State Estimation for Sound Environment System with Unknown Structure by Introducing Fuzzy Theory

Akira Ikuta Member (Prefectural University of Hiroshima, ikuta@pu-hiroshima.ac.jp)

Hisako Masuike Non-member (NTT DATA Chugoku, masuikeh@nttdata-chugoku.co.jp)

Mitsuo Ohta Non-member (Hiroshima University, Emeritus)

Keywords : fuzzy adaptive filter, sound environment system, unknown structure, state estimation

The actual sound environment system exhibits various types of linear and non-linear characteristics, and it often contains an unknown structure. Furthermore, the observation data in the sound environment system contain the fuzziness due to several causes. For example, the human psychological evaluation for loudness of sound can be judged by use of 7 scores: 1.very calm, 2.calm, 3.mostly calm, 4.little noisy, 5.noisy, 6.fairly noisy, 7.very noisy. However, each score is affected by the human subjectivity and the borders between two neighboring scores are vague. In this situation, in order to evaluate the objective sound environment system, it is desirable to estimate the waveform fluctuation of the specific signal based on the observed data with fuzziness. In this study, based on the fuzzy observations, a method for estimating adaptively the specific signal for sound environment systems with unknown structural characteristic is theoretically proposed.

Let x_k and y_k be the input and output signals at a discrete time k for a sound environment system. For example, for the psychological evaluation in sound environment, x_k and y_k denote respectively the physical sound level and human response quantity for it. Since the system characteristics are unknown, attention is focused on the conditional probability distribution function $P(x_k | y_k)$ reflecting all linear and nonlinear correlation between x_k and y_k . Furthermore, let z_k be the fuzzy observation obtained from y_k . For example, z_k expresses one of 7 scores for the loudness of sound, taking the individual and psychological situation into consideration for y_k . The fuzziness of z_k is characterized by the membership function $\mu_{z_k}(y_k)$:

$$\mu_{z_k}(y_k) = \exp\{-\alpha(y_k - z_k)^2\} \quad (1)$$

where $\alpha (> 0)$ is a parameter. Considering the correlation information between x_k and y_k as unknown parameter vector $\mathbf{a}_k$, a method to estimate x_k based on the fuzzy observation z_k is derived by applying two theories on probability measure of fuzzy events and moment statistics of fuzzy events to expansion series expressions of the conditional probability distribution function.

First, after focusing our attention on Bayes' theorem for the conditional probability distribution, by introducing probability measure of fuzzy events, the following expression can be derived.

$$P(x_k, \mathbf{a}_k | Z_k) = \frac{\int \mu_{z_k}(y_k) P(x_k, \mathbf{a}_k, y_k | Z_{k-1}) dy_k}{\int \mu_{z_k}(y_k) P(y_k | Z_{k-1}) dy_k} \quad (2)$$

where $Z_k (= \{z_1, z_2, \dots, z_k\})$ is a set of observation data up to time k . Based on Eq.(2), the recurrence algorithm for estimating an arbitrary polynomial type function of x_k and $\mathbf{a}_k$ can be derived.

Though the parameter α in Eq.(1) can be generally given based on the prior information (or, through trial and error), it can be regarded as unknown parameter and estimated simultaneously with the specific signal x_k and the parameter $\mathbf{a}_k$. After paying our attention to an expansion series expression on the conditional joint probability density function of x_k , $\mathbf{a}_k$ and α_k , by applying moment statistics of fuzzy events to the expansion coefficients, the estimate of an arbitrary polynomial function of x_k , $\mathbf{a}_k$ and α_k can be derived.

The effectiveness of the proposed theory is confirmed by applying it to the estimation of sound level based on the successive observation of the evaluation scores for the loudness of sound. One of the estimated results of the sound level is shown in Fig.1. The proposed method considering fuzzy theory estimates precisely the waveform of the sound level with rapidly changing fluctuation.

Fig. 1. Estimation results of the fluctuation waveform of the sound level based on the successive judgment on loudness scores

ファジィ理論の導入による構造未知の音環境システム に対する状態推定

正員 生田 顕* 非会員 益池 寿子**
非会員 太田 光雄***

State Estimation for Sound Environment System with Unknown Structure by Introducing Fuzzy Theory

Akira Ikuta*, Member, Hisako Masuike**, Non-member, Mitsuo Ohta***, Non-member

The actual sound environment system exhibits various types of linear and non-linear characteristics, and it often contains an unknown structure. Furthermore, the observations in the sound environment often contain fuzziness due to several causes. In this paper, a method for estimating the specific signal for sound environment system with unknown structure and fuzzy observation is proposed by introducing a fuzzy theory and a system model of the conditional probability type. The effectiveness of the proposed theoretical method is confirmed by applying it to the actual problem of the sound environment.

キーワード : ファジィ適応フィルタ, 音環境システム, 構造未知, 状態推定

Keywords : fuzzy adaptive filter, sound environment system, unknown structure, state estimation

1. はじめに

現実の音環境システムは、さまざまな要因が複雑に絡み合い、内部メカニズムを物理法則に基づきボトムアップの立場から把握することが困難か、またはシステム特性が全く未知な場合がしばしばである。しかも、観測される実際の入出力時系列データ間には、線形相関のみならず、高次の非線形相関情報までが確実に潜在している。

既発表では、従来の構造的解析法では系統的解析がかなり困難であった複雑・多様な実音環境システムに着目し、入出力に関する低次はもちろん高次の各種相関情報をも展開係数に反映させた級数展開表現による非線形のシステムモデルを提案した⁽¹⁾。さらに、このシステムモデルを活用した音環境計測における雑音対策法についても考察した⁽²⁾。提案したシステムモデルにおいて、基本情報となるのは、入出力変数に関する条件付確率密度関数であり、このうちに

入出力に関する線形・非線形のあらゆる相関情報が含まれている。

一方、実音環境における観測データは非ガウス型の複雑な変動分布を示し、しかも様々な要因により、しばしばあいまいさが混入してくる。例えば、音の大きさ（ラウドネス）に対する人間の主観性や計測における不確実性・信頼性の存在、さらに観測データのデジタル化に伴う量子化誤差など、様々なあいまいさが存在する。したがって、対象とする音環境を合理的に評価するためには、あいまいさを含むファジィ観測データから、刻々と変化する対象信号の変動波形を精密に推定することが基本となる。

