

ウェーブレット変換を用いた心拍データの解析

～音楽観賞によるリラクゼーションを求めて～

森安 紀之†, 岩永 誠 ‡, 高橋 隆一†, 吉田 典可†

†広島市立大学 情報科学部 情報工学科 論理回路学講座

〒731-3194 広島市安佐南区大塚東 3-4-1

‡広島大学 総合科学部 人間行動研究講座

〒739-8521 東広島市鏡山 1-7-1

moriyasu@lcl.ce.hiroshima-cu.ac.jp, miwanag@ue.ipc.hiroshima-u.ac.jp

ryuichi@ce.hiroshima-cu.ac.jp, yoshida@ce.hiroshima-cu.ac.jp

あらかし ウェーブレット変換は時間的, 周波数的に局在した関数を核とする積分変換であり, 非定常的なデータ解析に有利である. 心拍データには体温性, 血圧性, 呼吸性の周波数成分が含まれる. このうち呼吸性変動は副交感神経の活動に, 血圧性の変動は交感神経の活動に対応していると考えられる. ウェーブレット変換でこれらを抽出したが, 呼吸性変動と音圧データとの間に相関は認められなかった. しかし, 陶酔していたと考えられる被験者では数回の鑑賞の間に呼吸性変動での相関が認められた. 同様な異なる被験者の間でも呼吸性変動に相関が認められた. このことから, 曲のどの部分で陶酔しているかを追跡できる見通しが得られたと考えられる.

キーワード ウェーブレット変換, スプライン関数, 心拍データ解析, 感性情報処理,
デジタル信号処理

Heart-rate Analysis using Wevelet Transform

～ Relaxation by Listening to One's Favorite Music ～

Noriyuki MORIYASU†, Makoto IWANAGA‡, Ryuichi TAKAHASHI†, Noriyoshi YOSHIDA†

†Faculty of Information Sciences, Hiroshima City Univ.

3-4-1 Ozukahigashi, Asaminami-ku, Hiroshima City, 731-3194 Japan

‡Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima Univ.

1-7-1 Kagamiyama, Higashihiroshima City 739-8521 Japan

abstract Wavelet transform is an integral transform. In this transform, we use wavelets on local supports as kernels which enable us to analyze unsteady data. Heart-rate has three spectral peaks related to body temperature, blood pressure and respiration. The Respiratory Sinus Arrhythmia reflects the activity of the parasympathetic nervous system. Correlations are detected among the Wavelet transformation results only for the subjects whose data indicate conspicuous reactions tuned to this activity, when they are listening to the music. This result suggests that the Wavelet transform can pursuit the moments of intoxication by listening to one's favorite music.

keywords Wavelet transform, Spline functions, heart-rate analysis,
sensitivity information processing, digital signal processing

1 はじめに

近年、物質的な豊かさから精神的な豊かさが求められる時代に入って、人間の主観的な感覚を情報処理の研究対象として、人間と機械とのより良い関係を探ることを目的とした感性情報処理と呼ばれる研究領域が確立されつつある [1], [2].

いわゆる人工知能とよばれる研究は、人間が行なう情報処理のうち知性を模倣することをめざしていたのに対し、人間が行なう情報処理の別の側面である感性（感じ方）を扱う感性情報処理は、従来コンピュータの不得意とする分野だと考えられてきた。しかし、知性と感性のいずれもが人間の重要な特性である [3].

感性情報処理研究のひとつのアプローチとして、感覚器官に与えられる情報によって、脳波、心拍、皮膚電位、呼吸といった生理指標に現われる変化を感性情報ととらえて、音楽などによる刺激と生理指標との関連を調べようとする試みが始まっている [3], [6]. いわゆる生理心理学 [4], [5] からのアプローチである。

非定常的な信号を解析するひとつの手段としてウェーブレット変換 [7], [8] が注目されている。フーリエ変換が周波数解析を得意とするのに対し、ウェーブレット変換では、時間周波数解析が可能となる。上野山らの研究では、非定常的なドラム音の解析が行なわれた [9].

感性情報そのものも非定常的だと考えられる。デジタル信号処理に応用を限定すればデータ駆動型マシン技術も容易に高い並列度を引き出し得ると期待される。筆者らは、すでにウェーブレット変換にデータ駆動型マシン技術を用いることを試みている [10].

