

音計測の提案

新 誠一

東京大学大学院 情報理工学系研究科 システム情報学専攻

概要

RFID の将来像の一つとして、可搬型の計測装置を位置づける。そして、見るだけでなく聞くことに熟練者の技能が隠れている点に着目し、音を手軽にサンプリングし、それを解析することで暗黙知である技能を形式知化するための研究を行った。具体的には、IC レコーダで音をサンプリングし、wavelet 解析を行うことで形式知化するものである。ここでは、自動車における計測に力点を置いて、音計測の手法を明確にする。

1 はじめに

現在の日本の製造業は世界一のレベルである。それは、優秀な現場技術者に支えられてきたといっても過言ではない。実際、フォードの大量生産システムの欠点である誰が律速段階か分からないという問題をカンバンを使って明確化し、それをカイゼンするというトヨタ式または日本式と呼ばれる生産システムは現場の力によっている。

同様に、機器の異常検出や完成品のチェックなど熟練工に頼らざるを得ない問題も多い。加えて、日本の強みが高度な加工技術にあるのなら、それは五感で感じながら機器を操作する人間の能力抜きでは語れない。

円高などの影響を受けて日本が進めた自動化は無人工場をめざした。しかし、この路線は工場国外への流出を招いた。それだけでなく、設備を購入すれば高度な製品を作れるという意味で、日本の国力自体を病弊させた。

その反省から、無人から人への回帰が始まった。セル生産は人が製造の中心となる流れである。そして、人の能力を梃子にした国内の製造業活性化が望まれている。

しかしながら、日本は少子高齢化に向かっており、熟練者の後継者となる世代の人口が減少している。加えて、若年層は技術者に魅力を覚えない。これは理科離れという言葉に象徴できる。さらに、熟練者について修行を積むという昔ながらの伝授法も若年者を熟練化することの妨げになっている。

以上の観点から、本プロジェクトの Attentive Work Bench では作業者を補助する自動装置の開発研究を進めている。その中で RFID (Radio Frequency Identification) を使って人や物を認識し、機械のネットワークに組み込むことを提案している。

もともと、ID は出発点である。ID 自体を知能化することで、AWB を利用する技術者へ多様な支援を行うことができる。その一つとして、可搬型レコーダを使った音計測手法を提案している

1). ここでは、IC レコーダを用いたバイクのエンジン音解析を中心にすえて、この音解析手法の概要を紹介する。

3 バイクのエンジン音解析

熟練したメカニックなら、客がバイクを店先に乗り付けた音を聴いただけで、バイクの車種はるか不良箇所さえも言い当てるのが出来る。どうい特徴に注意して聴いているのか、軽く習って、その真似をしてみようとするのだがなかなか一朝一夕には拾得できる技術ではない。メカニック自身、この道ウン十年の技術をそう易々と伝授できるものだとも思っていないようである。

聴く人が聴けば分かるということは、バイクのエンジンが発する音にはそれだけの情報が含まれているということである。エンジン音に含まれる種々の情報の中から、バイクの車種や不良箇所の診断に有意な情報を抽出、判断するという一連の技術の流れを、音解析の観点から見てみたい。

3.1 時間周波数解析

たとえば音声データのような時系列信号の、時刻ごとの周波数の分布を調べる解析手法を時間-周波数解析という。エンジン音の周波数成分は広帯域にわたり、またその成分はエンジンの行程(爆発行程、吸気行程など)によって変動する。このように、時間によって周波数成分が変化する信号を解析するのに適しているのが時間-周波数解析である。

ここでは、時間-周波数解析の代表的手法とし

て従来用いられてきた短時間フーリエ変換と、その長所は生かしつつ短所を解決した新しい手法であるウェーブレット変換 2-3) について、理論的な側面から紹介する。

3.1.1 短時間フーリエ変換

従来、時間-周波数解析に用いられてきた手法が短時間フーリエ変換(STFT, Short Time Fourier Transform)である。

いま、時系列信号 $x(t)$ のフーリエ変換は次式で定義される。

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega t} x(t) dt \quad (1)$$

ここで、 $|X(\omega)|$ はパワースペクトルと呼ばれ、 $x(t)$ が持つ周波数成分の分布を表す。しかし、フーリエ変換では、その信号が「どのような周波数を持った成分からなっているのか」を知ることは出来ても、「その周波数をもつ成分がどの時刻に存在したか」を知ることは出来ない。これは、フーリエ変換の基底となる $e^{j\omega t}$ がすべての時間に広がりを持つ関数であることに起因する。このため $X(\omega)$ から元々の信号の時間方向の情報は全くわからない。

そこで、元信号から一部分を切り出し、この部分に対してフーリエ変換をかける。なお、切り出しの際には窓関数 $w(t)$ (window function) を乗じる。そして、切り出す部分、すなわち窓関数を乗じる部分を一定時間ずつシフトさせながら繰り返しこの処理を行うことで、解析対象信号 $x(t)$ のもつ時間情報を保持しつつ周波数解析ができる。