以上の観点から、本研究では、あいまいさが混入したファジィ観測データに基づき、対象信号を推定するためのファジィ適応フィルタについて考察を行っている。具体的には、システム特性を一般に未知として捉えざるを得ない人間の応答系を含めた複雑な音環境システムに着目し、音の大きさに対する7段階での人間の心理評価(1.「非常に静か」～7.「非常に騒々しい」)⁽³⁾における主観性の存在⁽⁴⁾⁽⁵⁾など、あいまいさを含む観測値に配慮して、ファジィ観測データから対象信号の原変動波形を推定するための一手法を提案する。その際、対象信号と観測値との関連情報としては、既発表の条件付確率密度に関する級数展開表現⁽¹⁾を採用し、その展開係数を未知パラメータとみなすことにより対象信号と同時に推定する。

* 県立広島大学

〒734-8558 広島県広島市南区宇品東 1-1-71

Prefectural University of Hiroshima

1-1-71 Ujina-Higashi, Minami-ku, Hiroshima 734-8558

** NTT データ中国

〒732-0816 広島県広島市南区比治山本町 11-20

NTT DATA Chugoku

11-20 Hijiyama, Minami-ku, Hiroshima 732-0816

*** 広島大学名誉教授

〒732-0824 広島県広島市市場 1-7-10, 1105

Hiroshima University, Emeritus

1105, 1-7-10 Matoba, Hiroshima 732-0824

最後に、本質的にあいまいさの伴う音の大きさに対する心理評価値からでも、これに整合した関係本態論の定量的手法が何れかあれば、一逆問題として、もとの信号の瞬時レベル変動を刻々とかなり合理的に推定し得ることを、理論の設定とともにその有効性を実験的にも検証している。

2. 未知構造とファジィ観測の音環境システムに対する定式化

内部メカニズムに基づき、構造的立場からシステム特性を捉えることが困難か全く不可能な、複雑な音環境システムに着目する。現実の音環境における観測においては、たとえば音の大きさ（ラウドネス）に対する人間の主観性や計測における不確実性・信頼性の存在など、さまざまなあいまいさが存在する。このような構造未知の音環境システムに対し、時刻 k における入出力信号を、それぞれ x_k および y_k とする。たとえば音環境の心理評価において、 x_k は物理的な騒音レベルを、 y_k はそれに対する人間の反応を表す。 x_k と y_k との関係は複雑で、一般には未知として取り扱うことが必要となる。本研究では、両者の関係を条件付確率分布 $P(y_k | x_k)$ で捉えることにする。さらに、 y_k の観測の際に混入する、あいまいさを含んだファジィ観測値を z_k とする。たとえば z_k は、 y_k に対し音の大きさを音響心理学の分野で通常行われるように、7段階（1. 非常に静か、2. 静か、3. 大体静か、4. 少し騒々しい、5. 騒々しい、6. かなり騒々しい、7. 非常に騒々しい）で評価したときのラウドネス評価値を表す⁽³⁾。これらの隣接した2評価値間の境界はあいまいであり、しかも人間の主観に依存しており個人差も存在することから、あいまいさを含むファジィ観測値 z_k として捉える。本研究では、このあいまいさに対し次のメンバーシップ関数を導入する。

$$\mu_{z_k}(y_k) = \exp\{-\alpha(y_k - z_k)^2\} \quad (1)$$

ただし $\alpha (>0)$ はメンバーシップ関数の形状に関するパラメータである。

x_k 及び y_k に関する結合確率分布 $P(x_k, y_k)$ を、既発表と同様に⁽²⁾、それぞれの変数に関する周辺分布 $P(x_k)$ と $P(y_k)$ の積を基幹として直交級数展開することにより、次の条件付確率分布に対する級数展開表示が得られる。

$$P(y_k | x_k) = P(y_k) \sum_{r=0}^R \sum_{s=0}^S A_{rs} \theta_r^{(1)}(x_k) \theta_s^{(2)}(y_k) \quad (2)$$

$$A_{rs} \equiv \langle \theta_r^{(1)}(x_k) \theta_s^{(2)}(y_k) \rangle \quad (3)$$

ただし、 $\langle \rangle$ は平均操作を意味する。 x_k と y_k 間の線形・非線形の各種相関情報は、各展開係数 A_{rs} の内に階層的に反映されている。関数 $\theta_r^{(1)}(x_k)$ と $\theta_s^{(2)}(y_k)$ は、それぞれ $P(x_k)$ と $P(y_k)$ を重みとする正規直交関数で、シュミットの直交化法を用いて構成される⁽⁶⁾。(2)式はもともと無限級数表現であるが、現実には有限項数のみ利用可能であり、実用的には最初の数項のみの考慮で対応できることから有限展開表現 ($r \leq R, s \leq S$) を採用した。

本研究では、因果関係とは反対の逆問題として、ファジィ観測データ z_k に基づき未知の対象信号 x_k を推定するためのファジィ適応フィルタを提案する。ここで、対象とする音環境システムは未知対象信号および未知システム構造を含むことから、(3)式で定義される展開係数 A_{rs} はファジィ観測データ z_k に基づき推定することが必要である。したがって、展開係数 A_{rs} を次式のごとく未知パラメータ $\mathbf{a}$ とみなし、

$$\mathbf{a} \equiv (a_1, a_2, \dots, a_I) \equiv (\mathbf{a}_{(1)}, \mathbf{a}_{(2)}, \dots, \mathbf{a}_{(S)})$$

$$\mathbf{a}_{(s)} \equiv (A_{1s}, A_{2s}, \dots, A_{Rs}), (s=1, 2, \dots, S) \quad (4)$$

対象信号 x_k と同時推定するために、次の時不変なパラメータに関するシステム方程式を導入する。

$$\mathbf{a}_{k+1} = \mathbf{a}_k \quad (5)$$

$$(\mathbf{a}_k \equiv (a_{1,k}, a_{2,k}, \dots, a_{I,k}) \equiv (\mathbf{a}_{(1),k}, \mathbf{a}_{(2),k}, \dots, \mathbf{a}_{(S),k}))$$

