暗騒音下の対象音検出に対する振動計測からの確率的評価法†

— 階層型回帰モデルの導入と原理的一実験 —

太田 光雄*・西村 公伸**・吉野 信行***

A Stochastic Evaluation Method for the Detection of an Objective Sound under Contamination of Background Noise Based on the Vibration Measurement

— Introduction of Hierarchical Regressive Model and a Principal Experiment —

Mitsuo OHTA*, Kiminobu NISHIMURA** and Nobuyuki YOSHINO***

A new stochastic evaluation method of objective sound level fluctuation under a contamination of background noise is proposed through the vibration level measurement on the basis of a generalized regression analysis between sound and vibration level fluctuations.

Key Words: hierarchical regression model, vibration measurement, linear and non-linear correlation, noise evaluation

1. はじめに

近年、機械類の低騒音化や低振動化が進められており、種々の技術や対策が製品に施されて来ている。こうした機械類から発生する騒音を、特に実稼動環境下で評価しようとする場合、実際の工場内では多数の機械類が稼動して暗騒音が大きく混入しており、このような実環境下では、JIS による公知の暗騒音補正法¹⁾の適用は難しく、対象のみから発生する騒音を正しく評価することはとても困難となる。そこで、間接的にせよ、対象の機械に密着させた振動計測に基づいて騒音評価ができるなら、周囲暗騒音の存在に影響されない対象のみの騒音評価が原理的にも可能となる。さらに機械振動から床へ伝搬する固体音の評価においても何らかの対応が期待できる。一般に、振動に基づく音響放射の物理機構に基づく理論的解析は非常に困難であり、厳密には簡単な形状に対してのみ解析が行われている。^{2),3)}しかし、現場における実稼動下での機械の振動とそれから発する音との関係はきわめて複雑となり、暗騒音下で到底物理機構のみから理論的に評価することは不可能と思われる。

本研究では、機械振動とそれ起因する騒音間で、その物理機構よりは変動する各揺らぎ形態のほうの機能的側面に力点をおく。したがって両者の多様な変動間に潜在するさまざまな相互相関関係を、階層的に反映した入出力変動間での階層型一般回帰モデルの形態で機能的にいかにかきめ細かく見出すかに最初の関心をおく。そして、この非線形回帰モデルを

用いて振動レベルの計測から間接的に対象音のみのレベル変動が、特に暗騒音混入の激しい実稼動環境下でも確率評価できる一手法を原理的実験のもとに提案する。具体的には、対象音のみのレベル分布へ目的志向型に対処できる非線形高次の階層型回帰モデルの型（通常なされるように、回帰モデルの型を予め人為的に固定しておかない）をば、線形はもちろん高次の非線形相関情報まで階層的に反映できる形でまず導出し、この回帰パラメータを未知として、通常の最小自乗誤差規範のもとに後から推定するのである。次に、通常なされるごとく、かく決定した回帰モデルを予測への変換式として採用せず、入力によるこのモデルの確率平均の形で理論的予測を行い、暗騒音に影響されぬ対象音のみのレベル分布予測を試みるのである。実験では、原理的確認のみを行うべく、一実例としてジグソーを採り上げ、振動レベル観測値をもとに対象音のみのレベル分布予測を具体的にに行った。

2. 理論的考察

2.1 振動一音間の一般化回帰分析法と騒音レベル分布予測（要約）

評価対象から計測される振動レベル x dB を入力とし、 x に起因して発生する騒音レベル y dB を出力とする振動一音響変換システムに着目する。今 x をもとに y の変動分布を評価することが目的であり、 x と y の同時結合確率密度関数 $P(x, y)$ を、 x と y の各平均と各分散をパラメータにもつ正規分布 $(P_0(x), P_0(y))$ の積を初項として予め次式で一般展開表示しておく^{4),5)}。

$$P(x, y) = P_0(x)P_0(y) \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{mn} \times \frac{1}{\sqrt{m!}} H_m \left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \right) \frac{1}{\sqrt{n!}} H_n \left(\frac{y - \mu_y}{\sigma_y} \right) \quad (1)$$

