チャンネル間相互作用を考慮した液晶ディスプレイの色再現特性のキャリブレーション

Calibration of LCD Colorimetry Considering Channel Interaction

田村 信彦[†], 津村 徳道[†], 三宅 洋一[†]

Nobuhiko Tamura[†], Norimichi Tsumura[†] and Yoichi Miyake[†]

Abstract We describe a display calibration model that is suitable for liquid-crystal displays (LCDs). In conventional display calibration models, the spectral radiance of light emitted from the display is estimated using the data measured for each primary color based on the assumption of RGB channel additivity, however, this assumption does not hold for LCDs. With only a few measurements of the spectral radiance or tristimulus values, the proposed model accurately approximates the colorimetric characteristics of the display. To evaluate the effectiveness of the model, we used it to measure the RGB primary colors, the CMYK secondary and the tertiary colors. The colors were analyzed based on principal component analysis to identify the effect of channel interaction. The proposed model was found to be more effective than conventional models for the colorimetry of LCDs.

キーワード: characterization, calibration, LCD, Masking model, channel interaction, PCA, colorimetry, color management

1. ま え が き

液晶ディスプレイ装置 (LCD) は軽量性、省電力性、省スペース性に優れ、近年の低価格化に伴い今後一層の普及が見込まれる。一方で画像のマルチメディア化、ネットワーク環境の整備に伴い同一画像情報を異なるデバイスで表示することが多くなってきた。デバイス間における表示色の整合性を保つため、色空間の国際規格である sRGB を満足する LCD も普及の兆しを見せている。ディスプレイ装置における正確な色再現では、キャリブレーションによってディスプレイに入力される RGB 信号と心理物理量である CIE XYZ 三刺激値の対応関係を求めることが重要である。CRT については、Berns らにより提案された GOG (Gain-Offset-Gamma) モデル¹⁾を用いたキャリブレーションが標準的*であり、少数の XYZ の測定値を基に任意の入力信号に対応する XYZ を予測することが可能である。しかしながら LCD の場合、RGB チャンネル間における相互作用の存在、プライマリカラー色度が入力レベルに応じて変化するなどの CRT にはな

い特性があり、キャリブレーションが困難である。ディスプレイのキャリブレーション手法は、これまでに数多く提案されており、LCD を対象とする手法では、入力信号に対する輝度変化を S 字曲線で近似する S-curve モデル²⁾などが存在する。また、LCD の色再現原理を考慮しない手法では多項式近似、3 次元 LUT、行列演算に基づく手法³⁾などがある。次節において、これらの手法について概説を行うが、行列演算に基づく手法を除き推定精度において充分ではない。また、ディスプレイのキャリブレーションではプライマリの色度、入力信号に対する輝度特性などのモデルにおける未知パラメータを定めるため、入力信号に対する XYZ 値の計測が必要となる。従来法では充分な精度を実現するため、このようなトレーニングデータの測定回数が非常に多くなってしまいうという欠点が存在する。唯一、行列演算に基づく手法はチャンネル間相互作用、入力レベルに依存したプライマリカラー色度変動を考慮しているため推定精度は高い。しかしながら XYZ→RGB の計算が困難であり、実用性に欠ける。本論文では逆変換可能、かつチャンネル間相互作用、プライマリカラー変動を考慮した Masking モデルによる高精度キャリブレーション手法を提案する。

2. キャリブレーション手法概説

2.1 GOG モデル, S-curve モデル, 多項式近似

GOG モデル, S-curve モデル, 多項式近似は式 (1) で定義される共通の構造を持つ。

2001 年 12 月 20 日受付, 2002 年 3 月 26 日再受付, 2002 年 5 月 16 日採録
[†]千葉大学 工学部 情報画像工学科

(〒 263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33, TEL 043-290-3262)

[†]Dept. of Info. & Image Sci., Faculty of Engineering, Chiba University

(1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi 263-8522, Japan)

* CIE 122-1996, ASTM (American society for testing and materials) designation: E 1682-96