ここで、 b は時間に関するシフトパラメータである。また、窓関数 $w(t)$ としては一般にハミング関数、ハニング関数、ガウス関数などが用いられることが多い。

ところで、このように有限な長さの窓関数を用いると、時間分解能と周波数分解能の間にはトレードオフの関係が生じる。すなわち、時間分解能を上げようと窓関数の長さを短くすると、それにより対応する周波数の幅が広がってしまい周波数分解能が下がり、逆に周波数分解能を上げようと窓関数の長さを長くすると時間分解能が下がってしまう。これを信号と Fourier 変換の不確定性という。図 1 に短時間フーリエ変換における時間窓と周波数窓の関係を示す。

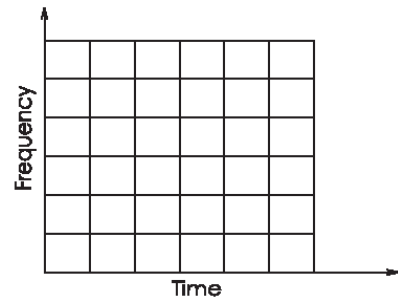


図 1. STFT における時間窓と周波数窓の関係

このように、短時間フーリエ変換では、一度選んだ時間窓の長さは固定であるため、対象信号がある時刻においてふるまう周波数と関係なく常に同じ時間周波数分解能で解析することしかできない。高周波の信号に対しては短い時間窓が、低周波の信号に対しては長い時間窓が適切であるということを考慮すれば、目的信号の周波数成分が広い範囲に分布している場合や、時間的に変化が激しいような信号の解析には、短時間フーリエ変換は不向きだといえる。

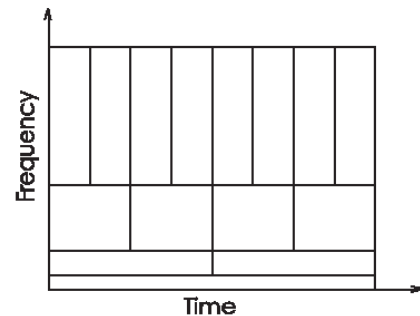


図 2. ウェーブレット変換における時間窓と周波数窓の関係

3.1.2 ウェーブレット変換

本研究で時間-周波数解析手法として用いているのはウェーブレット変換である。

ウェーブレット変換は、単位となる関数(ウェーブレット)と、それによって解析対象となる信号から切り出された部分との相関の高さの指標である。この基底関数としてのウェーブレットをマザーウェーブレットと呼ぶ。ウェーブレット変換は、解析対象となる信号 $s(t)$ と、マザーウェーブレット $g(t)$ によって、次式(2)によって定義される。

$$S(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} g^* \left(\frac{t-b}{a} \right) s(t) dt \quad (2)$$

ここで、 $g^*(t)$ は $g(t)$ の複素共役を意味している。マザーウェーブレットとしては、アドミッシブル条件を満たしている関数であればどんな関数でも使える。しかし実際の応用には、解析に都合のよい関数が選ばれる。

ウェーブレット $g((t-b)/a)$ はマザーウェーブレットを、 b だけトランスレート(平行移動)し、 a だけスケーリング(伸縮)したものである。スケールパラメータの逆数 $1/a$ は周波数と対応しているため、適当な a, b の組み合わせにより任意の周波数および時間における、解析信号との相関の高さが得られる。

3.2 実験

音診断の実際例の一つとして、今回はエンジンのシリンダ数を判定する。

バイクのエンジンとして、現在主流のシリンダ数は単気筒、2気筒、4気筒の三種類である。まず、アイドル状態にあるバイクのエンジン音を、図3.に示すようにICレコーダで録音した。

録音した信号の一例(DR125)、および、それをウェーブレット変換し、プロットしたものを図4.~図5.に示す。



図3. ICレコーダによる録音の様子

図4.のように、そのままでは解釈し難いエンジン音も、図5.のウェーブレット変換を見るといくつかの成分に分けて考えることができる。我々はこのうち、下(低音側)から二つ目に見える爆発音成分に着目し、次に示すような手法でシリンダ数の判定を行った。

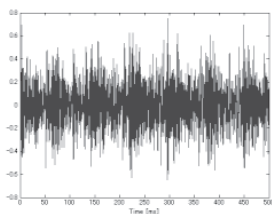


図4. 録音したエンジン音(横:時間,縦:変位)

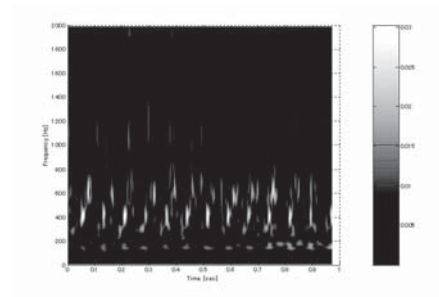


図5.エンジン音のウェーブレット変換(横:時間,縦:周波数)