ただし、 $I (= R \cdot S)$ は推定すべき展開係数の個数である。

一方、非ガウス型の変動を示す対象信号に対し、対象の時間的相関情報を基に、時間推移則が次のように設定される⁽⁶⁾。

$$x_{k+1} = Fx_k + Gu_k \quad (6)$$

ただし u_k は平均 0 で分散 σ_u^2 の白色雑音である。

3. ファジィ適応フィルタによる状態推定

〈3・1〉 ファジィ確率に基づく推定法の導出 ファジィ観測データ z_k の逐次摂取に基づき、対象信号 x_k を推定するためのファジィ適応フィルタを導出するにあたり、既発表⁽²⁾⁽⁶⁾と同様に、推定の基本原理である、逆確率としてのベイズ定理に着目する。ただし、パラメータ $\mathbf{a}_k$ も未知であるため、 x_k と $\mathbf{a}_k$ に関する条件付結合確率分布に着目する。

$$P(x_k, \mathbf{a}_k | Z_k) = \frac{P(x_k, \mathbf{a}_k, z_k | Z_{k-1})}{P(z_k | Z_{k-1})} \quad (7)$$

ここで、 $Z_k (= \{z_1, z_2, \dots, z_k\})$ は時刻 k までの観測値の集合である。(7)式の右辺にファジィ事象の確率⁽⁷⁾を適用した後、直交展開することにより、条件付確率密度関数 $P(x_k, \mathbf{a}_k | Z_k)$ は次のように変形される（ファジィ事象を含むベイズ確率）。

$$P(x_k, \mathbf{a}_k | Z_k) = \frac{\int \mu_{z_k}(y_k) P(x_k, \mathbf{a}_k, y_k | Z_{k-1}) dy_k}{\int \mu_{z_k}(y_k) P(y_k | Z_{k-1}) dy_k}$$

$$= \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{\mathbf{m}=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} B_{lmn} P_0(x_k | Z_{k-1}) P_0(\mathbf{a}_k | Z_{k-1})$$

$$\frac{\phi_l^{(1)}(x_k) \phi_{\mathbf{m}}^{(2)}(\mathbf{a}_k) I_n(z_k) / \sum_{n=0}^{\infty} B_{00n} I_n(z_k)}{\dots} \quad (8)$$

ただし

$$I_n(z_k) \equiv \int \mu_{z_k}(y_k) P_0(y_k | Z_{k-1}) \phi_n^{(3)}(y_k) dy_k \quad (9)$$

$$B_{lmn} \equiv \langle \phi_l^{(1)}(x_k) \phi_{\mathbf{m}}^{(2)}(\mathbf{a}_k) \phi_n^{(3)}(y_k) | Z_{k-1} \rangle \quad (10)$$

$$(\mathbf{m} \equiv (m_1, m_2, \dots, m_I))$$

である。関数 $\phi_l^{(1)}(x_k)$ 、 $\phi_{\mathbf{m}}^{(2)}(\mathbf{a}_k)$ 、 $\phi_n^{(3)}(y_k)$ は、それぞれの変数に対する基準分布 $P_0(x_k | Z_{k-1})$ 、 $P_0(\mathbf{a}_k | Z_{k-1})$ 、 $P_0(y_k | Z_{k-1})$ を重みとする正規直交多項式である。

(8)式を基に、 x_k および $\mathbf{a}_k$ に関する任意 $(L, \mathbf{M})$ 次多項式関数 $f_{L, \mathbf{M}}(x_k, \mathbf{a}_k)$ に対する推定式が次のごとく得られる。

$$\begin{aligned} \hat{f}_{L, \mathbf{M}}(x_k, \mathbf{a}_k) &\equiv \langle f_{L, \mathbf{M}}(x_k, \mathbf{a}_k) | Z_k \rangle \\ &= \frac{\sum_{l=0}^L \sum_{\mathbf{m}=0}^{\mathbf{M}} \sum_{n=0}^{\infty} C_{l\mathbf{m}}^{LM} B_{l\mathbf{m}n} I_n(z_k)}{\sum_{n=0}^{\infty} B_{00n} I_n(z_k)} \quad \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

ここで $C_{l\mathbf{m}}^{LM}$ は次式を満足する係数である。

$$f_{L, \mathbf{M}}(x_k, \mathbf{a}_k) = \sum_{l=0}^L \sum_{\mathbf{m}=0}^{\mathbf{M}} C_{l\mathbf{m}}^{LM} \varphi_l^{(1)}(x_k) \varphi_{\mathbf{m}}^{(2)}(\mathbf{a}_k) \quad \dots\dots\dots (12)$$

以上の一般理論を具体化するため、規準分布 $P_0(x_k | Z_{k-1})$, $P_0(\mathbf{a}_k | Z_{k-1})$, $P_0(y_k | Z_{k-1})$ として、公知の標準的なガウス分布を採用する。

$$\begin{aligned} P_0(x_k | Z_{k-1}) &= N(x_k; x_k^*, \Gamma_{x_k}) \\ P_0(\mathbf{a}_k | Z_{k-1}) &= \prod_{i=1}^I N(a_{i,k}; a_{i,k}^*, \Gamma_{a_{i,k}}) \\ P_0(y_k | Z_{k-1}) &= N(y_k; y_k^*, \Omega_k) \quad \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

ただし

$$\begin{aligned} N(x; \mu, \sigma^2) &\equiv \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \\ x_k^* &\equiv \langle x_k | Z_{k-1} \rangle, \quad \Gamma_{x_k} \equiv \langle (x_k - x_k^*)^2 | Z_{k-1} \rangle \\ a_{i,k}^* &\equiv \langle a_{i,k} | Z_{k-1} \rangle, \quad \Gamma_{a_{i,k}} \equiv \langle (a_{i,k} - a_{i,k}^*)^2 | Z_{k-1} \rangle \\ y_k^* &\equiv \langle y_k | Z_{k-1} \rangle, \quad \Omega_k \equiv \langle (y_k - y_k^*)^2 | Z_{k-1} \rangle \\ &\dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

で定義される。したがって、(13)式を重みとする各直交多項式はエルミート多項式で与えられる⁽⁸⁾：

$$\begin{aligned} \varphi_l^{(1)}(x_k) &= \frac{1}{\sqrt{l!}} H_l\left(\frac{x_k - x_k^*}{\sqrt{\Gamma_{x_k}}}\right) \\ \varphi_{\mathbf{m}}^{(2)}(\mathbf{a}_k) &= \prod_{i=1}^I \frac{1}{\sqrt{m_i!}} H_{m_i}\left(\frac{a_{i,k} - a_{i,k}^*}{\sqrt{\Gamma_{a_{i,k}}}}\right) \\ \varphi_n^{(3)}(y_k) &= \frac{1}{\sqrt{n!}} H_n\left(\frac{y_k - y_k^*}{\sqrt{\Omega_k}}\right) \quad \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