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで X_0, Y_0, Z_0 は RGB 信号 (0,0,0) に対応する XYZ である。 X_C, Y_C, Z_C はチャネル C (C=R, G, B) における最大輝度の XYZ からバイアス X_0, Y_0, Z_0 を差し引いたものである。 RGB 信号 (d_R, d_G, d_B) に依存して各チャネルの XYZ の強度を示す係数 $R(d_R), G(d_G), B(d_B)$ が変動する。 各モデルにおける $R(d_R)$ の定義を次に示す。

GOG モデル

$$R(d_R) = \begin{cases} (k_{g,R}d_R + k_{o,R})^{\gamma_R} & , k_{g,R}d_R + k_{o,R} \geq 0 \\ 0 & , k_{g,R}d_R + k_{o,R} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

S-curve モデル

$$R(d_R, d_G, d_B) = A_{RR}f(d_R) + A_{RG}f'(d_G) + A_{RB}f'(d_B) \quad (3)$$

where $f(d_R) = \frac{d_R^\alpha}{d_R^\beta + C}$, f' : derivative of f

多項式近似

$$R(d_R) = a_R d_R^2 + b_R d_R + c_R \quad (4)$$

ここで d_R, d_G, d_B 以外の変数は全て定数であり、トレーニングデータとの誤差を最小にするように求められる (4.3 節参照)。 $G(d_G), B(d_B)$ の定義も同様に行われる。 GOG モデルは、CRT モニタの内部構造を定式化したものであり、本来 LCD のキャリブレーションには適していないが、ある程度の推定精度を持つため LCD に対しても用いられることがある*。 S-curve モデルは、RGB 信号に対する輝度変化を式 (3) で与えられる S 字曲線で近似する。 液晶ディスプレイにおいて S 字曲線状の輝度変化は特徴的ではあるが多くの場合、入力信号を LUT で変換しガンマカーブを近似する方式がとられるため、近似精度は高くない。 GOG, S-curve, 多項式近似ではトレーニングデータとして各チャネル独立に測定した XYZ 値を用いるため、チャネル間相互作用を反映することができず、推定精度に限界がある。 なお S-curve モデルにおいて $R(d_R)$ の項に d_G, d_B が含まれるが、これはプライマリカラーの変動を係数の変動として扱うための項でありチャネル間相互作用のモデル化ではない。 詳細は参考文献²⁾を参照されたい。

2.2 行列演算に基づく手法

IEC TC100 PT61966 Part4 に記載の行列演算に基づくキャリブレーションでは式 (5) における 3×8 の行列を用いて RGB 信号から XYZ 値への変換をモデル化している。

* 例えば⁴⁾ など

図 1 チャネル間相互作用による光電変換関数の相違 (SHARP LL-T180A)

Difference of electro-optical transfer function caused by channel interaction (SHARP LL-T180A)

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = A [1 \ R \ G \ B \ RG \ GB \ BR \ RGB]^T \quad (5)$$

ここで R, G, B はそれぞれ d_R, d_G, d_B の関数であり、各チャネルについて 0~255 までは等間隔で 32 点計測した輝度値を用いて補間により求める。 また変換行列 A については 32 色のカラーに対応する RGB と XYZ の組を用いて推定誤差を最小にしよう求める。 式 (5) において RG, GB, BR, RGB などの交差項の導入によりチャネル間相互作用を考慮している。 このため RGB 信号から XYZ を推定する精度は高いが、式 (5) は R, G, B についての非線形三連立方程式であるため XYZ→RGB 信号の計算が困難であり、実用性に欠ける。 また相互作用による影響は R, G, B に対し単調増加であることが仮定されているが、実際にはこの仮定を満たさないディスプレイも存在する。 例えば、図 1 では相互作用の影響は入力レベルの中間ほどで最も大きい。

3. Masking モデル

3.1 チャネル間相互作用

図 1 に入力レベルに対する R チャネルの輝度変化を表す。 図中破線で示した曲線は G, B チャネルの入力レベルを 0 に保ち、R チャネルの入力レベルを変化させた場合である。 また実線は、G, B チャネルの入力レベルを 255 に保った場合の輝度変化である。 図 1 よりチャネル間相互作用により LCD の色再現特性が大きく影響を受けることが理解される。

