

TSPを用いたサーボモータ速度制御系の周波数応答測定

近藤 勝也 中坊 典史*¹ 杉本 真崇*²

Measurement of frequency characteristics of servomotor speed control system with TSP

Katsuya KONDO Norifumi NAKABO Masataka SUGIMOTO

Frequency responses of two control systems were measured by applying an impulse response method using a time-stretched pulse (TSP), which had been used in acoustic fields. One system was an electric low pass filter device (LPF) and the other a servomotor speed control system. The measured result of the LPF gave good agreement with the theoretically calculated curve, because the LPF was a linear system and contained less noise. The result of the servomotor system was unsatisfactory, because the servomotor system contained non-linear elements and noise synchronized with motor rotation. It was concluded that numerical simulations and electric circuit experiments had been necessary for applying the TSP method to frequency response measurement of control systems.

1. はじめに

音響システムや制御システムの研究分野において、対象システムの周波数特性を測定することが、しばしば重要な検討項目の一つになる。周波数特性は、伝達関数の表現方法の一つで、正弦波入力に対するシステムの応答を周波数の関数として表したもので、特性が直観的にわかりやすいという特徴がある。実際の測定では、インパルスを入力した時のシステムの出力であるインパルス応答を周波数解析する方法が、周波数特性を求めるための最も基本的な考え方である。しかし、純粋なインパルスはエネルギーが小さいため、信号雑音比 (SNR) が悪いという欠点があった。これを改善するため音響システムの分野において、インパルスを時間的に引き延ばしてエネルギーを大きくした時間引き延ばしパルス (TSP: Time-stretched pulse) が青島によって考案された^{1), 2)}。その後鈴木、浅野らによって詳細な検討と TSP の最適化が行われ^{3)~8)}、精度の良い測定方法が確立された。

著者の 1 人は以前に、高等専門学校の卒業研究で使用するという立場から、この TSP を用いたインパルス応答の測定方法を整理すると共に、具体的な周波数応答測定の計算手順を示した⁹⁾。本報告では、この測定方法を用いてローパスフィルタとサーボモータ速度制御系の周波数応答を測定した結果について説明する。

2. ローパスフィルタの周波数応答測定

2.1 TSPを用いた周波数応答特性の測定方法

(1) 測定手順

TSPを用いてインパルス応答を測定する方法は前述の文献⁹⁾にまとめられており、周波数応答はこのインパルス応答測定の途中結果として求められる。以下には測定手順のフローを示した図 1 を用いて、周波数応答測定の概要を説明する。詳細は当該文献を参照されたい。

始めに測定条件を設定して TSP のパラメータの値を決めて、離散周波数領域の TSP である $H(k)$ を次式に基づいて計算する。

$$H(k) = \begin{cases} \exp(j \alpha k^2) & \text{for } 0 \leq k \leq N/2 \\ \exp\{-j \alpha (N-k)^2\} & \text{for } N/2 < k \leq (N-1) \end{cases} \quad (1)$$

または

$$H(k) = \begin{cases} \exp(j \alpha k^2) & \text{for } 0 \leq k \leq 2/N \\ H^*(N-k) & \text{for } N/2 < k \leq (N-1) \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{いずれも} \quad \alpha = \frac{4m\pi}{N^2}$$

ただし、 j : 虚数、 k : 離散周波数の変数、 N : 離散データ数、 m : 整数で、パルスの引き延ばし係数、 H^* : H の共役複素数である。以下では(1)式または(2)式を合わせて(1)式と呼ぶ)