(1)(13)(15)式を考慮することにより、(9)式は次のように具体化される。

$$\begin{aligned} I_n(z_k) &= \frac{e^{K_3(z_k)}}{\sqrt{2K_1\Omega_k}} \int \frac{1}{\sqrt{\pi/K_1}} \exp\left\{-\frac{(y_k - K_2(z_k))^2}{1/K_1}\right\} \\ &\quad \cdot \frac{1}{\sqrt{n!}} \sum_{r=0}^n d_{nr} H_r\left(\frac{y_k - K_2(z_k)}{\sqrt{1/2K_1}}\right) dy_k \quad \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

ただし

$$\begin{aligned} K_1 &\equiv \frac{2\alpha\Omega_k + 1}{2\Omega_k}, \quad K_2(z_k) \equiv \frac{2\alpha\Omega_k z_k + y_k^*}{2\alpha\Omega_k + 1} \\ K_3(z_k) &\equiv K_1(K_2^2(z_k) - \frac{2\alpha\Omega_k z_k^2 + y_k^{*2}}{2\alpha\Omega_k + 1}) \quad \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

である。ここで、ファジィ観測値 z_k は、関数 $K_2(z_k)$ および $K_3(z_k)$ に反映されている。また、 d_{nr} ($r=0, 1, 2, \dots, n$) は

次式を満足する展開係数である。

$$H_n\left(\frac{y_k - y_k^*}{\sqrt{\Omega_k}}\right) = \sum_{r=0}^n d_{nr} H_r\left(\frac{y_k - K_2(z_k)}{\sqrt{1/2K_1}}\right) \quad \dots\dots\dots (18)$$

エルミート多項式の直交条件⁽⁸⁾を考慮することにより、(16)式は次のように表現される。

$$I_n(z_k) = \frac{e^{K_3(z_k)}}{\sqrt{2K_1\Omega_k} n!} d_{n0} \quad \dots\dots\dots (19)$$

ただし、上式における d_{n0} は具体的には次式で与えられる。

$$\begin{aligned} d_{00} &\equiv 1, \quad d_{10} \equiv \frac{1}{\sqrt{\Omega_k}} (K_2(z_k) - y_k^*) \\ d_{20} &\equiv \frac{(K_2(z_k) - y_k^*)^2}{\Omega_k} + \frac{1}{2K_1\Omega_k} - 1 \\ d_{30} &\equiv \frac{3(K_2(z_k) - y_k^*)}{2K_1\Omega_k^{3/2}} - \frac{3(K_2(z_k) - y_k^*)}{\sqrt{\Omega_k}} + \frac{(K_3(z_k) - y_k^*)^3}{\Omega_k^{3/2}} \\ d_{40} &\equiv \frac{3}{(2\Omega_k K_1)^2} + \frac{3\{(K_2(z_k) - y_k^*)^2 - \Omega_k\}}{\Omega_k^2 K_1} \\ &\quad + \frac{(K_2(z_k) - y_k^*)^4 - 6\Omega_k(K_2(z_k) - y_k^*)^2 + 3\Omega_k^2}{\Omega_k^2} \\ &\quad \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

従って、(12)式で特に $f_{1,0}(x_k, \mathbf{a}_k) = x_k$, $f_{2,0}(x_k, \mathbf{a}_k) = (x_k - \hat{x}_k)^2$ および $f_{0,0\dots010\dots0}(x_k, \mathbf{a}_k) = a_{i,k}$, $f_{0,0\dots020\dots0}(x_k, \mathbf{a}_k) = (a_{i,k} - \hat{a}_{i,k})^2$ とおくことにより、 x_k および $a_{i,k}$ の平均、分散に対する推定式は、それぞれ次のように具体的に表される。

$$\begin{aligned} \hat{x}_k &\equiv \langle x_k | Z_k \rangle \\ &= \frac{\sum_{n=0}^{\infty} \{C_{00}^{10} B_{00n} + C_{10}^{10} B_{10n}\} I_n(z_k)}{\sum_{n=0}^{\infty} B_{00n} I_n(z_k)} \quad \dots\dots\dots (21) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{P}_k &\equiv \langle (x_k - \hat{x}_k)^2 | Z_k \rangle \\ &= \frac{\sum_{n=0}^{\infty} \{C_{00}^{20} B_{00n} + C_{10}^{20} B_{10n} + C_{20}^{20} B_{20n}\} I_n(z_k)}{\sum_{n=0}^{\infty} B_{00n} I_n(z_k)} \\ &\quad \dots\dots\dots (22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{a}_{i,k} &\equiv \langle a_{i,k} | Z_k \rangle \\ &= \frac{\sum_{n=0}^{\infty} \{C_{0\dots0\dots01\dots0}^{0\dots0\dots0} B_{0\dots0\dots0n} + C_{0\dots0\dots02\dots0}^{0\dots0\dots0} B_{0\dots0\dots0n}\} I_n(z_k)}{\sum_{n=0}^{\infty} B_{00n} I_n(z_k)} \\ &\quad \dots\dots\dots (23) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{P}_{a_{i,k}} &\equiv \langle (a_{i,k} - \hat{a}_{i,k})^2 | Z_k \rangle \\ &= \frac{\sum_{n=0}^{\infty} \{C_{0\dots0\dots02\dots0}^{0\dots0\dots0} B_{00n} + C_{0\dots0\dots03\dots0}^{0\dots0\dots0} B_{0\dots0\dots0n} + C_{0\dots0\dots04\dots0}^{0\dots0\dots0} B_{0\dots0\dots0n}\} I_n(z_k)}{\sum_{n=0}^{\infty} B_{00n} I_n(z_k)} \\ &\quad \dots\dots\dots (24) \end{aligned}$$

