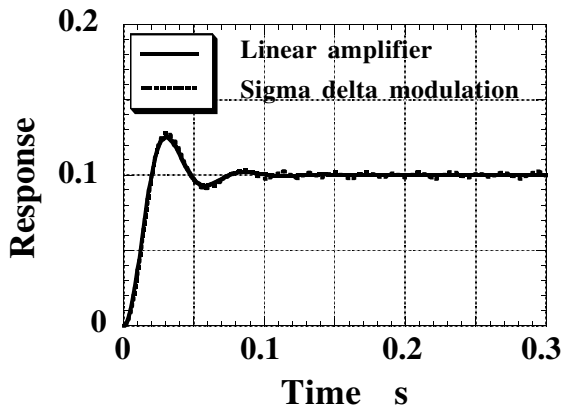


Fig. 13 Step response by using proposed method

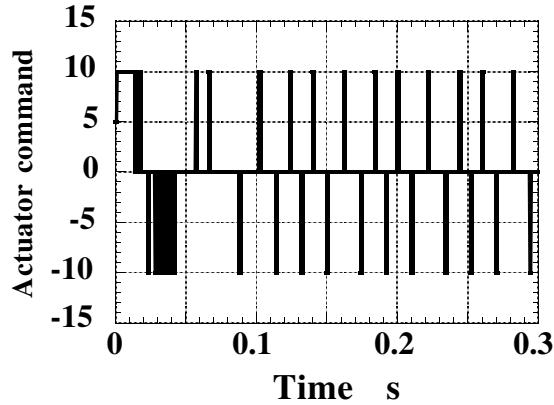


Fig. 14 Motor comandnd by using proposed method

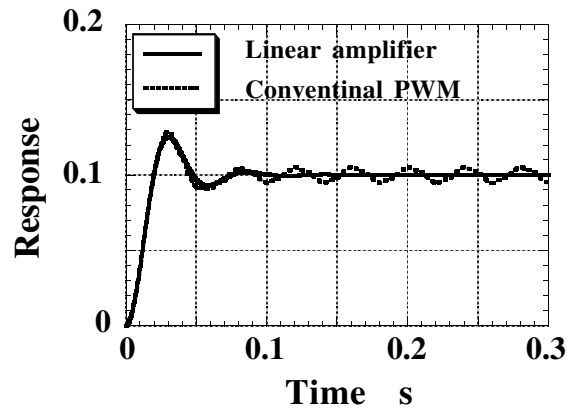


Fig. 15 Step response by using conventional method

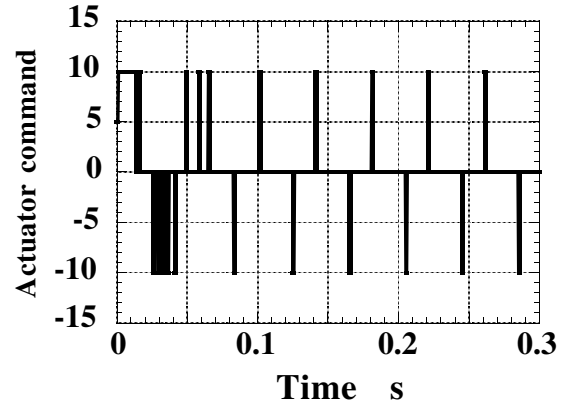


Fig. 16 Motor comandnd by using conventional method

4. 提案手法の評価

最も簡単な位置フィードバック制御系を例に提案手法と従来手法を比較する。シミュレーションはMATLAB/SIMULINKにより行った。以下の制御対象について考える。

$$H(s) = \frac{100}{s+100} \frac{1}{s} \quad (9)$$

シミュレーションパラメータ

比例ゲイン $k = 250$ サンプル周期 $T=1\text{ms}$

制御対象の定格入力 $\pm 10\text{v}$

従来手法のための三角波 振幅 ± 10 周波数 100Hz

図13及び図15に提案手法と従来手法に関するステップ応答を示す。また、図14及び図16にそのときのアクチュエータへの指令値を示す。両手法の応答とも定常状態において振動しているが、提案手法の方が振動の周期が短く、振幅も小さくなっている。また、図14及び図16より提案手法の方が制御量を目標に近づけようとしてパルスが頻繁に発生している。これは、提案手法の方がPWM波のデューティ比のステップ数が多く、より高精度に制御可能なことを示している。なお、両手法の応答における振動は、PWM波の最小パルス幅による駆動エネルギーが大き過ぎるために発生する。そこで、サンプル周期を短くし、最小パルス幅の駆動エネルギーを減少させることを考える。図17及び図18に提案手法に関してサンプル周期を短くしたときのステップ応答を示す。ステップ応答における定常的な振動は大幅に減少するが、高速マイクロプロセッサが必要になる[5]。