チャネル間相互作用は、液晶パネル内部における電極の容量的な相互結合に起因すると考えられているが、その特性は駆動回路に大きく依存するため、定式化が困難である。 そこで本研究では、チャネル間相互作用が強く現れることが想定される 2 次色、3 次色、すなわち Cyan、

図2 マスキング
Masking

Magenta, Yellow, Gray の XYZ を直接計測することにより、チャンネル間相互作用を考慮した推定を行う。RGB 信号 (d_R, d_G, d_B) を入力とした場合のディスプレイの XYZ を要素にもつベクトルを $\mathbf{I}(d_R, d_G, d_B)$ とする。2.1 節で概説した従来法では、各チャンネルからの寄与の推定値 $\hat{\mathbf{I}}(d_R, 0, 0)$, $\hat{\mathbf{I}}(0, d_G, 0)$, $\hat{\mathbf{I}}(0, 0, d_B)$ の加法により XYZ の推定を行った。このような推定では、チャンネル間相互作用が含まれないため推定精度が低下することが問題であった。本論文で提案する Masking モデルでは図2のように R, G, B, C, M, Y, Gr を用いて $\mathbf{I}(d_R, d_G, d_B)$ を推定する。 $\mathbf{I}(d_Y, d_Y, 0)$ を $\mathbf{I}_Y(d_Y)$, また $\mathbf{I}(d_{Gr}, d_{Gr}, d_{Gr})$ を $\mathbf{I}_{Gr}(d_{Gr})$ などと略記すると式(6)に基づいて XYZ を推定する。

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{I}}(d_R, d_G, d_B) = & \hat{\mathbf{I}}_{Gr}(d_B) + (\hat{\mathbf{I}}_Y(d_G) - \hat{\mathbf{I}}_Y(d_B)) \\ & + (\hat{\mathbf{I}}_R(d_R) - \hat{\mathbf{I}}_R(d_G)) \end{aligned} \quad (6)$$

if $d_B \leq d_G \leq d_R$

$d_B \leq d_G \leq d_R$ 以外の場合も同様、1 次色、2 次色、3 次色を用いて推定を行う。 $\mathbf{I}_i(d_i)$ ($i = R, G, B, C, M, Y, Gr$) の推定方法については次節で解説する。

3.2 プライマリカラー非恒常性

図3に RGB 各チャンネルについて入力レベルを 0~255 まで変動させた場合の $u'v'$ 色度図上での軌跡を表す。測定値からブラックの XYZ を差し引いた場合においても、色度は入力レベルに応じて若干ではあるが変動する (プライマリカラー非恒常性)。これは液晶の透過率特性が印加電圧に依存して変動するためである。Masking モデルでは $\mathbf{I}_i(d_i)$ ($i=R, G, B, C, M, Y, Gr$) を次式により推定を行う。

$$\hat{\mathbf{I}}_i(d_i) = C_i(d_i) \begin{bmatrix} X_{i,PCA} \\ Y_{i,PCA} \\ Z_{i,PCA} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで $X_{i,PCA}, Y_{i,PCA}, Z_{i,PCA}$ はチャンネル i について 0~255 の入力レベルに対応する XYZ に主成分分析を施し、得られた第一主成分ベクトルである。例えば 0~255 を 15 刻みで測定した場合

図3 入力レベルに対する色度変動、黒色補正前(上)、後(下)
(SHARP LL-T180A)

Color tracking before(top) and after(bottom) black correction (SHARP LL-T180A)

$$\begin{bmatrix} X_{i,PCA} \\ Y_{i,PCA} \\ Z_{i,PCA} \end{bmatrix} = 1st \text{ Principal Component of } \{ \mathbf{I}_i(d_i) - \mathbf{I}_0 | i = 0, 15, 30, \dots, 255 \} \quad (8)$$

のように書き表すことができる。プライマリカラー恒常性が成り立つ場合、入力レベルに応じて XYZ は直線上を移動するが、実際には入力レベルに対し液晶の透過率特性が変動するため曲線上を移動することになる。このため図3に示す入力レベルに依存した色度のばらつきが生じる。Masking モデルでは主成分分析により曲線との差を最小とする最適なベクトル $X_{i,PCA}, Y_{i,PCA}, Z_{i,PCA}$ を計算し、プライマリカラー非恒常性に起因する推定誤差を最小限度に抑える。式(7)中の係数 $C_i(d_i)$ は 0~255 を 15 刻みで測定した場合、測定データに対して

$$C_i(d_i) = \begin{bmatrix} X_{i,PCA} \\ Y_{i,PCA} \\ Z_{i,PCA} \end{bmatrix}^T (\mathbf{I}_i(d_i) - \mathbf{I}_0) \quad (9)$$