ただし

$$\begin{aligned}
 C_{00}^{10} &\equiv x_k^*, \quad C_{10}^{10} \equiv \sqrt{\Gamma_{x_k}}, \quad C_{00}^{20} \equiv \Gamma_{x_k} + (x_k^* - \hat{x}_k)^2 \\
 C_{10}^{20} &\equiv 2\sqrt{\Gamma_{x_k}}(x_k^* - \hat{x}_k), \quad C_{20}^{20} \equiv \sqrt{2}\Gamma_{x_k} \\
 C_{0\cdots 1\cdots 0}^{0\cdots 1\cdots 0} &\equiv a_{i,k}^*, \quad C_{0\cdots 1\cdots 0}^{0\cdots 1\cdots 0} \equiv \sqrt{\Gamma_{a_{i,k}}} \\
 C_{0\cdots 2\cdots 0}^{0\cdots 2\cdots 0} &\equiv \Gamma_{a_{i,k}} + (a_{i,k}^* - \hat{a}_{i,k})^2 \\
 C_{0\cdots 1\cdots 0}^{0\cdots 2\cdots 0} &\equiv 2\sqrt{\Gamma_{a_{i,k}}}(a_{i,k}^* - \hat{a}_{i,k}), \quad C_{0\cdots 2\cdots 0}^{0\cdots 2\cdots 0} \equiv \sqrt{2}\Gamma_{a_{i,k}}
 \end{aligned} \quad (25)$$

である。さらに、条件付期待値の性質と(2)式を用いることにより、(13)式における2つのパラメータ y_k^* と Ω_k は、次のように時刻 $k-1$ における x_k と $\mathbf{a}_k$ の予測値 (Z_{k-1} で条件付けられた x_k と $\mathbf{a}_k$ の任意関数に関する期待値) で表される。

$$\begin{aligned}
 y_k^* &\equiv \langle y_k | x_k, Z_{k-1} \rangle | Z_{k-1} \rangle \\
 &= \int y_k P(y_k | x_k) dy_k | Z_{k-1} \rangle \\
 &= \sum_{s=0}^1 e_{1s} \langle \mathbf{A}_{(s),k} \Theta(x_k) | Z_{k-1} \rangle \quad (26) \\
 \Omega_k &= \int (y_k - y_k^*)^2 P(y_k | x_k) dy_k | Z_{k-1} \rangle \\
 &= \sum_{s=0}^2 e_{2s} \langle \mathbf{A}_{(s),k} \Theta(x_k) | Z_{k-1} \rangle \quad (27)
 \end{aligned}$$

ただし

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}_{(s),k} &\equiv (0, \mathbf{a}_{(s),k}), \quad (s=1, 2, \dots) \\
 \mathbf{A}_{(0),k} &\equiv (1, 0, 0, \dots, 0) \\
 \Theta(x_k) &\equiv (\theta_0^{(1)}(x_k), \theta_1^{(1)}(x_k), \dots, \theta_R^{(1)}(x_k))^T \quad (28)
 \end{aligned}$$

である。また、(26)(27)式における e_{1s} , e_{2s} は、 y_k および $(y_k - y_k^*)^2$ に対する次の直交展開式を満足するように予め決定される係数である。

$$y_k = \sum_{i=0}^1 e_{1i} \theta_i^{(2)}(y_k), \quad (y_k - y_k^*)^2 = \sum_{i=0}^2 e_{2i} \theta_i^{(2)}(y_k) \quad (29)$$

同様に、(10)式で定義される展開係数 B_{lmn} は、(2)式および関数 $\theta_i^{(2)}(y_k)$ の直交条件を考慮することにより、次のように与えられる。

$$\begin{aligned}
 B_{lmn} &= \langle \varphi_l^{(1)}(x_k) \varphi_m^{(2)}(\mathbf{a}_k) \int \varphi_n^{(3)}(y_k) P(y_k | x_k) dy_k | Z_{k-1} \rangle \\
 &= \sum_{s=0}^n e_{ns} \langle \varphi_l^{(1)}(x_k) \varphi_m^{(2)}(\mathbf{a}_k) \mathbf{A}_{(s),k} \Theta(x_k) | Z_{k-1} \rangle \\
 &\quad \dots \dots \dots (30)
 \end{aligned}$$

$$(\varphi_n^{(3)}(y_k) = \sum_{i=0}^n e_{ni} \theta_i^{(2)}(y_k), \quad e_{ni}; \text{一意に決定される係数})$$

(30)式から、展開係数 B_{lmn} は x_k および $\mathbf{a}_k$ の予測値で与えられることがわかる。なお、 y_k に対する推定値も、(2)式を考慮することにより、 x_k の多項式に関する推定値から算定できる(付録参照)。

最後に(5)(6)式を考慮することにより、逐次推定を行う

上で必要な予測値は、平均、分散に関して次式で与えられる。

$$x_{k+1}^* \equiv \langle x_{k+1} | Z_k \rangle = F \hat{x}_k \quad (31)$$

$$\Gamma_{k+1} \equiv \langle (x_{k+1} - x_{k+1}^*)^2 | Z_k \rangle = F^2 \hat{P}_k + G^2 \sigma_u^2 \quad (32)$$

$$a_{i,k+1}^* \equiv \langle a_{i,k+1} | Z_k \rangle = \langle a_{i,k} | Z_k \rangle = \hat{a}_{i,k} \quad (33)$$

$$\begin{aligned}
 \Gamma_{a_{i,k+1}} &\equiv \langle (a_{i,k+1} - a_{i,k+1}^*)^2 | Z_k \rangle \\
 &= \langle (a_{i,k} - \hat{a}_{i,k})^2 | Z_k \rangle = \hat{P}_{a_{i,k}} \quad (34)
 \end{aligned}$$

〈3・2〉 ファジィ事象のモーメントに基づく推定法の導出

(1)式におけるパラメータ α は、一般に先験情報をもとに(または試行錯誤で)決定することができるが、ここではこれも未知パラメータとみなすことにより、対象騒音 x_k および(5)式で定義されるとパラメータ $\mathbf{a}_k$ と同時に推定する。そのため、まず時不変パラメータ α に関する次の時間推移則を導入する。

$$\alpha_{k+1} = \alpha_k \quad (35)$$

次に、(7)式と同様に、 x_k , $\mathbf{a}_k$ および α_k に関する条件付結合確率密度関数に着目すると、次のベイズ定理に関する展開表現が得られる。

$$\begin{aligned}
 P(x_k, \mathbf{a}_k, \alpha_k | Z_k) &= \frac{P(x_k, \mathbf{a}_k, \alpha_k, z_k | Z_{k-1})}{P(z_k | Z_{k-1})} \\
 &= P_0(x_k | Z_{k-1}) P_0(\mathbf{a}_k | Z_{k-1}) P_0(\alpha_k | Z_{k-1}) \\
 &\quad \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{r=0}^{\infty} D_{lmnr} \varphi_l^{(1)}(x_k) \varphi_m^{(2)}(\mathbf{a}_k) \\
 &\quad \varphi_n^{(4)}(\alpha_k) \varphi_r^{(5)}(z_k) / \sum_{r=0}^{\infty} D_{000r} \varphi_r^{(5)}(z_k) \quad (36)
 \end{aligned}$$