筆者らは並行して感性情報処理への生理心理学からのアプローチとして心拍データの解析を試みた。心拍データをフーリエ変換にかけると、大きく分けて3つ成分が現われる。そのうち1つは呼吸性的の変動に対応しており、副交感神経の活動に対応していると考えられる [6]. 本稿では、心拍データをウェーブレット変換にかけることによって、この呼吸性変動の時間周波数解析を行ない、曲のどこに陶醉しているかが追跡できる見通しが得られたことを示す。

2 ウェーブレット変換

ここではウェーブレット変換とこれを用いた時間周波数解析 [7], [8] について概説する。

2.1 ウェーブレット

ウェーブレットとは時間的にも周波数的にも局在した関数である。フーリエ変換は三角関数を積分変換の核として用いるのに対し、ウェーブレット変換はこのウェーブレットを積分変換の核としてスケールとシフトを用いてもとの波形の特徴を調べる：

$$\phi(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} p_k \phi(2x - k) \quad (1)$$

はトゥー・スケール関係である。与えられた数列 $\{p_k\}$ に対して、式 (1) を満たす関数 $\phi(x)$ をスケール関数と言う。スケール関数を用いるとマザー・ウェーブレットが次式で定義される。

$$\psi(x) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} q_k \phi(2x - k) \quad (2)$$

関数 $f(x)$ のマザー・ウェーブレット $\psi(x)$ によるウェーブレット変換は次式で定義される：

$$(W_\psi f)(b, a) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) f(x) dx \quad (3)$$

ウェーブレット変換 $(W_\psi f)(2^{-j}k, 2^{-j})$ を $d_k^{(j)}$ と書き、離散化を行うことによって式 (3) から次の離散ウェーブレット変換が導かれる：

$$d_k^{(j)} = 2^j \int_{-\infty}^{\infty} \psi(2^j x - k) f(x) dx \quad (4)$$

逆ウェーブレット変換は次式で与えられる：

$$f(x) = \frac{1}{C_\psi} \int \int_{\mathbb{R}^2} (W_\psi f)(b, a) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \frac{dad b}{a^2} \quad (5)$$

式 (5) が成り立つためには、次の $\psi(x)$ がアドミッシブル条件：

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) dx = 0 \quad (6)$$

を満たす必要がある。この条件を満たすウェーブレットがマザー・ウェーブレットとして使用

できる。離散ウェーブレット逆変換は次式で与えられる:

$$f(x) \sim \sum_j \sum_k d_k^{(j)} \psi(2^j x - k) \quad (7)$$

2.2 多重解像度解析

スケーリング関数 ϕ が与えられると、それぞれのレベル $j \in \mathbb{Z}$ について $\{\phi(2^j - k)\}_{k \in \mathbb{Z}}$ の張る空間 V_j が決まる。任意の関数 $f_j \in V_j$ は次式で表される:

$$f_j(x) = \sum_k c_k^{(j)} \phi(2^j x - k) \quad (8)$$

上位レベルの関数 f_{j+1} と下位の関数 f_j との差分関数 g_j は次式で与えられる:

$$g_j(x) = \sum_k d_k^{(j)} \psi_H(2^j x - k) \quad (9)$$

信号の分解においては、次の分解アルゴリズムが使用される:

$$c_k^{(j-1)} = \sum_l a_{l-2k} c_l^{(j)} \quad (10)$$

$$d_k^{(j-1)} = \sum_l b_{l-2k} c_l^{(j)} \quad (11)$$

ウェーブレット変換によって得られる信号 f は階層構造を有する:

$$f_j(x) = f_{j-1}(x) + g_{j-1}(x) \quad (12)$$

これを再帰的に繰り返すことによって、 f_j は次式のように与えられる:

$$f_j(x) = g_{j-1}(x) + g_{j-2}(x) + \dots + g_{j-n}(x) + f_{j-n}(x) \quad (13)$$

レベル j の関数 f_j のレベルを 1 下げると解像度は半分になる。 $\{f_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$ が解像度の階層構造を持つことを多重解像度解析という。

2.3 時間周波数解析

信号 $f(x)$ を時間と周波数の両面からとらえることを時間周波数解析と言う。

一般に信号 $f(x)$ は時間軸に沿ってある点 \bar{x} を中心に幅 Δ_f の領域を占める。フーリエ変換 $\hat{f}(\omega)$ は周波数軸に沿ってある点 $\bar{\omega}$ を中心に幅