ただし、 A_{mn} は入出力間の低次および高次の各相関情報を逐次階層的に反映している。 y の条件付き確率密度関数 $P(y|x)$ は、ベイズの定理と (1) 式およびその周辺分布 $P(x)$ を用い

† 第 39 回自動制御連合講演会で発表 (1996・10)

* 近畿大学工学部 東広島市高屋うめの辺 1

** 近畿大学工学部 呉市広古新開 5-1-3

*** 広島県西部工業技術センター 呉市阿賀南 2-10-1

* Faculty of Engineering, Kinki University, Higashi-Hiroshima

** Faculty of Engineering, Kinki University, Kure

*** Industrial Technology Center, Hiroshima West, Kure
(Received December 16, 1996)

(Revised May 22, 1997)

て次式で算定できる：

$$P(y|x) = \frac{P(x,y)}{P(x)}$$

$$= P_0(y) \frac{\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{mn} \frac{H_m\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right) H_n\left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right)}{\sqrt{m!}\sqrt{n!}}}{\sum_{m=0}^{\infty} A_{m0} \frac{1}{\sqrt{m!}} H_m\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)} \quad (2)$$

これを x について期待操作することにより, x に起因する y の確率密度関数が次式で評価できる.

$$P(y) = \int P(y|x)P(x)dx$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} e^{-\frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{n!}} H_n\left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right) \times \left\langle \frac{\sum_{m=0}^{\infty} A_{mn} \frac{1}{\sqrt{m!}} H_m\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)}{\sum_{m=0}^{\infty} A_{m0} \frac{1}{\sqrt{m!}} H_m\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)} \right\rangle_x \right\} \quad (3)$$

2.2 非線形回帰モデルの階層の設定と最小自乗誤差規範に基づく回帰パラメータ A_{mn} の推定

研究目的は y の揺らぎ形態を統計的にできるだけ細かく予測することにある. この目的に志向させるため, 機能的にはまず y の多様な変動形態に着目し, 任意の ℓ 値 ($\ell=1, 2, \dots$) をべきにもつ y^ℓ と x との間で, 線形相関はもちろん各次の非線形相関量をも反映した高次の非線形回帰モデル:

$$\langle y^\ell | x \rangle = \int y^\ell P(y|x) dy$$

$$= \frac{\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\ell} C_{\ell n} A_{mn} \frac{1}{\sqrt{m!}} H_m\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)}{\sum_{m=0}^{\infty} A_{m0} \frac{1}{\sqrt{m!}} H_m\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)}$$

$$(\triangleq f_\ell(x)) \quad (4)$$

を設立する. ここで, $C_{\ell i}$ は, $y^\ell = \sum_{i=0}^{\ell} C_{\ell i} H_i\left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right)$ を予め満たす直交展開の各係数である. また, 各 A_{mn} ($m \neq 0, n \neq 0$) は回帰パラメータの位置を占め, 互いの揺らぎ形態における各種の相互相関情報を階層的に反映している. $m=0$ または $n=0$ の A_{mn} はそれぞれ x または y 個々の低次および高次統計量であり, 事前にそれぞれ個別的に算定しておくことができるし, 未知として A_{mn} ($m \neq 0, n \neq 0$) と共に後から推定することも可能である. ここでは, 観測値 x, y^ℓ と回帰モデルに基づく推定値 $f_\ell(x)$ との間に生じる誤差の自乗平均

$$\langle \varepsilon_\ell^2 \rangle \triangleq \langle (y^\ell - f_\ell(x))^2 \rangle \quad (5)$$

が $A_{j\ell}$ ($j=1, 2, \dots$) について最小となるよう, 公知の最小自乗誤差規範を導入して各回帰パラメータ A_{mn} を推定する.