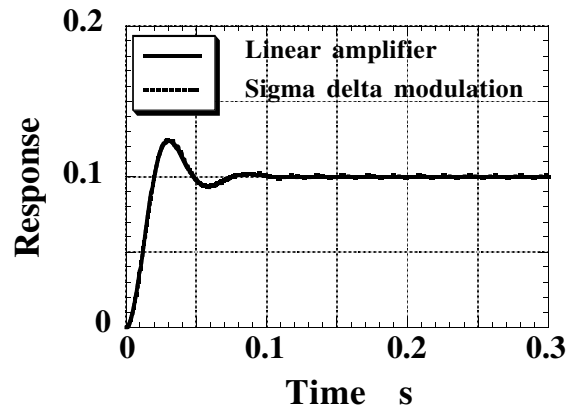


Fig. 17 Step response by using proposed method($T;0.5(\text{ms})$)

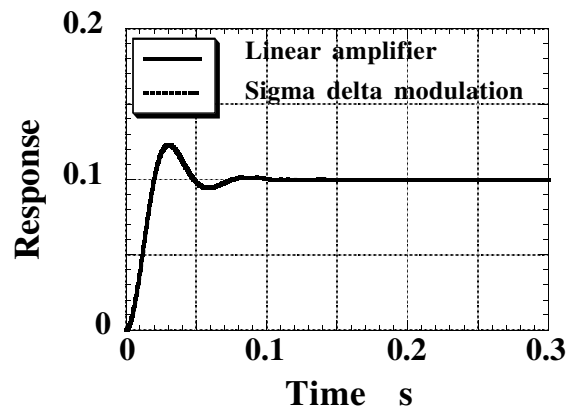


Fig. 18 Step response by using proposed method($T;0.1(\text{ms})$)

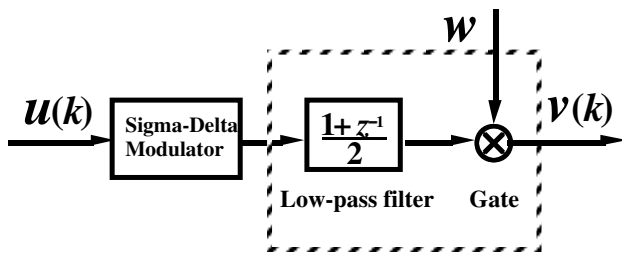


Fig. 19 Introduction of an output gate

5. 出力ゲートの導入

ここでは、サンプリング周期を短縮することなく、最小パルス幅の駆動エネルギーを減少するため、図19に示すようにローパスフィルタの出力部分にゲートを設ける。ゲート入力 w が1のときはフィルタ出力が出力され、0のときは0が出力される。フィードバック制御系において、目標値と制御量の偏差の絶対値が小さくなった場合にこの出力ゲートを有効にする。図21及び図23に偏差の閾値を1.0に設定し、0.5ms毎に出力ゲートを開いた場合のランプ応答、正弦波応答をそれぞれ示す。また、図20及び図22に出力ゲートを用いない場合のランプ応答、正弦波応答をそれぞれ示す。制御系の目標値の変化が小さいときに出力ゲートが有効であることがわかった。

6. 結 論

本研究では、PWM波をソフトウェアにより発生する手法として、ローパスフィルタ及び出力ゲートを加えたシグマデルタ変調器による手法を提案した。さらに、比例フィードバック制御系に関して、提案手法と三角波を用いた従来手法を比較した。その結果、提案手法は従来手法より精度良く制御可能であり、実機に应用可能なことがわかった。