Δ_f の領域を占める。時間軸の幅 Δ_f と周波数軸の幅 Δ_f とを同時に小さくすることはできない。 Δ_f と Δ_f とは次の不等式を満たす:

$$\Delta_f \Delta_f \geq \frac{1}{2} \quad (14)$$

これを不確定性関係と言う [7],[8]。時間周波数解析はこの定理のため、窓の大きさに制限をうける。

ウェーブレット変換の場合、窓の時間幅は高周波成分を解析する場合には狭くなり、低周波成分を解析する場合には広がる。ウェーブレット変換は高周波成分と低周波成分を持つ波形解析に適している (図 1)。

時間周波数解析を行なう手法として他に短時間フーリエ変換がある。しかし短時間フーリエ変換は時間周波数の窓の幅が変化せず、相対的な周波数解像度が異なってしまうため、時間周波数解析には適さない (図 2)。

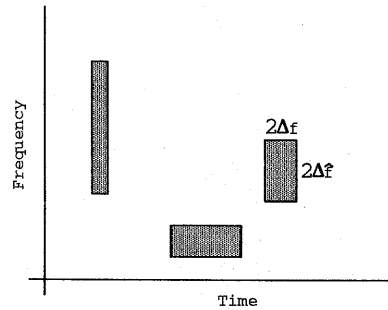


図 1. ウェーブレット変換による解析

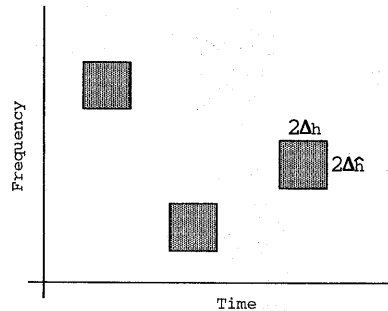


図 2. 短時間フーリエ変換による解析

短時間フーリエ変換では積分変換の核 $w(x-b)e^{-i\omega x}$ が基底関数とならないため、分解して得られた信号から元の信号を完全に再構成することができないという欠点もある。

2.4 スプライン関数

スプライン関数は多項式の自然な拡張である [11].

本研究では m 階のカーディナル B スプライン N_m を用いている。これは空間 S_m の基底関数である [7]。 $N_1(x)$ は次式で定義される:

$$N_1(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x < 1 \\ 0, & \text{それ以外} \end{cases} \quad (15)$$

m 階 ($m-1$ 次) のカーディナル B スプライン N_m は

$$\begin{aligned} N_m(x) &= (N_{m-1} * N_1)(x) \quad (16) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} N_{m-1}(x-t)N_1(t)dt \\ &= \int_0^1 N_{m-1}(x-t)dt \end{aligned}$$

と再帰的に定義される。

m 階の B スプライン N_m は $m-1$ 次の B スプラインとも呼ばれる。

3 心拍データの周波数解析

3.1 心拍データの測定方法

無作為に選んだ女性 7 人を対象に音楽鑑賞時の心拍データを採取した。

心電図で R 波が現れた時点 $X_{(i)}$ とし msec 単位で記録した。 $X_{(i)} - X_{(i-1)}$ をとることで R-R 間隔が得られる。本稿では、この値を 2.00Hz でサンプリングし直すことで BPM データとした。本稿では、この BPM データを心拍データと呼ぶ:

$$BPM_{(i)} = 60000 / (X_{(i)} - X_{(i-1)}) \quad (17)$$

3.2 フーリエ変換による解析

心拍データをフーリエ変換にかけると 3 つの成分が認められる:

- 0.2-0.3Hz,
- 0.08Hz-0.1Hz,
- 0.05Hz 以下

副交感神経による陶酔は、0.2-0.3Hz の呼吸性の変動に現れるとされている。交感神経による興奮は、0.08-0.1Hz の血圧性の変動に現れるとされている。血圧性の変動には交感神経と副交感神経の両方が現れているとされているが、交感神経の占める割合が多い。

0.05Hz 以下の成分は体温性の変動に関係しているとされている。この変動は心拍データに対して非常に緩やかな変化であるので、音楽などの刺激への対応付けは難しいとされている [6]。以上を表 1 にまとめて示す。