ただし

$$D_{lmnr} \equiv \varphi_l^{(1)}(x_k) \varphi_m^{(2)}(\mathbf{a}_k) \varphi_n^{(4)}(\alpha_k) \varphi_r^{(5)}(z_k) | Z_{k-1} \rangle \quad (37)$$

であり、関数 $\varphi_n^{(4)}(\alpha_k)$ および $\varphi_r^{(5)}(z_k)$ は、それぞれ α_k および z_k に関する規準分布 $P_0(\alpha_k | Z_{k-1})$ および $P_0(z_k | Z_{k-1})$ を重みとする直交多項式である。

(36)式をもとに、(11)式と同様に x_k , $\mathbf{a}_k$ および α_k に関する任意 $(L, \mathbf{M}, N)$ 次の多項式関数 $f_{L, \mathbf{M}, N}(x_k, \mathbf{a}_k, \alpha_k)$ に対する推定式が次のように得られる。

$$\begin{aligned}
 \hat{f}_{L, \mathbf{M}, N}(x_k, \mathbf{a}_k, \alpha_k) &\equiv \langle f_{L, \mathbf{M}, N}(x_k, \mathbf{a}_k, \alpha_k) | Z_{k-1} \rangle \\
 &= \frac{\sum_{l=0}^L \sum_{m=0}^{\mathbf{M}} \sum_{n=0}^N \sum_{r=0}^{\infty} E_{lmnr}^{LMN} D_{lmnr} \varphi_r^{(5)}(z_k)}{\sum_{r=0}^{\infty} D_{000r} \varphi_r^{(5)}(z_k)} \quad (38)
 \end{aligned}$$

ただし、 E_{lmnr}^{LMN} は関数 $f_{L, \mathbf{M}, N}(x_k, \mathbf{a}_k, \alpha_k)$ を次のように直交展開したときの係数である。

$$\begin{aligned}
 f_{L, \mathbf{M}, N}(x_k, \mathbf{a}_k, \alpha_k) &= \sum_{l=0}^L \sum_{m=0}^{\mathbf{M}} \sum_{n=0}^N E_{lmnr}^{LMN} \varphi_l^{(1)}(x_k) \varphi_m^{(2)}(\mathbf{a}_k) \varphi_n^{(4)}(\alpha_k) \quad (39)
 \end{aligned}$$

(37)式で定義される展開係数に、ファジィ事象の平均および分散⁽⁷⁾を任意次数の積率(モーメント)に拡張し適用した後、(2)式および関数 $\theta_i^{(2)}(y_k)$ の直交条件を適用することにより、次式が得られる。

$$\begin{aligned}
D_{lmnr} &= \langle \varphi_l^{(1)}(x_k) \varphi_m^{(2)}(\mathbf{a}_k) \varphi_n^{(4)}(\alpha_k) \mu_z(y_k) \\
&\quad \varphi_r^{(5)}(y_k) | Z_{k-1} \rangle / \langle \mu_z(y_k) | Z_{k-1} \rangle \\
&= \sum_{s=0}^S g_s \langle \varphi_l^{(1)}(x_k) \varphi_m^{(2)}(\mathbf{a}_k) \varphi_n^{(4)}(\alpha_k) \mathbf{A}_{(s),k} \\
&\quad \Theta(x_k) | Z_{k-1} \rangle / \sum_{s=0}^S h_s \langle \mathbf{A}_{(s),k} \Theta(x_k) | Z_{k-1} \rangle
\end{aligned} \quad (40)$$

ただし、 g_s および h_s は、次式を満足する展開係数である。

$$\mu_z(y_k) \varphi_r^{(5)}(y_k) = \sum_{i=0}^{\infty} g_i \theta_i^{(2)}(y_k) \quad (41)$$

$$\mu_z(y_k) = \sum_{i=0}^{\infty} h_i \theta_i^{(2)}(y_k) \quad (42)$$

さらに、(5)(6)(35)式を考慮することにより、任意($L, \mathbf{M}, N$)次の多項式関数 $g_{L, \mathbf{M}, N}(x_{k+1}, \mathbf{a}_{k+1}, \alpha_{k+1})$ に対する予測値は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
g_{L, \mathbf{M}, N}^*(x_{k+1}, \mathbf{a}_{k+1}, \alpha_{k+1}) &\equiv g_{L, \mathbf{M}, N}(x_{k+1}, \mathbf{a}_{k+1}, \alpha_{k+1}) | Z_k \rangle \\
&= \langle g_{L, \mathbf{M}, N}(Fx_k + Gu_k, \mathbf{a}_k, \alpha_k) | Z_k \rangle \quad (43)
\end{aligned}$$

上式は、 x_k , $\mathbf{a}_k$, α_k の多項式関数に関する推定値および u_k の統計量から与えられ、したがって、推定式(38)および予測式(43)を交互に組み合わせることにより、対象信号 x_k の逐次推定が可能になる。

4. 音環境評価への適用

環境騒音に対する音の大きさと騒音レベルの関係を定量的に見出すことは、環境アセスメントの観点から重要である⁽⁵⁾。たとえば、地域の音環境評価においては、測定による全数調査が不可能な場合、地域住民による音の大きさ（ラウドネス）に対するアンケート調査がしばしば行われている。したがって、人間によるラウドネス評価値のデータに基づき、騒音レベルを推定することは大変重要である。一般に、人間のラウドネスに対する感覚は、7段階（例えば、

図1 被験者 A によるラウドネスの逐次評価に基づく騒音レベル変動波形の推定結果（データ 1 の場合）

Fig. 1. Estimation results of the fluctuation waveform of the sound level based on the successive judgment on loudness scores by a subject A (for Data 1).

