

DSPによる信号処理システムの開発

電子システム工学専攻 高橋 義明

Development of Signal Processing System by Using DSP

Yoshiaki TAKAHASHI

Abstract: Aspectrum analyzer and a reverberation measurementsystem, which include a DSK card, RAM cards, and 7-segment display unit, were developed. Evaluations were performed to show (a) the spectrum analyzer, applied to piano tone analysis, calculates proper spectrum, and that (b) the reverberation measurement system displays proper reverberation decay time by compairing it to the decay time calculated by a personal computer. The system was applied to room reverberation measurement to reveal that material of wall, capacity of the room, and measuring position in the room can affect the reverberation decay time.

keywords: DSP, Spectrum analyzer, Reverberation decay time

1. 緒 言

DSP スタートキット¹⁾は、高速な DSP により、容易にデジタル信号処理を行うことのできる安価な装置である。本研究では、DSP スタートキットに自作の拡張 RAM ボード及び 7 セグメント LED 表示器の増設を行い、システムの開発を行った。開発したシステムは、パワースペクトル及び Wigner 分布を計算し、オシロスコープに出力するスペクトルアナライザと、室内の残響時間を 7 セグメント表示器に出力する残響計測システムである。両システムについて開発報告と検討を行う。

2. システム構成

開発したシステムは Fig.1 に示す様に、市販の DSK (DMS320C3x DSP Starter Kit) と自作の拡張 RAM ボード、7 セグメント LED 表示器から構成されている。今回開発したシステムでは拡張 RAM ボードを 2 枚使用した。

拡張 RAM ボードと 7 セグメント表示器が共に利用できるよう、Address 信号 2 本 (A15 及び A19) と Control 信号 1 本 (STRB*) をデコードしている。

3. アルゴリズム

3.1 スペクトルアナライザ

高速 Fourier 変換 (FFT) は、離散 Fourier 変換 (DFT) の回転因子 W の周期性を利用して高

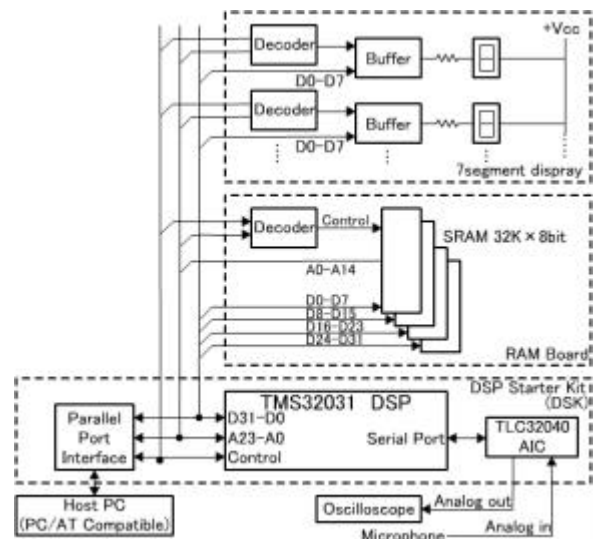


Fig.1 System diagram

速に Fourier スペクトル $X(i)$ を計算する手法である²⁾。信号の対数パワースペクトルは

$$P_F(i) = 10 \log_{10} |X(i)|^2 \quad (1)$$

によって計算できる。FFT に先だて、Hanning 窓を用いる。FFT は基数 2 の時間間引きアルゴリズムを用いた。拡張 RAM ボードを 2 枚搭載することにより、 $N=16384$ までのパワースペクトルを求めることができる。

Wigner 分布は

$$Wx(t,i) = \sum_{\tau=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} x(t+\frac{\tau}{2}) \cdot x^*(t-\frac{\tau}{2}) \cdot w(\tau) e^{-j2\pi f\tau} \quad (2)$$

で与えられる。ここで、アスタリスク (*) は複

素共役を表す。窓関数 $w(\cdot)$ には Hanning 窓を用いる。(2)式の被 Fourier 変換部分は に関して原点对称であるから、得られる $W(t,i)$ は必ず実数になる。そこで、信号のパワーを

$$P_w(i) = 10 \log_{10} |W_x(t,i)| \quad (3)$$

で計算し、これを時刻 t における瞬時的なパワーと考える。Wigner 分布の計算アルゴリズム³⁾では(2)式の被 Fourier 変換部の計算を行った後に、FFT を実行して毎回の分布を計算している。拡張 RAM ボードを 2 枚搭載することにより、データ長は $N=16384$ までの計算ができる。Wigner 分布で得られる周波数成分の上限はナイキスト周波数の半分であるが、周波数分解能は FFT によって得られる周波数分解能の 2 倍となる。

