智慧情報処理とそのディジタルオーディオへの応用に関する研究

寅市　和男
筑波大学　電子・情報工学系　教授

1．まえがき

生命の仕組みの解明ならびに健康を保つ方法の研究には未知の部分が多く、21世紀における科学の主題になり得る資格がある。そして、情報科学は、生命の仕組みを解明する生理学と健康を保つ臨床とを推進するための大切な道具となる。従って、21世紀の若者に与えられた夢のある研究テーマそのものが生体情報論であるといっても過言ではない。

生体情報を取り扱う際の困難な点として、生体現象は、時々刻々と変化し、物理現象と異なって再現性を持たないことである。このことは、物理現象の記述のために作られてきた従来の数学を用いて生体現象を解析することが困難であることを示している。物理学が数学に裏打ちされて科学としての真価を発揮したように、生体情報もそれを裏打ちする数学を必要としている。生命を科学するためには、従来の物理数学とは別な新しい数学の枠組みが必要となっている。我々は、それを智慧システム論と呼んでいる。智慧システムは、単なる知識情報処理ではない。知識をいくら重ねても智慧を生むことはできない。智慧とは幾つかの知識を活用して物事をうまく処理できる能力のことである。高度の情報処理を実行するには、知識が必要であるのではなくて、智慧こそが必要である。そのような情報処理のモデルを構築するために、大別すると次の２つのことが必要であり、その一つは、様々に変化する入・出力情報を適切に表現できる柔らかい関数からなる信号空間であり、もう一つは、情報処理機能を表現する作用素を柔らかくすることである。ここでは特に入・出力の表現を柔らかくすることを考えて得られた結果を論じることとする。筆者は、この柔らかい信号空間としてFluency函数と名付けた函数からなる信号空間を見いだした。そして、信号空間の上に柔らかい信号空間のモデルを構築しており、その有効性は、いくつかの実際問題への応用例において示されている。

本稿の前半では、この柔らかい信号空間モデルについて述べる。後半では、その実際問題への応用例を紹介する。

2．柔らかい信号処理

本章では、Fluency函数から成る信号空間における柔らかい信号処理モデルを示す。

Fourier級数による信号の近似・展開は、信号処理機能が微分・積分・定数倍の組合せによって与えられているときに、最適な形式となっている。しかしながら、信号処理機能が別な作用素の組合せによって与えられるとき、この形式は、不適当なものとなる。多様な信号処理機能に対応できる柔軟な信号空間の上に柔軟なモデルを構築することが望まれる。

函数近似において一番よく用いられるFourier級数の基本となっている指数函数は、無限回微分可能性を要求していると言えるが、現実に函数近似したい信号に対しては、有限回しか微分可能性を要求しないことの方が多い。このことに注意するならば、微分可能な回数を１つの指標と

して信号空間を類別することが柔らかい信号空間を構成するポイントとなり得る。

一例として、不連続点を一点でも含む波形が与えられたとき、そのFourierによる表現は無限の帯域を必要とする。このように、Fourierの帯域制限函数は、不連続波形に対して最悪の表現となる。この難点は、Fourierの指数函数が無限回微分可能であることに起因している。一方の極端な例として、無限回微分可能性という限定を課されたFourierの難点を解消する試みとして、不連続な階段状函数であるHaar函数（1910年）とWalsh函数（1923年）がある。これらの函数は、階段状波形に対する最適な表現を与えている。Haar函数系は、時間軸方向の拡大・縮小と平行移動について互いに近似である函数の集合であり、波形の局所的特徴を表現することに適した階層的構造を有している。Walsh函数は、Fourierの指数函数系に類似した高調波概念を持った階層的構造を有している。Fourierの帯域制限函数とHaar・Walshの階段状函数は、現実問題に現われる波形の両極端の場合となっているといえる。現実の波形に適する函数空間は、不連続と無限回微分可能という両極端の間に存在すると考えられる。そこで、筆者は、1966年以来、Haar函数・Walsh函数に代表される階段状函数空間とFourier帯域制限函数空間との間を埋める問題を検討してきた。それが1980年までに、連続微分可能性をパラメータとする一連の函数空間の系列として1つの解答を得た。