$(d_i = 0, 15, 30, \dots, 255)$

のように求める。ただし主成分ベクトルはノルム 1 に正規化されているとする。任意の d_i に対する $C_i(d_i)$ の値は測定データ点に対する C_i を用いてスプライン補間により求める。

表 1 測定に用いたディスプレイ
List of measured display

Model	Type
SHARP LL-T180A	18.1" TFT LCD Monitor
iiyama AS4635U	18.1" a-Si TFT LCD Monitor
SONY PCG-C1MR/BP	8.9" Ultra-Wide TFT LCD (Laptop)

表 2 チャネル間相互作用の検証
Channel interaction test result

	$I(140, 140, 140)$ XYZ	$I_R(140) + I_G(140) + I_B(140) - 2I_o$ XYZ	Error $\Delta X \Delta Y \Delta Z$
SHARP	32.3, 33.0, 35.1	22.1, 22.5, 24.2	10.2, 10.5, 10.9
iiyama	30.1, 31.9, 23.1	29.6, 31.4, 22.6	0.5, 0.5, 0.5
VAIO	46.7, 46.4, 66.9	52.3, 52.1, 74.2	-5.6, -5.7, -7.3

4. 実験

三種類の液晶ディスプレイを用いて提案手法である Masking モデルの有効性の判定を行った。比較対象として、GOG モデル、S-curve モデル、多項式近似、3 次元 LUT、行列演算に基づく手法を用いた推定を行った。Masking モデル、GOG モデル、S-curve モデル、多項式近似についてはトレーニングデータ数を 4 段階に分け、推定精度の変動を調べた。

4.1 実験条件

表 1 に XYZ 推定実験に用いたディスプレイを表す。CIE XYZ 三刺激値の計測には分光放射輝度計 (Minolta CS1000) を用いてディスプレイ中央部、2 度視野領域の分光放射輝度を測定し、XYZ に変換を行った。分光放射輝度計とディスプレイの距離は 30cm、カラー表示はディスプレイ全画面に対し行った。また測定開始前に 4 時間のウォームアップを行った。測定は暗室で行った。

4.2 チャネル間相互作用

測定に用いられたディスプレイにおけるチャネル間相互作用を表 2 に示す。チャネル間相互作用のためグレイの XYZ は RGB を単独で表示した場合の XYZ の総和と異なることがわかる。

4.3 実験方法

GOG モデル、S-curve モデル、多項式近似を用いた推定では RGB 各チャネルについて 0~255 を等間隔で 5, 9, 18, 32 ステップで表示色を変え、XYZ を測定した。Masking モデルでは R, G, B, C, M, Y, Gr 各チャネルについて 0~255 を等間隔で 5, 9, 18, 32 ステップで表示、計測を行った。行列演算に基づく手法では IEC TC100 PT61966 Part4 の規定に従い、RGB チャネルについては 32 ステップ、32 色のカラー (混色) を表示、計測を行った。LUT では $9 \times 9 \times 9$ 点の XYZ を測定した。各モデルについて上記のトレーニングデータを元にパラメータを計算し、ランダムに生成された 100 個の RGB 値に対し XYZ の推定を行った。

4.4 実験結果と考察

表 3 に各モデルによる推定値と実測値の CIE ΔE_{94}^* 色

表 3 キャラクターライゼーションモデルの精度評価結果
Performance result of the characterization model

Average ΔE_{94}^*		SHARP	iiyama	SONY
Masking	5step	3.77	1.66	5.79
Masking	9step	3.52	0.50	4.95
Masking	18step	3.43	0.59	4.52
Masking	32step	3.49	0.37	4.33
S-curve	5step	17.05	3.33	10.26
S-curve	9step	6.73	1.19	6.22
S-curve	18step	6.70	1.93	5.35
S-curve	32step	6.86	1.05	4.29
Polynomial	5step	7.34	4.08	4.45
Polynomial	9step	7.10	2.47	4.43
Polynomial	18step	7.05	2.91	4.40
Polynomial	32step	7.10	2.48	4.43
GOG	5step	7.05	0.76	4.16
GOG	9step	6.86	0.87	4.35
GOG	18step	6.76	1.35	4.11
GOG	32step	6.81	0.75	4.16
LUT		15.20	14.36	13.92
Matrix		3.78	0.99	2.80