3.2 残響計測システム

残響時間は、音が部屋に定常的に行き渡った状態で、音を断ってから音圧が -60 [dB] まで減衰するのに要する時間と定義される。

Schroeder⁴⁾は、残響曲線の集合平均 $\langle s^2(t) \rangle$ が、インパルス応答 $h(t)$ を用いて計算できることを示した。この方法を用いて残響曲線を得る方法が Schroeder 法である。しかし、積分区間が t から無限大であるため、リアルタイムに計算することは難しい。そのため、次式のように 2 つの項にわけて計算を行う。

$$\langle s^2(t) \rangle = \int_0^t h^2(t) dt - \int_0^t h^2(t) dt \quad (4)$$

残響時間の自動算出には、最小二乗法を用いた。残響曲線の傾きを一次関数として求め、それにより残響時間を算出している。

4. 実行結果

4.1 スペクトルアナライザ

開発したスペクトルアナライザを用いてピアノ音の測定を行った⁵⁾。測定音は C3 から C5 までの 15 音である。サンプリング周波数を $f_s=10.01$ [kHz]、遮断周波数を $f_c=4.61$ [kHz] とした。同一周波数分解能による比較を行うために、FFT のデータ点数を 2048 点、Wigner 分布のデータ点数を 1024 点とした。得られた周波数スペクトルから各々の基本周波数成分を調べた結果を Table 1 に示す。表中で倍率は C3 を基準に記述してある。

4.2 残響計測システム

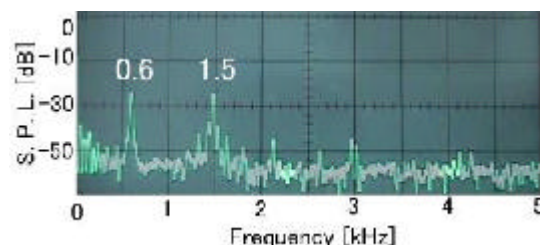
開発した残響計測システムを用いて室内の残響時間の測定を行った⁶⁾。サンプリング周

Table1 Fundamentalfrequencies of pianosound andtheirratios

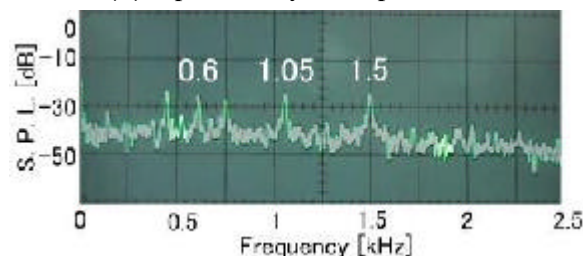
	Theoretical frequency ratio	FFT		W.D.	
		Freq. [Hz]	Ratio	Freq. [Hz]	Ratio
C3	1.000	127.14	1.000	127.14	1.000
D3	1.125	146.70	1.154	136.92	1.076
E3	1.250	166.26	1.301	156.48	1.230
F3	1.333	171.25	1.346	166.26	1.307
G3	1.500	190.71	1.500	195.60	1.538
A4	1.667	215.26	1.692	210.27	1.653
B4	1.875	244.50	1.923	239.61	1.884
C4	2.000	259.17	2.038	254.28	2.000
D4	2.250	278.73	2.192	283.62	2.192
E4	2.500	317.85	2.500	317.85	2.500
F4	2.667	337.41	2.654	337.41	2.654
G4	3.000	381.42	3.000	381.42	3.000
A4	3.333	430.32	3.385	435.21	3.423
B4	3.750	479.22	3.769	484.11	3.807
C5	4.000	508.56	4.000	513.45	4.038

Table2 Room capacity andreverberationtime

Room	Capacity of room [m ³]	Reverberation time [sec]
Anechoicchamber	10.8	0.032
Class room	229	0.259
Basementroom	1050	3.90
Lecturehall	760	0.573
Room with tatami	60	0.401
1st.gymnasium	9200	1.33