この函数空間は、矩形函数と任意の函数との畳込み結果が元の函数の連続微分可能性を1つ増加させるという事実に着目して、階段状函数に矩形函数を繰り返して畳込むことによって得られる一連の函数空間として定義される。この函数は、区分的多項式となっており、その次数は、畳込みの回数に一致している。これらは、Fluency函数空間と名付けられ、そのパラメータが1であるとき階段状函数空間に一致し、パラメータが無限大となる極限でFourierの帯域制限函数空間に一致する。Fluency理論は、波形がm回だけ微分可能であるとき、その波形に対する最適な表現をmに合わせて函数空間を決めるものである。そして、この空間を基本的に特徴付ける標本化定理とFourierの周波数（frequency）を一般化する高調波構造を与える意味をfluencyと名付け、それを表す正規直交函数系が求められた。それを図1に示す。この概念による帯域制限は、従来の周波数による帯域制限の一般化となっている。

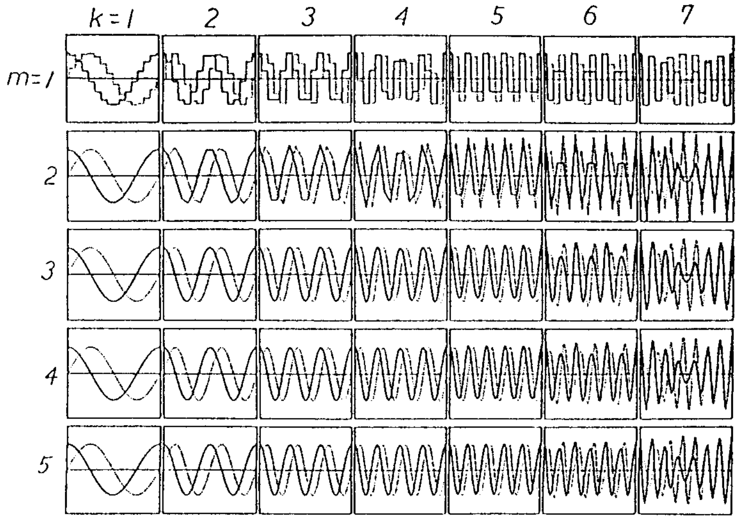

図1　Fluency函数の例

1980年代以降になって、これに近い考え方である階層的近似がwaveletとして発表された。波形の局所的な特徴を解析することを目的とした函数の展開形式としてWavelet（日本語では素波が適語であろう）という名称を与えたのは、J. Morletである。彼は、石油探査における断層を検出する際に必要な波形中の微分不可能な点の位置を抽出することを目的として、局所的な三角波形を時間軸方向に拡大・縮小および平行移動して得られる三角波形の集合を積分核として用いた。これらの三角波形は、函数空間の階層的構造についてHaar函数の延長上にあると解釈できる。

S. Mallatは、HaarやMorletの階層的構造を$L^2(R)$に対する階層的近似（multiresolution approximation）として一般的に定式化した。この定式化は、与えられる１つの函数（elementary wavelet, 基本素波）を出発点として、拡大・縮小と平行移動によって階層的な函数空間を構成する方法を示している。このwaveletの枠組みは、歴史的にいえば、Haar函数が有している階層的構造を一般的に述べたものとして捉えられる。S. Mallatによる階層的近似の数学的枠組みは、基本素波が与えられた時点を出発点としている。基本素波の代表例として、Haar函数を作り出す矩形函数やWhittakerのCardinal函数が示されているが、実際の応用に際して用いられるべき基本素波の系統的な選び方は、Wavelet解析の枠内では未だ得られていない。

Fluency函数は、Haar函数・Walsh函数などの階段状函数とFourierの帯域制限函数との間の一般化であるから、導出された時点で既に階層的近似としての構造を有している。そのため、Fluency函数空間は、連続微分可能性をパラメータとする階層的近似としてのwaveletの一般形となっているといえる。また、Fluency函数空間は、平行移動に重点をおいた階層的近似であるwaveletが有していない高調波構造を表す直交変換を備えているという意味でも、waveletの枠組みをより一般的に拡張したものとなっている。

従来のモデルとの違いとして捉えるならば、このFluency信号空間における信号処理モデルに従えば、伝達関数が有理多項式で記述され得ない時変型のフィルタをも構成できることである。

本章では、Fluency信号空間上に構成される柔らかい信号処理モデルを導入した。

3．フルーエンシ理論の応用例

本章では、Fluency理論で得られる一連の函数空間が実際問題で現われる波形に対して有効であることを示すために、Fluency理論の実際問題への適用例を紹介する。