差をの平均値を表す。また図 4 にトレーニングデータ数に対する平均色差を表す。なお LUT については、トレーニングデータ数に対し推定精度が低いため、図からは省略した。LUT によって十分な推定精度を実現するには、より多くのトレーニングデータが必要であることがわかる。図 4 から全体的な傾向として、トレーニングデータとして用いる測定値の数が増加するに伴い、推定精度が向上していることがわかる。GOG モデルは、本来 CRT のキャラリゼーションのため用いられるべきであるが、LCD に対しても同じ構造を持つ S-curve モデルや多項式近似に比べ推定精度が高く、測定回数に対しても推定精度が安定していることが理解される。これは、測定に用いた LCD の階調特性が LUT などを用いてガンマカーブを近似しているためであると考えられる。S-curve モデルは測定回数の減少に対し、推定精度が急激に落ちることが確認された。S-curve モデルには、未知であるパラメータが 27 個存在するため、推定精度の急落はこの自由度の高さに起因すると考えられる。行列演算に基づく手法は、すべてのディスプレイにおいて推定精度が高い。これは、チャネル間相互作用を考慮しているためであると考えられるが、XYZ から RGB への逆変換が困難であるため実用的ではない。提案手法である Masking モデルは、SONY PCG-C1MR/BP 以外の LCD では非常に高い推定精度を持つことが理解される。また、本手法では補間を用いるため、トレーニングデータ数による推定精度の変動も緩やかであり、S-curve モデルのような急激な変動はない。唯一、SONY PCG-C1MR/BP では GOG モデルや多項式近似と同程度の推定精度に留まっている。これは次の事実による。図 5 に SONY PCG-C1MR/BP の R チャネル 0~255 の入力レベルに対する XYZ の軌跡を示す。式 (1) の構造を持つモデルでは、R チャネルの XYZ 変動はブラックの XYZ と R255 の XYZ を結んだ直線上の点で近似されることになる。例えば、図 5 にお

図 4 トレーニングデータ数に対する平均色差 ΔE_{94}^* (a)SHARP (b)iiyama (c)SONY
Number of training data vs Average ΔE_{94}^* (a)SHARP (b)iiyama (c)SONY

ける点 A は直線上の点 B に射影される。原点からの距離が射影によって本来よりも短くなるため、式 (1) のモデルでは真の XYZ に比べ低輝度に推定が行われることになる。一方で、表 2 から SONY PCG-C1MR/BP におけるチャンネル間相互作用は輝度を低くするように働くため、前者の曲線を直線で近似する誤差がちょうどチャンネル相互作用による低輝度化の役割を果たす結果となり、ランダムに生成されるため必然的に混色の多い、すなわちチャンネル相互作用の大きいテストデータに対し良好な推定結果をもたらすことになる。

図 5 R チャンネルにおける入力レベルに対する XYZ の変動 (SONY PCG-C1MR/BP)
Tracking of XYZ in R channel (SONY PCG-C1MR/BP)

5. ま と め

本論文では、Masking モデルを用いた液晶ディスプレイのキャリブレーション手法を提案した。本手法は、液晶ディスプレイのキャリブレーションにおいて、従来法の精度低下の原因であったチャンネル間相互作用をマスクングの概念により解決し、高精度な色再現特性の推定を可能にした。また、プライマリカラー色度の変動に起因する誤差を主成分分析の導入により緩和した。本手法は、補間に基づく手法であるため、デバイス依存性が非常に少なく、液晶ディスプレイのみならず弱い非線形性を持つシステムに対し効果的である。