表 1: 周波数成分と神経・変動の対応

周波数 (Hz)	変動	神経 (心拍)	状態
0.2-0.3	呼吸性	副交感 (抑制)	陶酔
0.08-0.1	血圧性	交感 (促進)	興奮
0.05 以下	体温性		

3 つの成分のうち 0.2-0.3Hz の呼吸性の変動に特に副交感神経の動きが見られ、ウェーブレット変換にかけると、曲のどの部分に陶酔しているかが追跡可能だと期待される。

4 心拍データの時間周波数解析

いく通りかのデータ解析を行なったが、本稿では特に、Stravinsky の「春の祭典」の「いにえの踊り」を被験者に聴かせた場合の心拍データを、2 階の B スプライン・ウェーブレットを核として解析した結果について述べる。

4.1 ウェーブレット変換の結果

図 3 に変換結果の例を示す。

解析対象はサンプリング周波数を 2.00Hz にして得た 5 分間の心拍データである。心拍データは音楽を各 4 回連続で聴かせた場合のもので、それらの始めの 3 回分の心拍データを解析の対象とした。抽出しようとする心拍の周波数は、副交感神経の変動を表すと考えられる呼吸性の変動である。0.2-0.3Hz の平均、0.25Hz を選んだ。

時間周波数解析の解像度は、一つ下のレベ

ルに行くごとに半分になるため、副交感神経を表示しようとする場合、心拍データのサンプリング周波数は2.00Hzのままで良い。変動は、レベル-2に現われる。

横軸は時間、縦軸は各レベルにおけるウェーブレット関数の係数を表す。レベル-1は0.5Hz、レベル-2は0.25Hzの周波数成分である。

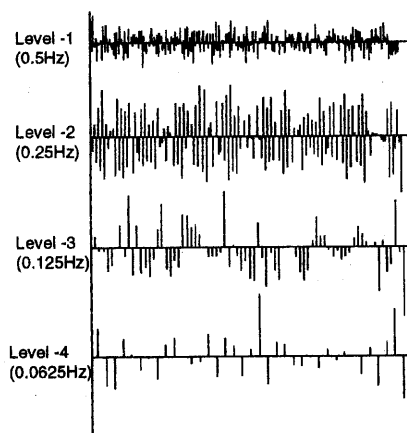


図3. ウェーブレット変換結果の例

4.2 副交感神経の活動

表2と表3にウェーブレット変換で得られた呼吸性変動と血圧性変動の平均を示す。

呼吸性の変動が多く現れる被験者ほど曲に対して陶酔していると考えられる。血圧性の変動が多く現れる被験者ほど曲に対して興奮していると考えられる。表2から呼吸性の変動が多く現れている被験者はAとD、表3から血圧性の変動が多く現れている被験者はCとFであることが分かる。

表2. 呼吸性変動の平均

被験者	1回目	2回目	3回目
A	3.705422	3.166184	3.376028
B	1.465209	1.514571	1.274791
C	3.140466	2.761451	2.559394
D	3.303059	3.193341	3.155076
E	2.774836	2.663956	3.059057
F	2.917899	2.947702	3.325774
G	2.232192	2.208617	2.646176

表3. 血圧性変動の平均

被験者	1回目	2回目	3回目
A	2.146431	2.049209	2.397310
B	0.969829	1.266880	1.332012
C	2.423402	3.014056	3.230932
D	2.436331	2.153549	2.197596
E	1.961158	1.800403	2.358701
F	2.966505	2.877427	3.265669
G	1.867883	1.835029	1.894911

呼吸性の変動と血圧性の変動の出方は4つの型に別れているといえる：

- Type 1** 血圧性の変動よりも呼吸性の変動が多く出ている被験者。
- Type 2** 血圧性の変動よりも呼吸性の変動が多いが、Type 1に比べるとどちらも値が小さい被験者。
- Type 3** 呼吸性の変動よりも血圧性の変動が多く出ることがある被験者。
- Type 4** どちらもあまり出ない被験者。