7. 謝 辞

本研究は平成24年度 東京都立産業技術高等専門学校 特定課題研究費「DCモータの省エネルギー制御手法に関する研究」の助成によって行われた。

参考文献

- [1] H. H. Asada, "Introduction to Robotics -2.12-Lecture notes", MIT OCW, <http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-12-introduction-to-robotics-fall-2005/>, Capter2, 2005
- [2] 青木 立, "信号処理手法のメカトロニクスへの応用。-DCモータの省エネルギー制御手法の提案", 平成26年度 東京都立産業技術研究センター 研究成果発表会要旨集, p.56, 2014
- [3] 猪瀬 博, 安田 靖彦, 村上 純造, "符号化変調による一通信方式。- Δ - Σ 変調-", 電気通信学会雑誌, 44-11, pp.197-202, 1961
- [4] E. C. Lfeachor and B. W. Jervis, *Digital Signal Processing A Practical Approach Second Edition*, Pearson Education Limited, pp.78-103, 2002
- [5] W. Zhu, "FPGA Logic Devices for Precision Control An Application to Large Friction Actuators with Payloads", *IEEE Control Systems*, 34-3, pp.54-75, 2014

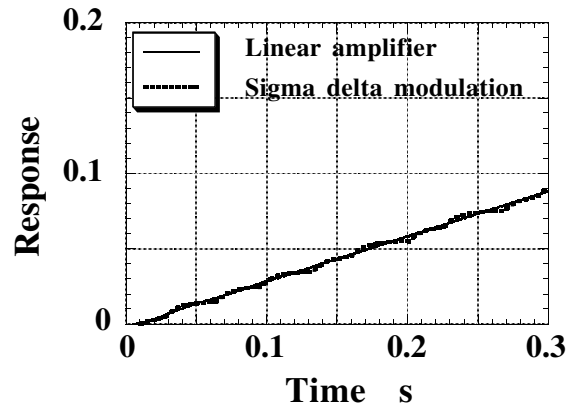


Fig. 20 Ramp response without an output gate

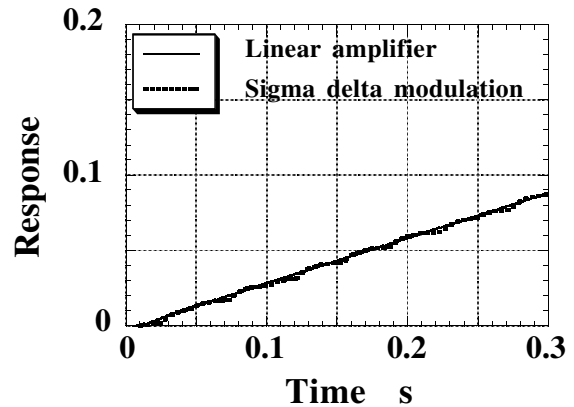


Fig. 21 Ramp response with an output gate

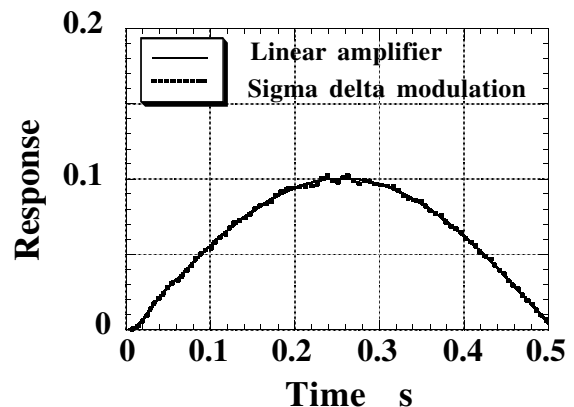


Fig. 22 Sinusoidal response without an output gate

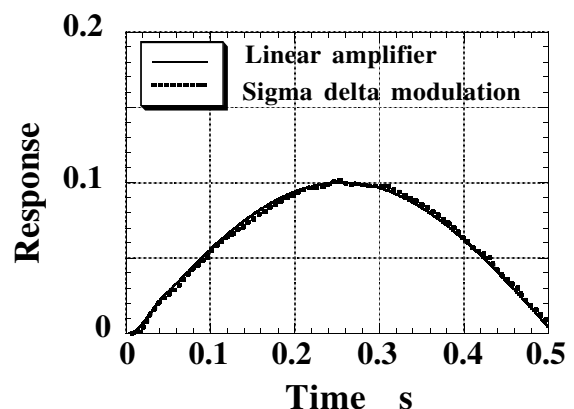


Fig. 23 Sinusoidal response with an output gate