図3 被験者 A によるラウドネスの逐次評価に基づく騒音レベル変動波形の推定結果（データ 2 の場合）

Fig. 3. Estimation results of the fluctuation waveform of the sound level based on the successive judgment on loudness scores by a subject A (for Data 2).

図2 被験者 B によるラウドネスの逐次評価に基づく騒音レベル変動波形の推定結果（データ 1 の場合）

Fig. 2. Estimation results of the fluctuation waveform of the sound level based on the successive judgment on loudness scores by a subject B (for Data 1).

図4 被験者 B によるラウドネスの逐次評価に基づく騒音レベル変動波形の推定結果（データ 2 の場合）

Fig. 4. Estimation results of the fluctuation waveform of the sound level based on the successive judgment on loudness scores by a subject B (for Data 2).

図5 被験者 A によるラウドネスの逐次評価に基づく騒音レベル変動波形に関する推定結果の比較 (データ 1 の場合)

Fig. 5. Comparison between two estimated results for the fluctuation waveform of the sound level based on the successive judgment on loudness scores by a subject A (for Data 1).

図6 被験者 B によるラウドネスの逐次評価に基づく騒音レベル変動波形に関する推定結果の比較 (データ 1 の場合)

Fig. 6. Comparison between two estimated results for the fluctuation waveform of the sound level based on the successive judgment on loudness scores by a subject B (for Data 1).

1. 非常に静か, 2. 静か, 3. 大体静か, 4. 少し騒々しい,
5. 騒々しい, 6. かなり騒々しい, 7. 非常に騒々しい) で識別できることが心理音響学で知られている⁽³⁾。

実験は、国道 2 号線沿いで測定した道路交通騒音をデータレコーダに録音した後、実験室でこれを再生し、正常な聴覚を持つ 22 歳から 24 歳までの 6 人の被験者 (A, B, C, D, E, F とする) が刻々と変化する音を聞いて、その印象を 5 秒ごとに上述の 7 つのカテゴリーで判断した。ここでは、交通量が比較的に少ないときと多いときの 2 種類のデータについて実験を行った。前者の場合、騒音レベルの平均値は 71.4[dBA]で、後者では 80.2[dBA]であった (それぞれ、データ 1 およびデータ 2 とよぶ)。このようにして得られたラウドネス評価値をファジィ観測値 z_k とみなし、騒音レベル x_k の変動波形を推定した。

図7 被験者 A によるラウドネスの逐次評価に基づく騒音レベル変動波形に関する推定結果の比較 (データ 2 の場合)

Fig. 7. Comparison between two estimated results of the fluctuation waveform for the sound level based on the successive judgment on loudness scores by a subject A (for Data 2).

図8 被験者 B によるラウドネスの逐次評価に基づく騒音レベル変動波形に関する推定結果の比較 (データ 2 の場合)

Fig. 8. Comparison between two estimated results of the fluctuation waveform for the sound level based on the successive judgment on loudness scores by a subject B (for Data 2).

表 1 データ 1 に対する推定の rms 誤差 [dBA]

Table 1. Root mean squared error of the estimation for Date 1 in [dBA].

Subject	A	B	C	D	E	F
Proposed Method (Sect. 3.1)	3.65	3.63	4.51	4.62	4.89	4.56
Proposed Method (Sect. 3.2)	3.61	3.65	4.45	4.52	5.06	4.77
Compared Method	7.55	4.10	15.8	5.06	5.13	5.75

表 2 データ 2 に対する推定の rms 誤差 [dBA]
Table 2. Root mean squared error of the estimation for Data 2 in [dBA].

Subject	A	B	C	D	E	F
Proposed Method (Sect. 3.1)	4.59	4.26	4.82	6.80	7.49	4.65
Proposed Method (Sect. 3.2)	4.18	3.66	4.61	5.88	6.22	3.92
Compared Method	10.7	7.79	4.96	14.6	11.6	4.64

〈3・1〉節で提案したファジィ確率に基づく手法を適用したときの推定結果の一部を図 1 に示す（被験者 A でデータ 1 の場合）。この図で、横軸は推定の繰り返し時刻 k を、縦軸は騒音レベルを表す。本手法との比較のため、同図にはファジィ理論を用いず、既発表⁽²⁾⁽⁶⁾と同様の推定アルゴリズムを適用した場合の推定結果も併せ示す。具体的には、(8)式においてメンバーシップ関数を考慮せずに導出される状態推定法を適用してみた。本手法は騒音レベル変動を精度よく推定しているのに対し、ファジィ理論を考慮しない場合は推定誤差がかなり大きいことがわかる。被験者 B の評価データに適用したときの推定結果を図 2 に示す。また、データ 2 に対する推定結果の一部を図 3 および図 4 に示す。いずれも、本手法はファジィ理論を考慮しない場合に比べて、騒音レベルの変動波形をより良く推定していることがわかる。

次に、〈3・2〉節で提案した推定アルゴリズムを適用した結果の一部を図 5～図 8 に示す。これらの図で、“Estimated results with unknown parameter”はメンバーシップ関数のパラメータも未知として x_k と同時に推定する〈3・2〉節の手法を適用したときの結果であり、“Estimated results with known parameter”は〈3・1〉節で提案した手法を適用したときの推定結果である。さらに、全ての被験者によるラウドネス評価データに 3 種の推定手法を適用したときの、推定の平均自乗誤差を表 1（データ 1 の場合）および表 2（データ 2 の場合）に示す。これらの表において、“Compared Method”は、(8)式においてメンバーシップ関数を導入せずに、既発表⁽²⁾⁽⁶⁾と同様の推定アルゴリズムを適用したときの推定結果である。メンバーシップ関数の導入に基づく本手法による推定結果は、ファジィ理論を考慮しない場合に比べて、精度の良い推定が得られていることが数値的に伺われる。さらに、メンバーシップ関数のパラメータをも未知とし、対象騒音と同時に推定した〈3・2〉節の手法のほうが、全般的により高精度の推定結果が得られていることがわかる。

5. おわりに

本研究では、あいまいさの混入したファジィ観測データに基づき、構造未知の複雑な音環境システムにおける対象信号を推定するための一手法を提案した。具体的には、システムの入出力関係を、既発表の条件付確率分布で捉え、