図4に上記の関係（類似性）を示す。

以上により、AとDの2人の被験者はStravinskyによく陶酔していたと考えられる。これは測定時の所見と一致している。

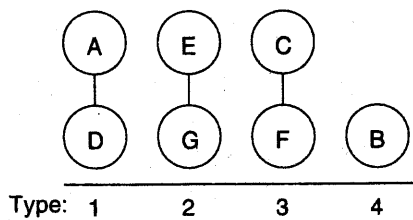


図4. 被験者同士の関係

以下では種々の相互相関を調べることで曲のどの部分で陶酔しているかを追跡可能かを調べる。相互相関解析に際しては、いずれのデータもガウス分布であると仮定して正規化した結果を用いた。

4.3 音圧データとの相互相関

図5に、よく陶酔していると考えられるAとDの2人について、音圧と呼吸性の変動の相互相関を調べた結果を示す。

横軸はずらした時間，縦軸はずらした時間における相関の比率を表している。単位時間は2秒である。図5の場合，音圧データを基準に呼吸性の変動を2秒ずつ時間が経過する方向にずらしている。線グラフの「A-1」や「D-2」は「被験者Aの1回目との相関」，「被験者Dの2回目との相関」を示している。

呼吸性の変動が良く現れている被験者AとD(Type 1)の場合でも，1回目～3回目までいずれも横ばいで相関は見あたらない。これは，大きな音や小さな音が副交感神経の活動に対して目だった影響を与えていないためだと考えられる。他の被験者についても調べたが同様の結果であった。

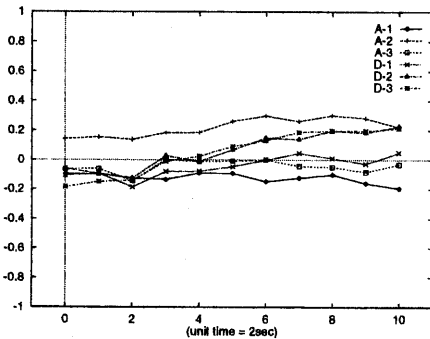


図5. 音圧データと被験者の相互相関

4.4 同一被験者での相互相関

音圧では相関が認められなかったため，同一被験者あるいは異なる被験者の異なる測定の間での呼吸性変動の相関を調べた。

図6と図7に同一被験者が同じ曲を繰り返し聴いた場合の呼吸性変動の間の相互相関を示す。折れ線グラフの「A(1<->2)」は「被験者Aの1回目と2回目の呼吸性変動の相互相関」である。時間の単位は2秒である。正の領域は2回目を時間が経過する方向にずらしたものの，負の領域は2回目を過去にずらした結果である。

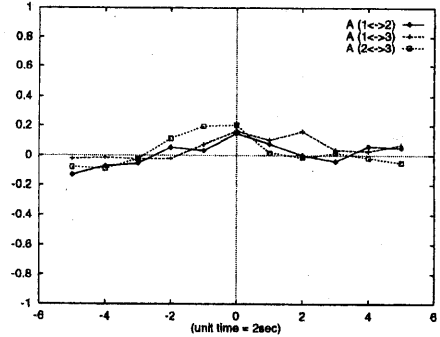


図6. 同一被験者での相互相関 (被験者A)

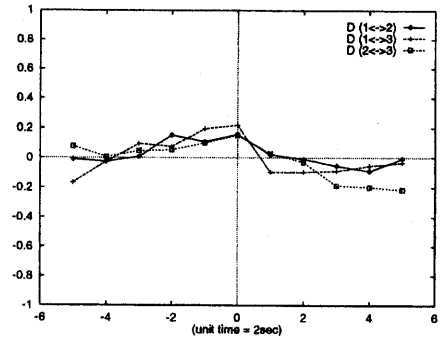


図7. 同一被験者での相互相関 (被験者D)

図6では，約0.21，図7では約0.22という値で0秒にピークが見られることは，陶酔した被験者 (Type 1) は2～3回鑑賞を行なっても，曲が流れるのにあわせて同じように陶酔していたことを表していると考えられる。陶酔していたとはいえない他の型 (Type 2～4) の被験者では相関は横ばいであったり2つのピークが現れるなどしていた。

4.5 異なる被験者での相互相関

同一被験者の1～3回の鑑賞時の呼吸性変動に相関が認められたため，異なる被験者ではどうかを次に調べた。

図8に異なる被験者での相互相関を示す。折れ線グラフの，具体的に「1(A<->B)」は「1回目の測定結果についての被験者AとBの呼吸性の変動の相互相関」であることを示している。ずらし方は同一被験者の場合と同様である。