Fluency理論の応用されている分野は、聴覚・回路網・窓関数・画像・医用信号・図形・文字認識などである。ここでは、聴覚と回路網ならびに画像圧縮に焦点を絞って述べる。

20kHzを越える超音波帯域における純音が人間に知覚されないという実験に基づいて、全ての超音波は、知覚される音色に影響しないと信じられている。しかし、聴覚特性は線形でないので、１つの超音波純音が知覚されなくとも、複数の超音波純音から成る複合音が知覚されないことを必ずしも意味するものではない。実際例として、周波数が40kHzと42kHzである２つの超音波純音から成る複合音から、それらの周波数の差である2kHzに対応するピッチが知覚できる。このピッチを知覚させる主たる原因の１つが、鼓膜における音響応答の非線形性にある。このことを我々は、解明した。そして、超音波成分と音色との関係を検討するために、音楽に含まれる超音波成分の振幅減衰速度という可変パラメータに従って変化する音色が心理物理的に評価された。この実験における一番の難点は、可聴域における振幅特性を、一定に保ち、位相特性を、全域に渡っ

て直線とし、超音波成分の振幅特性だけを可変にできるフィルターを構成することである。それをFluency理論におけるパラメータmを変化させせることによって実現することができた。音色は、歯切れ良さ・明るさ・騒々しさの3項目について被験者によって評価された。m=4の場合に最も明るく・歯切れ良い音楽が得られることを示した。このことは、Fourierの周波数による帯域制限が現実の信号の表現に適していないことの好例となっている。frequencyでの帯域制限でなくfluency(m=4)の意味での帯域制限が人間に知覚される音響波形の表現に適しているといえる。

fluency理論の回路網への応用の有効性は、frequencyの一般化であるfluencyの領域で回路設計することによって示される。その1例は、DA変換器(fluency DAC) に代表される。fluency DACは、現実の信号が時間軸上に存在するという原点に立って、周波数ではなくfluencyの領域で設計されている。このDACは、時間軸上での応答性に優れているという意味でwavelet DACと言うこともできる。そのため、標本化周波数44.1kHzのディジタル信号から22.05kHz以上の成分を作ることが可能となった。fluency DACは、既に商品化されており、それを搭載したCDプレーヤは、オーディオ界の各賞を受賞している。最近のDA変換方式において、fluency方式は、1-bit方式・oversampling方式に並んで、第3の方式として位置付けられつつある。

画像圧縮への応用を示す。画像は、部分ごとに著しく性質を変化させるので、その効率的な圧縮のために各部分での性質に適する函数近似が要求される。Fluency理論におけるパラメータmを画像の部分ごとの性質に適応させること、ならびに、各部分の表現に必要十分な次元数を推定することによって、効率的な圧縮が達成されている。HDTV相当の画質を保持するという条件下では、一般的な画像に対して1/15の圧縮比が達成されている。

4. むすび

本稿では、連続微分可能性をパラメータとして階段状函数と無限回微分可能な函数の間を結びつける一連の函数空間であるFluency函数空間がwavelet解析の一般化となっているばかりでなく、Fluency函数空間は、平行移動に重点をおいた階層的近似であるwavelet解析にも存在していない高調波構造を表す直交変換を備えていることを述べ、その実システムへの有効性も示した。

Fluency・wavelet解析の数学的道具立ては、当初においては、Hibert空間論の範囲で論じられるが、その本質的議論は、作用素代数の問題になっていくに違いない。そこから再び画像処理などへの決定的応用が出て来ることによって、音声・画像などに対する必須理論となることを念じている。

その時、始めて音声・画像情報処理が科学としての位置付けを得られるであろう。

謝辞

今回の、㈶高柳記念電子科学技術振興財団の多大な御支援に対しまして、財団理事長はじめ関係の皆様、そして日頃から御指導・御援助いただいております方々に、心より感謝申し上げます。

今後は、世界に誇れる日本独自の科学技術を開拓された高柳先生に続くことのできるよう、一層の精進を致したいと思います。

参考文献

〔1〕 K.TORAICHI, S.YANG, M.KAMADA, R.MORI and N.OTSU, A Microprocessor-based Left Ventricular Cineangiogram Analyser, Journal of Medical and Biological Engineering and Computing, Vol.25, pp.212-218, (March 1987).

〔2〕 K.TORAICHI, K.KATAGISHI and R.MORI, A Left Ventricular Function analyzer and its Application, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.BME-34, No.5, pp.317-328 (May 1987).