ファジィ事象の確率およびファジィ事象のモーメントを導入することにより、新たな状態推定法を導出した。さらに、提案した手法を音環境における心理実験に適用して、実験的にも検討を行った。

本研究は音環境システムの状態推定に関する従来の標準的手法とは異なってファジィ理論導入の有効性を示す解析路線上にあり、当然まだ研究の初期段階で、実験も原理的確認の段階に留まっている。従って、今後、この基礎研究の上に積み上げるべき多くの方法論的改善や実問題への将来課題が残されている。例えば、

- (i) 提案した手法を、システム特性に未知要因やあいまいさを含む多くの音環境や他の実システムへ適用して、その実際の有効性を多く確認していくこと、
- (ii) 複数の対象信号が存在する場合など多変数システムへ理論を拡張すること、
- (iii) 暗騒音のような外来雑音が存在する実際的な状況下において適用可能なように理論を発展させること、などが考えられる。

（平成 18 年 3 月 3 日受付，平成 18 年 10 月 2 日再受付）

文 献

- (1) M. Ohta, A. Ikuta, and N. Takaki : “A New Trial of Regression Analysis with Less Information Loss and Its Application to Sound Insulation Walls —Matching to the Prediction of Response Probability Distribution”, *J. of the Acoustical Society of Japan*, Vol.44, No.11, pp.848-856 (1988-11) (in Japanese)
太田光雄・生田 顕・高木尚光：「情報欠損の少ない回帰分析の一試みと音環境への適用一分布予測への整合性」，音響誌，**44**，11，pp.848-856 (1988-11)
- (2) A. Ikuta, M. Ohta, and H. Masuie : “A Countermeasure for an External Noise in the Measurement of Sound Environment and Its Application to the Evaluation for Traffic Noise at Main Line”, *IEEJ Trans. EIS*, Vol.126, No.1, pp.63-71 (2006-1) (in Japanese)
生田 顕・太田光雄・益池寿子：「音環境計測における外来雑音対策と幹線交通騒音評価への適用」，電学論 C，**126**，1，pp.63-71 (2006-1)
- (3) 難波精一郎・桑野園子：「音の評価のための心理学的測定法」，コロナ社，東京 (1998)
- (4) S. Yamaguchi, K. Oimatsu, Y. Kato, and T. Saeki : “Psychological Evaluation of External Noise in the Case of Listening to Audio Signal”, *IEICE Japan*, Vol.J77-A, No.11, pp.1433-1442 (1994-11) (in Japanese)
山口静馬・老松建成・加藤裕一・佐伯徹郎：「音声聴取時の外来雑音に対する心理的評価」，信学論，**J77-A**，11，pp.1433-1442 (1994-11)
- (5) A. Ikuta, M. Ohta, and M. N. H. Siddique : “Prediction of Probability Distribution for the Psychological Evaluation of Noise in the Environment Based on Fuzzy Theory”, *International J. of Acoust. and Vib.*, Vol.10, No.3, pp.107-114 (2005)
- (6) M. Ohta and H. Yamada : “New Methodological Trials of Dynamical State Estimation for the Noise and Vibration Environmental System — Establishment of General Theory and Its Application to Urban Noise Problems”, *Acustica*, Vol.55, No.4, pp.199-212 (1984)
- (7) L. A. Zadeh : “Probability Measures of Fuzzy Events”, *J. Math. Anal. Appl.*, Vol.23, pp.199-212 (1968)
- (8) M. Ohta and T. Koizumi : “General Statistical Treatment of the Response of a Nonlinear Rectifying Device to a Stationary Random Input”, *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.IT-14, No.4, pp.595-598 (1968)

付録 y_k に対する推定式の導出

音環境システムの出力 y_k に対する任意 N 次多項式 $h_N(y_k)$ の推定式は、次式で定義される。

$$\hat{h}_N(y_k) \equiv \langle h_N(y_k) | Z_k \rangle \quad (\text{A1})$$

条件付期待値の性質と(2)式を用いることにより、(A1)式は次のように変形される。

$$\begin{aligned} \hat{h}_N(y_k) &= \langle \langle h_N(y_k) | x_k, Z_k \rangle | Z_k \rangle \\ &= \int h_N(y_k) P(y_k | x_k) dy_k | Z_k \rangle \\ &= \sum_{s=0}^N e_{Ns} \langle \mathbf{A}_{(s),k} \Theta(x_k) | Z_k \rangle \quad (\text{A2}) \end{aligned}$$

ただし、 $\mathbf{A}_{(s),k}$ および $\Theta(x_k)$ は(28)式で定義され、 e_{Ns} は次の直交展開式を満足する係数である。

$$h_N(y_k) = \sum_{i=0}^N e_{Ni} \theta_i^{(2)}(y_k) \quad (\text{A3})$$

(A2)式より、 $\hat{h}_N(y_k)$ は x_k および $\mathbf{a}_k$ に関する推定式から得られることがわかる。

生 田 顕 (正員) 1951 年 11 月 5 日生。76 年 3 月九工大・工・第 2 部電気卒。81 年 3 月広島大学大学院博士課程後期修了。広島大助手、近畿大助教授、県立広島女子大学教授を経て、現在県立広島大学教授。信号処理、確率システムの推定・同定、波動環境(騒音・振動・電磁波)の評価に関する研究に従事。工博。電子情報通信学会、音響学会、騒音制御工学会などの各会員。

益 池 寿 子 (非会員) 1980 年 8 月 7 日生。2003 年 3 月県立広島女子大・生活科学・生活環境卒業。同年 NTT データ中国入社。ソリューションシステム部勤務。現在、県立広島大学大学院修士課程経営情報学専攻在学中。信号情報処理およびデータ解析、情報通信、救急医療システムの構築に関する研究開発に従事。

太 田 光 雄 (非会員) 1928 年 3 月 22 日生。52 年 3 月京大・理・物理卒業。神戸大・工・助教授、福井大・工・教授、広島大・工・教授、近畿大・工・教授を経て、現在広島大・名誉教授。制御・信号処理、波動環境(騒音・振動・電磁波)の評価、通信・情報など、特に非ガウス・非定常・非線形の研究に従事。66 年日本音響学会佐藤論文賞、96 年計測自動制御学会フェロー称号、98 Int. Inst. Acous. & Vib. フェロー称号受賞。日本騒音制御工学会認定技師。環境庁、IMC 及び日本音響学会より功績賞受賞。