次に $H(k)$ を離散フーリエ逆変換 (IDFT) して、離散時間領域の TSP である $h(n)$ を得る。これを円状シフトする

*1・*2 情報工学科平成14年度、16年度卒業生

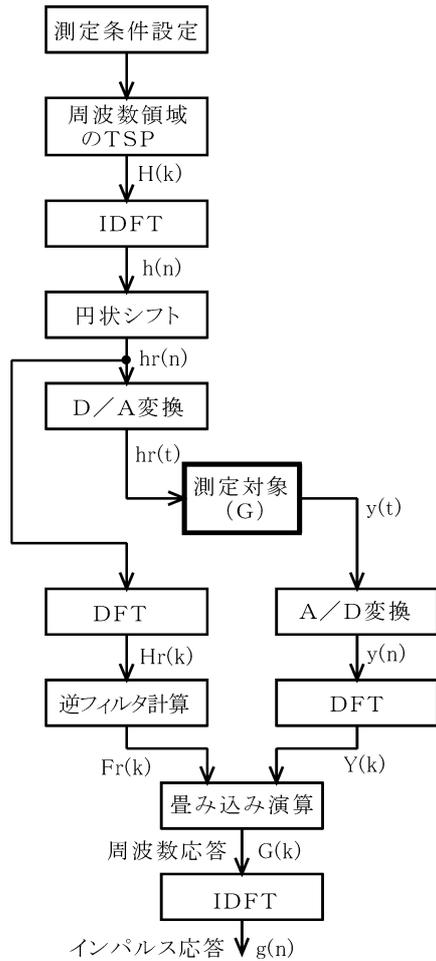


図1 TSPを用いたインパルス応答の測定手順

ことにより、実際の測定に使用するTSPである $hr(n)$ を求め、この離散時間量子化信号をアナログ信号に変換(D/A変換)した $hr(t)$ を測定対象 G に入力する。ついで G からの出力信号 $y(t)$ を、離散時間量子化信号に変換(A/D変換)して $y(n)$ を得る。さらに $y(n)$ を離散フーリエ変換(DFT)すると、離散周波数領域の出力信号 $Y(k)$ が求まる。

一方、測定対象 G の入力信号の元になった $hr(n)$ をDFTした $Hr(k)$ の逆数を計算して、逆フィルタ $Fr(k)$ を求める。逆数の計算は(1)式の $H(k)$ を例にとると、その逆数 $F(k)$ を次式によって求める。

$$F(k) = \frac{1}{H(k)} = \begin{cases} \exp(-j\alpha k^2) & \text{for } 0 \leq k \leq N/2 \\ \exp\{j\alpha(N-k)^2\} & \text{for } N/2 < k \leq (N-1) \end{cases} \quad (3)$$

図1に戻り、 $Y(k)$ と $Fr(k)$ のかけ算が離散周波数領域の畳み込み演算で、その結果が測定対象 G の離散周波数応答 $G(k)$ であり、これが本論文の目的である周波数応答の測定結果である。更にそれを離散フーリエ逆変換すると

G のインパルス応答 $g(n)$ が得られる。なお、 k は離散周波数、 n は離散時間、 t は連続時間を示す変数であるが、以下の説明文では離散や連続を省略して単に周波数 k や時間 t とする。

(2) 測定装置の構成

前項で述べた手順に従って周波数応答を測定するために使用した装置構成を図2に示す。演算装置はパーソナルコンピュータ(EPSON DIRECT社製、以下PCと略す)を、アナログ入出力装置はPCIバスAIOボード(インターフェス社製、以下AIOボードと略す)を用いた。測定装置 G は、後述するローパスフィルタとサーボモータ速度制御装置とした。前者はほぼ理論通り動作する線形システムで、後者は非線形要素やノイズが含まれるシステムである。

PCによる演算内容は図2に示したとおりで、図中の変数名は図1の変数名と対応する。PCおよびAIOボードの主な仕様をそれぞれ表1、2に示す。測定条件の詳細はそれぞれの測定の項で説明する。なお、AIOボードの入出力処理プログラムは、製作会社提供のWindowsユーティリティであるWave Jumper 2001(型名BPC-0600)を使用した。