〈付 録〉

A. XYZ から RGB 信号値への変換

本節では実用上重要な XYZ から RGB 信号値への変換方法を述べる。1 次色の指標を $i(i=R,G,B)$, 2 次色の指標を $j(j=C,M,Y)$ とすると式 (6), (7) から

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \{C_i(d_i) - C_i(d_j)\} \mathbf{P}_i + \{C_j(d_j) - C_j(d_{Gr})\} \mathbf{P}_j + C_{Gr}(d_{Gr}) \mathbf{P}_{Gr} + \mathbf{I}_0 \quad (\text{付} \cdot 1)$$

ここで $\mathbf{P}_i$ は式 (8) によって定義されるチャンネル i の主成分ベクトルである。式 (付・1) を変形して

$$\begin{bmatrix} C_i(d_i) - C_i(d_j) \\ C_j(d_j) - C_j(d_{Gr}) \\ C_{Gr}(d_{Gr}) \end{bmatrix} = A^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \mathbf{I}_0 \right\} \quad (\text{付} \cdot 2)$$

where $A = [\mathbf{P}_i \ \mathbf{P}_j \ \mathbf{P}_{Gr}]$

を得る。式 (付・2) の第 3 行目から C_{Gr} の特性は機知であるため、 d_{Gr} を求めることができる。次に第

2 行目から d_{Gr} および C_j の特性から d_j を得る. 同様に d_i を求める. ここで i, j の組合せとしては $(R, M), (R, Y), (G, Y), (G, C), (B, C), (B, M)$ の 6 通りの可能性が考えられるが, すべての組合せについて計算を行い次の条件を満たす (i, j) を選択する.

$$\begin{cases} d_{Gr} \leq d_j \leq d_i \\ 0 \leq d_{Gr}, d_j, d_i \leq 255 \end{cases} \quad (\text{付} \cdot 3)$$

(i, j) の組合せに基づき d_{Gr}, d_i, d_j から d_R, d_G, d_B を求める.

〔文 献〕

- 1) Roy S. Berns, et al: "CRT Colorimetry", COLOR research and application, 18, 5, pp299-325(1993)
- 2) Youngshin Kwak, et al: "Accurate Prediction of Colours on Liquid Crystal Displays", Proceedings the Ninth Color Imaging Conference, pp355-359(2001)
- 3) IEC 61966-4: Multimedia system and equipment - Colour measurement and management - Part 4: Equipment using liquid crystal display panels
- 4) Jason E. Gibson, et al: "Colorimetric Characterization of Three Computer Displays", Munsell Color Sci. Lab. Technical Report(2000)
- 5) Nobuhiko Tamura, et al: "Calibration of LCD Colorimetry Based on Principal Component Analysis", pp1545-1548, proc. Asia Display / IDW'01 (2001)
- 6) Nobuhiko Tamura, et al: Evaluation of image quality on reflective-type LCD - Calibration based on PCA -, proc. IS&T 2001 PICS Conference 2001;368-371
- 7) 三宅洋一: "デジタルカラー画像の解析評価", 東京大学出版会 (2000)
- 8) 大田登: "色再現工学の基礎", コロナ社 (1997)
- 9) 小林駿介: "次世代液晶ディスプレイ", 共立出版 (2000)

たむら のぶひこ
田村 信彦 2000 年 千葉大学工学部情報工学科卒業. 現在, 同大学院修士課程に在学中. 液晶ディスプレイにおける色再現に関する研究に従事

つむら のりみち
津村 徳道 1995 年 大阪大学大学院博士後期課程修了. 博士 (工学). 現在, 千葉大学工学部情報画像工学科情報工学コース 助教授, 1999-2000 米国ロチェスター大学客員助教授. 医用画像工学, 計測画像工学, 色再現工学, 質感再現工学の研究に従事. 工学博士

みやけ よういち
三宅 洋一 1968 年, 千葉大学大学院修士課程修了. 京都工繊大助手, 助教授. 千葉大工助手を経て, 1989 年, 同教授. 1978-1979 年スイス連邦工科大研究員. 1997 年, ロチェスター大客員教授. 2001 年, 東工大フロンティア創造研究センター教授併任. 日本鑑識科学技術学会理事長など歴任. 現在, (社) 日本写真学会会長. IS&T Vice President, IS&T フェロー. 工学博士.