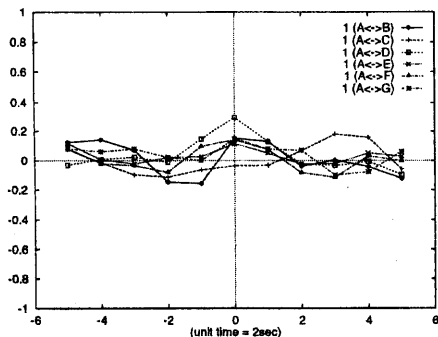


図8. 異なる被験者での相互相関

図8から、陶醉していた考えられるAとDの間に0秒で約0.3の相関があることがわかる。このことから、同じ曲をはじめて聴いて陶醉する被験者は異なる被験者の間でも、曲が進むにつれて、同じような陶醉の仕方をしているのではないかと想像される。

以上から、まず、陶醉していたと思われる被験者の場合は2～3回鑑賞を行なっても、同じような呼吸性の変動が認められたことから、ウェーブレット変換をかけ、呼吸性変動(0.25Hz)の成分を追うことで、曲のどこに陶醉しているかを追跡できる見通しが得られたと考えられる。

さらに、上記が正しいならば、呼吸性変動と血圧性変動が類似しており、呼吸性変動が良く現れていて陶醉したと考えられる異なる被験者の呼吸性変動にも相関が認められたことから、Stravinskyの場合は陶醉する被験者ならば、同じような陶醉の仕方をするところがあるのではないかと考えられる。

5 まとめ

本稿では、音楽鑑賞時に心拍データにウェーブレット変換をかけることによって曲のどこに陶醉してかが追跡可能だと考えられるという解析結果を示した。

今回の実験では、周波数分解能の高い4階のスプライン関数よりも、2階のスプライン関数の方がむしろ相関がよりはっきり現れるのではないかという結果も得られている。このことは、副交感神経の活動を追跡するにあたり、特定の周波数だけに絞り込みすぎることが必ずしも得策でないかもしれないことを示唆している。しかし、今回の実験では、測定時に十

分なインタビューを行なっていない。

より詳細かつ多角的な測定と解析が今後の課題である。

ウェーブレット変換を用いた研究を始めるにあたり、上野山 努様はじめ、慶應義塾大学理工学部の小沢慎治教授の研究室の関係各位に有益な助言をいただいた。ここに感謝します。

本研究の一部は、広島市立大学平成9年度特定研究「アフリカの音象徴性に関するデジタル感性情報処理的研究」(塚田健一教授代表)によるものである。

参考文献

- [1] 笠原 裕: "感性のあるコンピュータ", コンピュータロール No.37, pp. 82-87 コロナ社 (1992)
- [2] 方寄晴弘: "コンピュータミュージック" コンピュータロール No.37, pp. 88-93 コロナ社 (1992)
- [3] 井口征士: "感性情報処理" 信学誌 vol.80, No.10, pp. 1007-1012 (1997)
- [4] 堀 忠雄, 齋藤 勇編: 脳生理心理学重要研究集 1～意識と行動～, 誠信書房 (1992)
- [5] 堀 忠雄, 齋藤 勇編: 脳生理心理学重要研究集 2～情報処理と行動～, 誠信書房 (1992)
- [6] Iwanaga M., Tsukamoto M.: "Effects of Excitatory and Sedative Music on Subjective and Physiological Relaxation," *Perceptual and Motor Skills*, 85, pp. 287-296, (1997).
- [7] 榊原 進: "ウェーブレットビギナーズガイド," 東京電機大学出版局 (1995).
- [8] Chui C.K., 桜井明, 新井努共訳: "ウェーブレット入門," 東京電機大学出版局 (1993).
- [9] 上野山 努, 櫻村雅章, 小沢慎治: "ドラム音の音色における感性情報と工学的パラメータとの対応付け", 日本音響学会誌, 49 卷 10 号, pp. 671-681 (1993)
- [10] 江島 崇, 菊地賀子, 高橋隆一, 吉田典可: ウェーブレット変換のためのスケーラブルなデータ駆動型マシンの一構成法, 第 56 回情処全大 2N-3 (1998)
- [11] 市田浩三, 吉本富士市: "スプライン関数とその応用", 教育出版 (1979)