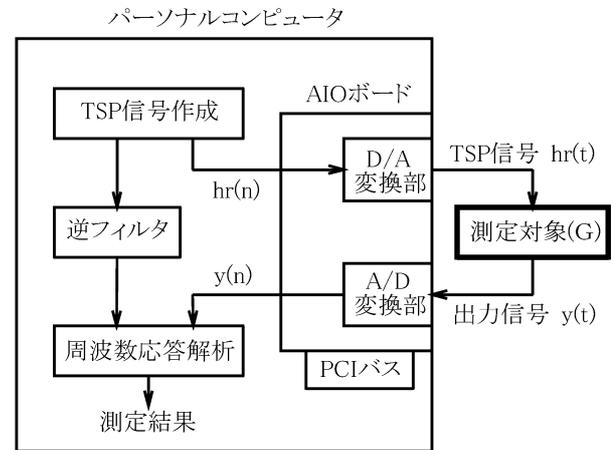


図2 周波数応答測定の装置構成

表1 パーソナルコンピュータの仕様

項目	仕様
機種名(型名)	EPSON DIRECT社 EDi Cube(TP1040RV)
CPU	Intel PentiumIII プロセッサ 1GHz
メモリ	256MB
内蔵HD	40GB
PCIバス	オプションスロット3本(内空き1本)
OS	Windows Me (LPF測定時) or Windows 2000 (サーボモータ測定時)

表2 PCIバスAIOボードの仕様

項目	仕様
機種名(型名)	インターフェース社バスマスタ方式AD変換ボード(PCI-3176))
A/D変換部	
入力チャンネル数	シングルエンド16ch, 差動8ch
入力形式	マルチプレクサ方式
入力レンジ	±1, 2.5, 5, 10V
分解能	16bit
相対精度	±3LSB(Max)
誤差	±0.15%(Max)
変換時間	10μs
D/A変換部	
出力チャンネル数	1ch
出力レンジ	±5, 10V (5mA以下)
分解能	16bit
相対精度	±2LSB(Max)
誤差	±0.1%(Max)
セットリングタイム	5μs
外部制御入力	トリガ, 割込み, サンプルクロック各1点

2.2 ローパスフィルタの測定

(1) ローパスフィルタと測定条件

図2の測定対象Gをローパスフィルタ(以下LPFと略す)にして, 周波数応答の測定を行った. LPFの回路はエヌエフ回路設計ブロック社のアクティブフィルタ機能モジュール(型名HR-4BL2)を用いて制作した. HR-4BL2は4次バターワースのLPFモジュールで, 外付け抵抗によって遮断周波数 f_c を設定する. 今回の実験では $f_c = 1.325\text{kHz}$ に設定した. 本モジュールのデータブックによると, 高域減衰度は70dB以上, ノイズは $35\mu\text{V}_{\text{rms}}$, ひずみ率は0.003%, 電源電圧は±15Vである.

バターワースLPFは通過域の周波数特性(利得)が平坦で, 減衰域のそれが単調に減衰するという, もっとも一般的で使いやすい特性である¹⁰⁾. その伝達関数 $G_B(s)$ の振幅の2乗特性は次式で表される.

$$|G_B(\omega)|^2 = \frac{1}{1 + (\omega/\omega_c)^{2N}} \quad (4)$$

ただし, $\omega_c = 2\pi f_c$, N はフィルタ次数である.

また, 4次バターワースLPFの伝達関数 $G_{B4}(s)$ は次式で表される¹¹⁾. ただし, s は ω_c で割って正規化されている.

$$G_{B4}(s) = \frac{1}{s^4 + 2.613s^3 + 3.414s^2 + 2.613s + 1} \quad (5)$$

次にTSPの設定条件は, TSPの全データ数 $N = 16,384$, パルスの引き延ばし係数 $m = 4,800$, 円状シフト数 $= 3,392$ を使用した. AIOボードの設定は, アナロ

グ出力・入力共に, サンプル周波数 $= 100\text{kHz}$, サンプル件数 $= 100,000$ 件, 電圧レンジ $= \pm 5\text{V}$ とし, 外部トリガを使用した.

(2) 測定結果

図3にLPFのインパルス応答の測定結果を示す. 図中の(1)が測定に使用したTSP, 同(2)はそのときのLPFの出力である. TSPの逆フィルタは図(1)の時間軸の方向を逆にした, すなわち図の右端を時刻0としてそこから左方向に時間を進めた信号になる. この逆フィルタと図(2)に示される出力のたたみ込み演算の結果が図(3)のインパルス応答である. 図を見ると, 出力信号, インパルス応答ともにノイズが十分小さい状態で測定されることが分かる.