(a) Spectrum by 1024-point FFT



(b) Spectrum by 1024-point Wigner Distribution

Fig.2 Spectra of composedwave

波数を $f_s=10.01$ [kHz] とした。測定を行った場所は、電子棟教室、電子棟地下室、電気棟無

響室、第一体育館、図書館棟視聴覚室、図書館棟相談室の6カ所である。得られた平均残響時間及び部屋の室容量を Table 2 に示す。

5. 検討

5.1 スペクトルアナライザ

得られたスペクトルについて検討を行うために、0.6[kHz]と1.5[kHz]の正弦波を足しあわせた波形を開発したシステムに入力し、確認を行った。得られたスペクトルを Fig.2 に示す。FFT、Wigner 分布ともに入力成分と同じ周波数成分が現れていることが分かる。また、Wigner 分布については、入力成分以外の複数のピークが現れている。1.05[kHz]に着目してみれば、これは、入力信号の周波数の和の半分であり、このことから、クロス成分であると考えられる。このことより、FFT、Wigner 分布ともに理にかなった周波数スペクトルを表していると考えられる。

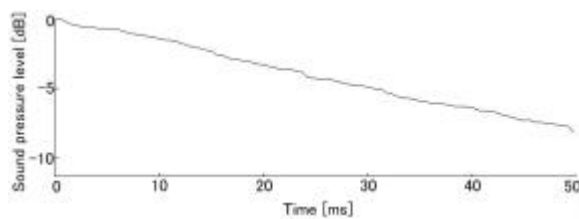
ピアノ音の測定を行った各波形において、部分音に対応した複数のピークが現れた。このことから、弦は基本周波数成分の単純な振動ではなく、部分音を含む振動をしていることがわかる。また、このピークが等間隔に現れていることから、ピアノの弦長の整数分の1に対応した振動モードが現れているものと考えられる。

FFT で得られた結果と Wigner 分布で得られたスペクトルの比較を行うと、部分音のピークの数が異なっていた。Wigner 分布においてピークが現れている間隔は、FFT で得られた結果の半分であった。そのため、ピークの数に違いが現れたのは、部分音同士によるクロス成分が現れた結果ではないかと考えられる。

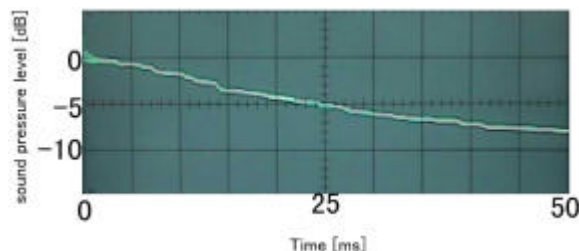
求められた周波数の値は Table1 に示した通りである。C3 と C4 の周波数が2倍に、C3 と C5 の周波数が4倍になっている。しかし、A4 は、調律基準の 440[Hz] でなければならないが、10[Hz]程のずれが生じている。これは、スペクトルの周波数分解能が 4.89[Hz] (出力時間にして 0.1[ms]) であることから、読みとり時に発生した誤差であると推測される。これはオシロスコープの時間レンジ等の調節により、誤差を小さくできると考えられる。

5.2 残響計測システム

得られた残響時間の値について検討を行うために、パソコン上で得られた残響曲線と、DSP で得られた残響曲線を比較した。データは視聴覚室のデータとした。パソコン上で得られた残響曲線と DSP で得られた残響曲線を Fig.3 に示す。



(a) Reverberation decaycurve bypersonalcomputer



(b) Reverberation decaycurve by DSP

Fig.3 Reverberation decay curves

× (source)	
PC:0.56	PC:0.55
DSP:0.44	DSP:0.39
PC:0.58	PC:0.52
DSP:0.54	DSP:0.49
PC:0.63	PC:0.64
DSP:0.58	DSP:0.60
PC:0.71	PC:0.69
DSP:0.64	DSP:0.62

(time [sec])

Fig.4 Reverberation timeatlecture hall

出力される波形に若干のずれが生じた理由として、DSP アナログの出力はスムージングフィルタを通してあげられる。しかし、減衰開始から 50[ms]までの音圧の減衰量は、パソコン上で得られた値が 7.4[dB]であり、DSP 上で得られた値が 7.6[dB]であった。これより、DSP 内部で計算された値はパソコンで得られる値とほぼ等しいと考えられる。従って、同時刻における減衰量はパソコンと DSP では近い値を示しており、同じ傾きの残響曲線が描かれていることが分かる。従って、DSP で得られた残響曲線を基に残響時間を算出することが可能であることが確認できた。