3. 実験的考察

本速報では, 本手法の有効性をまず原理的に確認するため, 騒音評価の実対象として暗騒音混入の実稼動環境下において様相の変化するジグソーを採り上げ, 振動計測を通しての一騒音評価を試みる. ジグソー筐体の振動レベルと 1 m 離れた点での騒音レベルを測定した. サンプルング間隔は 1 秒とし, 観測時間は 200 秒とした. 前半 100 個のデータを用い, (4) 式に基づいて回帰パラメータ A_{mn} を推定した. (4) 式で, $\ell=1$ に対し, 展開項数 m を 1, 2, 5 とした場合の回帰曲線と実測値の散布図を Fig. 1 に示す. また, 後半 100 個の振動データを用い, (3) 式に基づいて予測した騒音レベルの累積確率分布 ($Q(Y) \triangleq \int_{-\infty}^Y P(y) dy$) と実測値との比較の一例のみを Fig. 2 に示す. Fig. 2 では, (3) 式の n の上

Fig. 1 A comparison between the scatter diagram and extended type regression curves on vibration and noise levels.

Fig. 2 A comparison between prediction curves and experimental points for a cumulative distribution of objective noise level.

限を2とし、 m の上限を0と4に採ってその傾向の原則的
一確認を行った。

4. 結 言

本速報では、まず任意の物体振動とそれに起因して発生する騒音の多様な各変動形態間における互いの複雑な相互関連性に着目した。そして、これが到底物理的メカニズムのみから把握することが困難なゆえに、揺らぎ変動形態の機能的側面のほうに考察の焦点をおき、互いの揺らぎ間における線形相関はもちろん、階層的に高次相関情報まで活用した非線形回帰型の機能的なシステムモデルを見出した。ついで、この回帰モデル出力に対し、異種入力での期待値操作による予測手法を採用し、結局、振動レベル観測のもと、激しい暗騒音の影響を受けることなく対象のみの騒音レベル分布がかなり評価できる確率的一手法を提案したのである（従来の暗騒音対策は、対象信号と同一音響分野で様々な信号処理上の工夫を試みている）。また、ジグソーの騒音を採り上げ、原理的確認のみに留まるが、振動レベル観測を通して騒音レベル分布評価を行い、実験的立場からも一検証を加えた。今後の課題として、他の機械類への適用、振動ピックアップの配置、AIC 規範などに基づく最適な展開項数の選定、機能的な各種相関量の実態的背景、他の波動環境（光、音、電磁場）への適用性など、まだ多くの問題が残されている。

謝辞

本研究に多大の援助をいただいた岩下順一、小林俊孝、高坂太郎、清水淳一の各氏に感謝する。また、第39回自動制御連合講演会⁷⁾で御討論いただいた関係各位に深謝します。

参 考 文 献

- 1) JIS Z 8731 騒音レベル計測法, (1983)
- 2) 早坂, 吉川: 音響振動論 (通研叢書), 603/653, 丸善 KK (1974).
- 3) 早坂: 電気音響学 (岩波全書), 189/198, 岩波書店 (1979).
- 4) M. Ohta and T. Koizumi: General statistical treatment of response of nonlinear rectifying device to stationary random input, *IEEE Trans. IT*, IT-14, 595/598 (1968).
- 5) 太田, 生田, 高木: 情報欠損の少ない回帰分析の一試みと音環境への適用 — 分布予測への整合性 —. 日本音響学会誌, 44-11, 848/856 (1988).
- 6) M. Ohta and A. Ikuta: An acoustic signal processing for generalized regression analysis with reduced information loss based on data observed with an amplitude limitation. *ACUSTICA*, 81-2, 129/135 (1995).
- 7) 西村, 太田: 機械の低騒音化評価における階層型回帰分析法を活用した暗騒音下での計測理論と一実験, 第39回自動制御連合講演会前刷, 445/446 (1996).