図4は図3のインパルス応答の測定によって得られたLPFの周波数応答で, 図中上段が振幅特性, 下段が位相特性である. 2つの図とも(5)式を用いて計算した理論曲線が書き込まれているが, 図では区別ができない程測定値と理論値がよく合っている.

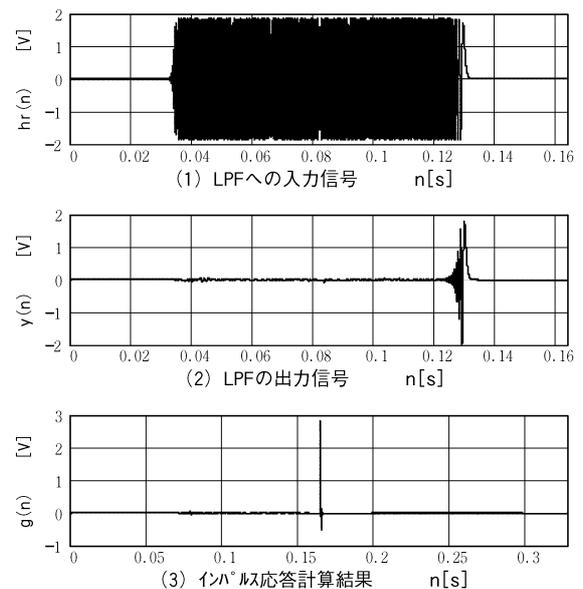


図3 TSPを用いたLPFのインパルス応答

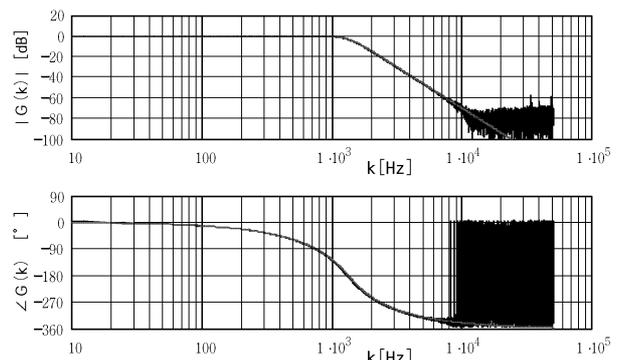


図4 LPFの周波数応答の測定値と理論値

(3) 考察

LPFが線形アクティブフィルタであることから、測定された周波数特性と理論値がよく合うのはほぼ当然の結果である。あえて言えば、今回のTSPの測定条件がほぼ妥当であったことが確認されたといえる。

測定上の課題として信号雑音比(SNR)があげられる。今回の装置構成でSNRに影響を及ぼす要素をあげると、LPFモジュールの高域減衰度が70dBであり、SNRを決定する要因の1つになる。次にAIOボードの分解能16bitをそのままSNRに換算すると約96dB(2¹⁶)であるが、その相対精度±3LSBを悪化要因として差し引くと約78dB(2¹³)になる。以上のことから予想される総合的なSNRは70dB以下と考えられる。図4の振幅特性を見ると、-60dBまでは確実に特性が測定されており、上記の予想とだいたい合っていると見える。しかし、ノイズの大きさは実測により確認しておくべきなので、この点が今後の測定の注意事項にあげられる。

以上のことから、TSPを用いた周波数応答測定は、LPFのような線形回路であればほぼ理論通りの結果が得られることが分かった。また、この方法によれば、時間が短いTSP波形1回の出力で測定できるので、測定時間が短いという利点はとても有効である。

3. サーボモータ速度制御系の周波数応答測定

3.1 サーボモータ速度制御系

(1) 装置構成

図2の測定対象Gに使用したサーボモータ速度制御系の構成を図5に示す。図のサーボモータは直流モータを使用した。加速トルクと減速トルクに差がある非線形性を持ち、加えてモータ回転に同期したノイズが発生しやすいシステムである。特に非線形性に関して、サーボモータのドライバーは加速電流のみを供給し減速電流を流すことが出来ない。サーボモータに結合した負荷モータに減速方向の一定電圧をかけて減速トルクを付加するように構成した。