〔3〕 K.TORAICHI, K.KATAGISHI, I.SEKITA and R.MORI, Computational complexity of spline interpolation, International Journal of Systems Science, vol.18, No.5, pp.945-954, (May 1987).

〔4〕 I.SEKITA, K.TORAICHI, R.MORI, K.YAMAMOTO and H.YAMADA, Feature Extraction of Handwritten Japanese Characters by Spline Functions for Relaxation Matching, Pattern Recognition, Vol.21, No.1, pp.9-17 (Jan. 1988).

〔5〕 H.TAKEUCHI, K.TORAICHI, M.KAMADA, F.NAGASAKI and R.MORI, A Time Varying Spline Filter and its Application to the Left Ventricular Pressure Measurement, Medical & Biological Engineering & Computing, Vol.26, pp.88-91 (Jan. 1988).

〔6〕 M.KAMADA, K.TORAICHI, R.MORI, K.YAMAMOTO, and H.YAMADA, A Parallel Architecture for Relaxation Operation, Pattern Recognition, Vol.21, No.2, pp.175-181, (March 1988).

〔7〕 K.TORAICHI, S.YANG, M.KAMADA, R.MORI, Two-Dimensional Spline Interpolation for Image Reconstruction, Pattern Recognition, Vol.21, No.3, pp.275-284, (May 1988).

〔8〕 K.TORAICHI, I.SEKITA and R.MORI, An Algorithm by Hybrid Splines, Internaional Journal of Systems Science, Vol.19, No.8, pp.1547-1557, (August 1988).

〔9〕 M.KAMADA, K.TORAICHI and R.MORI, Periodic Spline Orthonormal Bases, Journal of Approximation Theory, Vol.55, No.1, pp.27-38, (Oct. 1988).

〔10〕 M.KAMADA, K.TORAICHI, R.MORI, Spline Function Approach to Digital Signal Processing, International Journal of Systems Science, Vol.19, No.12, pp.2473-2490 (Dec. 1988).

〔11〕 K.TORAICHI, M.KAMADA, S.ITAHASHI and R.MORI, Window Functions Obtained by Convolution Integrals of Rectangular Windows, International Journal of Systems Science, Vol.19, No.12, pp.2491-2506 (Dec. 1988).

〔12〕 K.TORAICHI, M.KAMADA, S.ITAHASHI and R.MORI, Window Functions Represented by B-spline Functions, IEEE Transactions on Acoustic, Speech, and Signal, Processing, Vol.37, No.1, pp.145-147 (Jan. 1989).

〔13〕 M.KAMADA, K.TORAICHI, Y.IKEBE, R.MORI, Orthonormal Basis for Spline Signal Spaces, International Journal of Systems Science, Vol.20, No.1, pp.157-170 (Jan. 1989).

〔14〕 Q.WANG, K.TORAICHI, M.KAMADA and R.MORI, Circuit Design of A D/A Converter Using Spline Functions, Signal Processing, Vol.16, No.3, pp.279-288 (March 1989).

〔15〕 K. TORAICHI, M. KAMADA and R. MORI, A Quadratic Spline Function Generator, IEEE Transactions on Acoustic, Speech, and Signal Processing, Vol. 37, No. 4, pp. 534-544 (April 1989).
〔16〕 T. KUMAMOTO, K. TORAICHI, T. HORIUCHI, K. YAMAMOTO and H. YAMADA, On Speeding Candidate Selection in Handprinted Chinese Character Recognition, Pattern Recognition, Vol. 24, No. 8, pp. 793-799 (August 1991).
〔17〕 K. TORAICHI, T. HORIUSHI, K. YAMAMOTO and H. YAMADA, Computer recognition of handwritten Japanese characters by means of wisdom algorithms, IEE Electronics Letters, Vol. 28, No. 7, pp. 675-676 (March 1992).
〔18〕 M. IWAKI, R. ISHII and K. TORAICHI, Polynomial interpolation for Remez exchange method, IEE Electronics Letters, Vol. 28, No. 20, pp. 1900-1902 (October 1992).
〔19〕 K. Toraichi, N. Miki, J. Murakami, N. Nagai and C. Yoshimoto, The relation of the binary orthogonal matrix to the Fourier series, Proc. IEEE Int. Conf. Circuit System Theory, pp. 193-194 (1970).