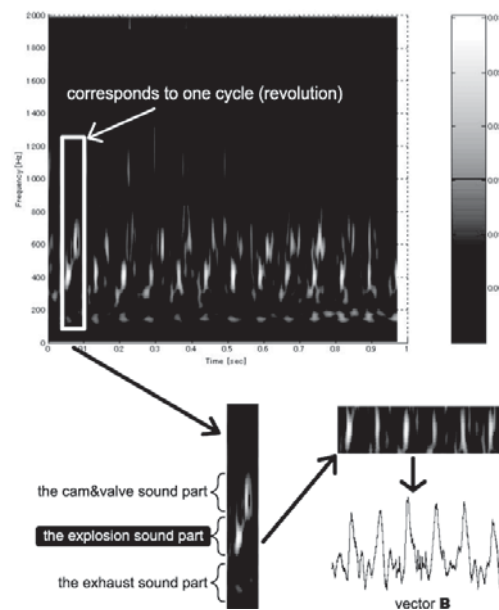


図6. シリンダ数判定の流れ

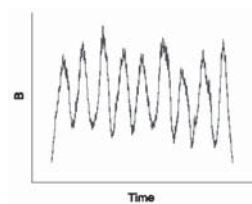


図7. ベクトル B の例

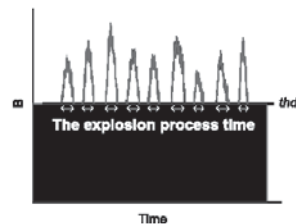


図8. 爆発行程にある時間の算出

3.2.1 判定の手法

図 6 に、手法の概要を示す。図中のベクトル \mathbf{B} は、次式により定義する。

$$c(b) = \max_{a \in [a_m, a_M]} |S(a, b)| \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = [c(1), c(2), \dots, c(n)] \quad (4)$$

$$n = T/\Delta T \quad (5)$$

ここで、 a_m と a_M は、それぞれ a の最小値と最大値であり、爆発音の分布する周波数帯域の上限と下限に対応する。また変数 T は判定に使用するデータの時間長さであり、 ΔT はサンプリング周期である。こうして得られたベクトル \mathbf{B} の例を図 7 に示す。ベクトル \mathbf{B} 全体の点数と、適当な閾値 thd を越えた点数の比が、爆発行程にある時間比となる(図 8)。ここで、爆発行程の時間比はシリンダ数に比例するので、シリンダ数を推定することができる。

3.3 結果

以上の手法を使い、表 1 に示す 13 車種について実験を行った結果、13 車種中の 12 車種についてシリンダ数の推定に成功した。

判定に成功しなかった車種は、単気筒のホンダ CBX125C という車種であったが、この車種は単気筒とはいうもののキャブレタ、吸排気管、マフラーが二つずつ装備されており、更に詳細な解析の結果爆発音が排気管で干渉を起こし二回聞こえていることが分かった。このような場合に対応するには、時間周波数平面上で反響音のみをカットするフィルタを考案する等の更なる手法の改善が必要である。

表 1. 実験に使用した車種

Model	Manufacturer	Cylinders	Cyl. Layout	Cooling	Displacement	Model Year
GPz900R	Kawasaki	4	InLine	Water	900cc	2002
CB400SF	HONDA	4	InLine	Water	400cc	2000
GSK250S	SUZUKI	4	InLine	Water	250cc	1991
FZS1000	YAMAHA	4	InLine	Water	1000cc	2001
F4S	MV AGUSTA	4	InLine	Water	750cc	2000
ZZ-R250	Kawasaki	2	Parallel	Water	250cc	1999
VT250J	HONDA	2	V-90	Water	250cc	1988
SV400S	SUZUKI	2	V-90	Water	400cc	1998
TL1000S	SUZUKI	2	V-90	Water	1000cc	1997
DL1000	SUZUKI	2	V-90	Water	1000cc	2002
CBX125C	HONDA	1	Single	Air	125cc	1987
DR125	SUZUKI	1	Single	Air	125cc	1993
XR250	HONDA	1	Single	Air	250cc	1995

4. 結論

熟練者の技術を自動化する一つの実例として、バイクのエンジン音からのシリンダ数の判定を行い、その自動化を実現した。また、可視化した

情報を更に活用すればより厳密な判定も可能であると思われる。

4. 参考文献

- 1) M. Suido, S. Shin, and T. Tabaru, Sound Measuring of Motorcycle Engine with Wavelet Analysis, Advanced Robust and Adaptive Control Theory and Application (D. Cheng, Y. Sun, T. Shen, and H. Ohmori Ed.), Tsinghua University Press 2005, pp. 319-331
- 2)新・中野監訳, 図説ウェーブレット変換ハンドブック, 朝倉書店, (2005)
- 3)新・中野・田原監修, ウェーブレット解析の産業応用, 朝倉書店, (2005)