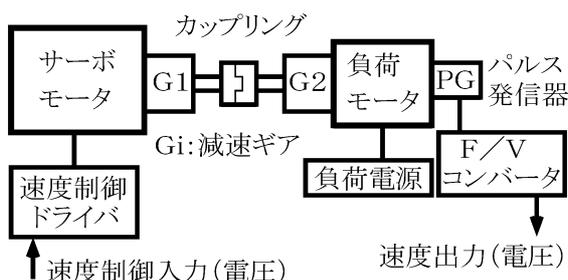


図5 サーボモータ速度制御系の構成

速度制御ドライバーに加える速度制御信号(電圧)がサーボモータ速度制御系への入力である。速度出力はその出力であって、負荷モータに直結したパルス発信器の回転パルスをF/Vコンバータにより電圧に変換することによって検出する。サーボモータ、負荷モータおよびF/Vコンバータの主な仕様を表3に示す。

表3 サーボモータ速度制御系の仕様

項目	仕様
サーボモータ	(ブラシレスDCモータ&速度制御ドライバ)
メーカー名(型名)	日本サーボ(FED6N10PF-D3)
定格出力(電源電圧)	10W(DC24V)
定格回転速度	1500r/min
速度制御範囲	200~2500r/min
速度制御電圧	0~10V
ギア比(ギア1)	減速比1:10
負荷モータ	(ブラシ付きDCモータ)
メーカー名(型名)	日本サーボ(DME34SE6HPA)
定格出力(電圧)	1.3W(DC12V)
定格回転速度	3,300r/min
回転パルス出力	24P/r(光学パルス発信器)
ギア比(ギア2)	減速比1:15(負荷側増速)
F/Vコンバータ	(ペリオマチック方式)
メーカー名(型名)	ココリサーチ(KAZ-740P)
測定範囲	2μHz~20kHz
出力電圧範囲	0~10V
出力更新時間	1ms
ギア比(ギア2)	±0.2%FS以内

(2) ステップ応答

測定対象をサーボモータ速度制御系にした図2の装置構成において、TSP信号の代わりに矩形波信号を与えてステップ応答を測定した。このとき図2の構成に加えて、アナログ信号をA/D変換する際のエイリアシング防止のため、A/D変換部の前にLPF(エヌエフ回路設計ブロック製マルチファンクションフィルタ3611)を設置し、fcをサンプリング周波数の1/2に設定した。

ステップ応答の測定結果を図6に示す。図はサーボモータの加・減速電流の差に起因した立ち上がり時間と立ち下がり時間の差を、負荷モータの電圧を変えて修正した結果である。このときの負荷モータ電圧は18Vであった。まだ立ち上がり時間と立ち下がり時間の間に差が残っているが、今回の装置ではこれがもっとも差の少ない状態であった。

次に図6の速度出力を見ると、入力信号が一定の定常状態においても細かな変動が見られる。これはサーボモータと負荷モータを結合している2つのギアやカップリングなどの回転ムラに起因すると思われるノイズであ

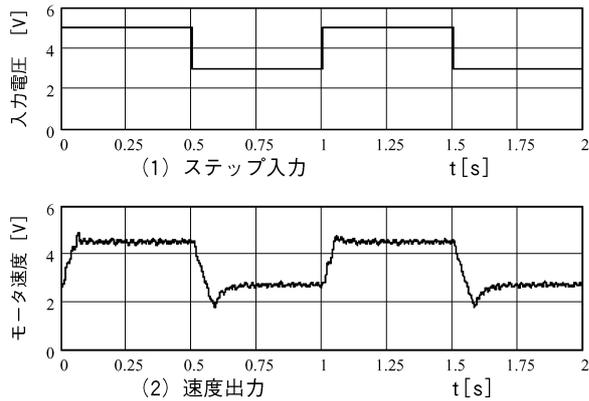


図6 サーボモータ速度制御系のステップ応答

る。このことはモータ速度を周波数解析することによって確かめられたが、各装置のアライメントなどの調整では取り切れなかった。そこでこの回転ノイズのSNRを次式¹²⁾に基づいて測定した。