この DSP から得られた残響曲線の初期減衰の傾きを最小二乗法により求め、パソコンで得られた結果と比較してみると、Fig.4 の様に

なる。

各地点における残響時間には若干のずれが生じているが、これは、パソコン上で得られた波形から残響時間の算出を行っているためであると考えられる。しかし、全体の傾向を見てみると、右側の壁の方の残響時間は左の壁の方の残響時間に比べ長く、この結果はパソコン上で得られた値と、DSP で得られた値両方について言える。以上のことから、開発した残響計測システムは自動的に適切な残響曲線を求めていることが判明した。

視聴覚室の測定の結果、左右の壁付近の残響時間が異なった。これは、壁の材質が異なっていること、測定の際、カーテンを掛けたことに原因があると考えられる。また、これよりカーテン(布)の吸音率は、壁の吸音率より高いということが考えられる。また、部屋の中央部の残響時間は、壁際に比べ短いこともあげられる。このことから、壁際の場合、壁からの反射音の影響も受けるということも考えられる。以上のことから、部屋の残響時間は、部屋の容積と壁の材質などから決定されることが考えられる。

残響曲線は二段階減衰を行う場合がある。この場合、一段目と二段目の両方の残響時間を算出しなくてはならない。しかし、自動算出の場合、一組の 7 セグメント表示器に表示するの関係上、一段目の残響時間のみを表示した。一方、コンピュータによる残響測定場合、残響曲線から接線を引き残響時間を求めるという従来の方法を用いている。この接線を引くという行程は人の手によって行われるものであり、そのため、コンピュータによる計算と結果と自動算出の結果が異なると考えられる。

5.3 DSP を用いたシステムの検討

開発を行ったスペクトルアナライザは、出力機器がオシロスコープであるために、スペクトルが包絡線状になるという欠点があげられる。これは、開発したシステムの出力先が外部機器であり、この機器に依存してしまうからである。しかし、DSP を用いて開発を行ったスペクトルアナライザは安価であり、持ち運びが容易という特徴もあり、音響計測現場において測定を行う装置としては適していると考えられる。

このように開発したシステムは最終的な出力が外部機器に頼っている部分があり、それによる障害が少なからず発生する。しかし、7 セグメント表示器の取り付け等、ハードウェアの改良、システムの増強を行うことが可能である。また、使用状況によって、パソコン

のディスプレイ等を用いるなどの外部機器の選択、改良を行うことにより、開発したシステムはより使い易くなり、より精度の高いシステムになるものと考えられる。

プログラムは C 言語を用いて開発を行っているので、アルゴリズムの改良、設定の変更が容易である。残響曲線から残響時間の自動算出を行ったように、データの加工を行い、リアルタイムに結果を出力を行うシステムに改良を行うことが可能になると考えられる。

以上のことから DSP を用いて開発したシステムによれば、音響計測現場においてリアルタイムに計測を行える。また、ソフトウェアとハードウェアの改良によって、新たな計測システムに発展させることが可能である。

6. 結 言

市販の DSK にメモリ回路、7 セグメント表示器を増設することにより、DSP を用いた汎用性の高い信号処理システムの開発を行うことができた。

スペクトルアナライザは入力信号に含まれる周波数成分を良好にスペクトル表示していることを確認した。スペクトルアナライザを用いてピアノ音の測定を行った結果、ピアノの部分音がスペクトル上で等間隔に発生することがわかった。

残響計測システムは、得られた残響曲線を基に、残響時間を自動算出していることを確認した。残響時間の測定を行った結果、部屋の壁の材質などにより残響時間が変化すること、測定位置によっても残響時間が異なることがわかった。

参考文献

- 1) 日本 TI 株式会社: "TMS320C3x ユーザーズガイド," pp.4-9/B1-14(1997)
- 2) 森下、小畑: "信号処理," コロナ社, pp.75-83 (1983)
- 3) J. P. Janse and A. J. M. Kaiser: "Time-Frequency Distribution of Loudspeakers," J.Audio Eng. Soc., **31**, pp.198/223 (1983)
- 4) M. R. Schroeder: "New Method of Measuring Reverberation Time," The Acoustical Society of America, **37**, pp.409/412 (1965)
- 5) 高橋、前田、久保: "測定現場利用のための簡易スペクトルアナライザ," 第 39 回計測自動制御学会予稿集 CD-ROM, 109-D5 (2000)
- 6) 高橋、田所、久保: "DSP を用いたリアルタイム残響計測システムの開発," 第 38 回計測自動制御学会予稿集, pp.623/634 (1999)