$$\text{SNR} = 20 \log_{10} \frac{S_{\text{eff}}}{N_{\text{eff}}} \quad (6)$$

ただし、 N_{eff} はノイズ電圧の実効値、 S_{eff} は信号電圧の実効値で、どちらも直流成分(平均値)を差し引く。実際には、図6で入力電圧を3.5Vの一定値にした時をノイズ、それに振幅約 $\pm 1.5\text{V}$ で周波数1Hzの正弦波を加算した時を信号として、それぞれのモータ速度の電圧を測定して計算した。その結果、SNRは約25dBであった。なお、正弦波の周波数1Hzはサーボモータが応答可能な周波数である。

3.2 周波数応答測定

(1) 測定条件

前節で説明したサーボモータ速度制御系のインパルス応答をLPFと同じ方法で測定した。今回のTSPの設定条件は次の通りである。すなわち、TSPの全データ数 $N = 20,000$ 、パルスの引き延ばし係数 $m = 5,000$ 、円状シフト数 $= 3,500$ を使用した。AIOボードの設定は、アナログ出力・入力共に、サンプリング周波数 $= 5\text{kHz}$ 、サンプリング件数 $= 20,000$ 件、電圧レンジ $= \pm 10\text{V}$ とし、外部トリガを使用した。

(2) 測定結果と考察

図7にサーボモータ速度制御系のインパルス応答を示す。図の(1)は測定に使ったTSP、(2)は速度制御系の出力、(3)がインパルス応答である。図の(2)あるいは(3)から、無視できない程のノイズが乗っていることが一目で分かる。これは先に述べたようにモータ軸結合部の回転ムラに起因したノイズである。これにより、インパルス応答を離散フーリエ変換した周波数応答にもノイズ成分が含まれていた。このノイズを平滑するため、同じ条

件で測定した10回の結果を同期加算して得られた周波数応答を図8に示す。

図8のノイズ成分について考察する。図4のLPFに比べて、全般的にSNRが良くない。振幅特性において20、30、50Hzなどの周波数に見られるスペクトルのピークが回転ムラの周波数である。次に、周波数が高くなる程ノイズが大きくなり、振幅利得が -20dB 程度より小さくなると信号との区別が付きにくくなっている。前述したようにSNRの測定値は約25dBであったので、ノイズを平滑化したことも考慮すると周波数応答のSNRは更に悪くなっているといえる。さらに、ノイズだけでなくサーボモータ速度制御系の非線形特性も悪影響していると思われるが、今回の測定データからその影響を検討することは困難であった。

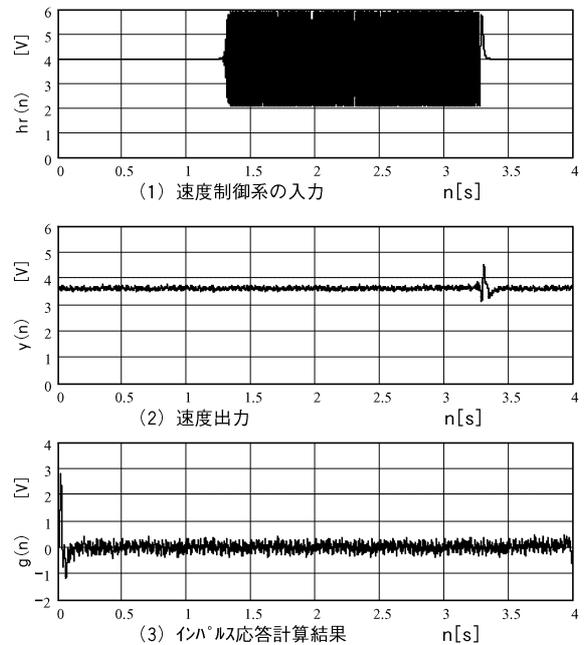


図7 サーボモータ速度制御系のインパルス応答

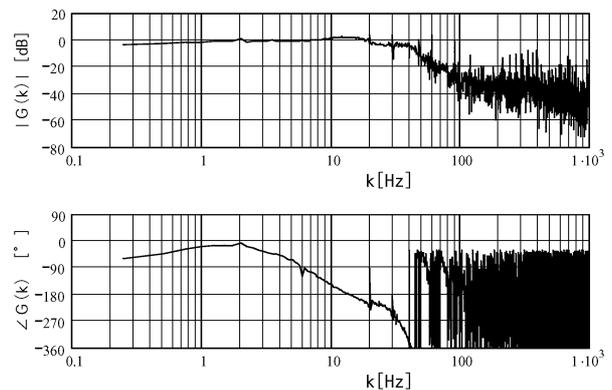


図8 サーボモータ速度制御系の周波数応答(周期平均)

以上のことから実験とは別に、TSPを用いたインパルス応答の測定に及ぼすノイズや非線形性の影響を、シミュレーションや電子回路の測定によって検討しておくことが必要と判断される。

4. あとがき

音響システムの分野で実用化されている、TSPを用いたインパルス応答の測定方法を用いて、LPFとサーボモータ速度制御系の周波数応答を測定した。LPFの測定結果は理論値と良くあった。LPFのようにほぼ理想的な線形系でかつノイズが少ないシステムでは、TSPを用いたインパルス応答の測定が有効であると判断される。

一方、今回の実験で用いたサーボモータ速度制御系は、加速トルクと減速トルクが異なるという非線形系で、さらにギアやカップリングの回転ムラに起因したノイズも無視できないシステムであった。この場合は、周波数応答の測定結果は、ノイズがSNRに及ぼす悪影響を差し引いても、満足できる測定結果は得られなかった。

今後は、TSPを用いたインパルス応答の測定に及ぼす非線形性やノイズの影響を、理論モデルや電子回路を用いたシミュレーションによって確かめておくことが必要であると判断された。

参考文献

- 1) N. Aoshima, "Computer-generated pulse signal applied for sound measurement", J. Acoust. Soc. Am. Vol.69, No.5, pp.1484-1488 (1981).
- 2) 青島伸治, "パーソナルコンピュータを利用した信号圧縮法によるパイプ内音場の測定", 日本音響学会誌, 40巻, 3号, pp.146-151 (1984).
- 3) 川浦淳一, 鈴木陽一, 曾根敏夫, 相馬次郎, "デジタル信号処理を用いた音響系の模擬法について", 日本音響学会誌, 42巻, 10号, pp.774-779 (1986).
- 4) 鈴木陽一, 浅野太, 曾根敏夫, "音響系の伝達関数の模擬をめぐって(その1)", 日本音響学会誌, 44巻, 12号, pp.936-942 (1988).
- 5) 鈴木陽一, 浅野太, 曾根敏夫, "音響系の伝達関数の模擬をめぐって(その2)", 日本音響学会誌, 45巻, 1号, pp.44-50 (1989).
- 6) 鈴木陽一, 浅野太, 金学胤, 曾根敏夫, "時間引き延ばしパルスの設計法に関する考察", 信学技法, EA92-86, pp.17-24 (1992-12).
- 7) Y. Suzuki, F. Asano, H. Y. Kim, T. Sone, "An optimum computer-generated pulse signal suitable for the measurement of very long impulse response", J. Acoust. Soc. Am. Vol.97, No.2. pp.1119-1123 (1995).
- 8) 浅野太, "TSPの概要", ホームページ, <http://asano.media-interaction.jp/English/doc/tsp/index.htm>
- 9) 近藤勝也, "TSPを用いた線形システムの周波数特性測定に関する調査", 奈良高専研究紀要, 39号, pp.73-78 (2003).
- 10) 技術資料, "計測・試験用フィルタアプリケーションノート", エヌエフ回路設計ブロック社, (2000-9).
- 11) 中村尚五, "ビギナーズデジタルフィルタ", 東京電機大学出版局, pp.88 (1989).
- 12) 加藤鉄平, "オーディオ用測定器と測定技術", 誠文堂新光社, pp.188 (1997).