重み付きボロノイ分割の2スキャンアルゴリズム

A Two-Scan Algorithm for Weighted Voronoi Tessellations

正会員 井上 光平[†], 原 健二[†], 浦 浜 喜一[†]

Kohei Inoue[†], Kenji Hara[†] and Kiichi Urahama[†]

Abstract We developed a two-scan algorithm for discrete Voronoi tessellations of digital images. The computation time of our method is independent of the number of Voronoi sites. In addition to the previous additively, multiplicatively, compoundly weighted Voronoi diagrams and the additively weighted power Voronoi diagram, we proposed a new weighted Voronoi diagram, namely the compoundly weighted power Voronoi diagram. These five weighted Voronoi diagrams were efficiently computed with our two-scan algorithm.

キーワード：重み付きボロノイ分割，離散ボロノイ図，2 スキャンアルゴリズム，ジグザグ走査

1. ま え が き

ボロノイ図¹⁾は、画像処理や画像圧縮など様々な目的に幅広く利用されており²⁾、最近ではノンフォトリアリスティックレンダリング³⁾⁴⁾や情報可視化⁵⁾などにも応用されている。これらの応用例では、ボロノイ図を高速に計算することが求められる。そこで本論文では、ボロノイ図の画像処理への応用の基礎として、デジタル画像上での離散ボロノイ分割の高速アルゴリズムを提案する。これまでもボロノイ分割のアルゴリズムは多数提案されており¹⁾、Fortune⁶⁾のsweepline アルゴリズムが有名である⁷⁾。ボロノイ図の母点の個数を N とすると、Fortune⁶⁾のアルゴリズムの計算量は $O(N \log N)$ であるが、渡辺ら⁸⁾は $O(1)$ のアルゴリズムを提案した。他にもグラフィックスハードウェアを利用して高速にボロノイ図を生成する方法^{9)~11)}などが提案されている。

ボロノイ図には多くの拡張方法があるが¹⁾、本論文では特に重み付きボロノイ図を対象とする。本論文で提案するアルゴリズムの計算量は渡辺らのそれと同じ $O(1)$ である。渡辺ら⁸⁾のアルゴリズムは重み付きボロノイ図への拡張が困難であるのに対して、提案手法は各種重み付きボロノイ図に対応できる。重み付きボロノイ図では、乗法的、加法的、複合的重み付きボロノイ図、加法的重み付きべき乗ボロノイ図の四つがよく知られている。提案手法はこれら四つに対して同じ枠組みで対応できる。さらに本論文では、上記四つの重み付きボロノイ図に加えて、新たに複合的重

み付きべき乗ボロノイ図を提案する。この新たなボロノイ図についても上記四つと同じ枠組みのアルゴリズムを提示する。なお、上記以外の重み付きボロノイ図として、乗法的重み付き結晶成長ボロノイ図¹²⁾¹³⁾も提案されているが、これについては本論文では対象にしない。

本論文では、 3×3 のウィンドウによる2回の走査でデジタル画像をボロノイ分割するアルゴリズムを提案する。このようなアルゴリズムは、2スキャンアルゴリズムと呼ばれる¹⁴⁾。提案手法では、母点の個数 N が増えても2スキャンでボロノイ図が求まる。このことから、提案手法の計算量は N に依存しない $O(1)$ であることがわかる。また提案手法は、グラフィックスハードウェアなどを用意する必要がない。

以下、2章では、各種重み付きボロノイ分割の定義を示し、それらを体系的観点から捉えることによって、これまでに提案されていない重み付きボロノイ分割を見つけて新たに定義する。3章では、各種重み付きボロノイ分割の2スキャンアルゴリズムを提案する。4章では、実験結果を示し、5章では、むすびとして今後の課題等を述べる。

2. 重み付きボロノイ分割

デジタル画像平面をボロノイ分割することを考える。ボロノイ図の母点は画像を構成する画素の中から選ばれ、母点画素以外の画素を最近傍母点のボロノイ領域に分類することによって、画面をボロノイ分割する。母点には番号 $k \in \mathcal{N}$ を付けて個々の母点を区別する。ここで $\mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$ であり、 N は母点の総数である。任意の画素の座標を p と表し、 k 番目の母点の座標を p_k と表す。通常のユークリッド距離に基づくボロノイ分割 (ordinary Voronoi diagram) では

2006 年 3 月 30 日受付, 2006 年 5 月 16 日採録

[†]九州大学 大学院芸術工学研究院 視覚情報部門

(〒 815-8540 福岡市南区塩原 4-9-1, TEL 092-553-4512)

[†] Faculty of Design, Kyushu University

(4-9-1, Shiobaru, Minami-ku, Fukuoka-shi, 815-8540 Japan)

$$\|p - p_k\| \leq \|p - p_{k'}\| \quad (\forall k' \neq k, k' \in \mathcal{N}) \quad (1)$$

のときに画素 p を k 番目の母点 p_k のボロノイ領域に含める。これは p に番号 k を付けるラベリング処理と捉えることができる。重み付きボロノイ分割では、ボロノイ図の各母点に重みを考え、(1) 式のユークリッド距離を重み付き距離等に拡張する。すなわち、 p, p_k および重みの集合 W_k の関数 $d(p, p_k, W_k)$ に関して

$$d(p, p_k, W_k) \leq d(p, p_{k'}, W_{k'}) \quad (\forall k' \neq k, k' \in \mathcal{N}) \quad (2)$$

のときに p を第 k ボロノイ領域に含める。これまでに、乗法的、加法的、複合的重み付きボロノイ図、加法的重み付き乗ボロノイ図の四つが知られており、それらの定義は以下の通りである。乗法的重み付きボロノイ分割では、 W_k は正の重み $w_k > 0$ を要素とする集合 $W_k = \{w_k\}$ として

$$d(p, p_k, W_k) = \frac{\|p - p_k\|}{w_k} \quad (3)$$

とする。加法的重み付きボロノイ分割では、 $W_k = \{\tilde{w}_k | \tilde{w}_k > 0\}$ として

$$d(p, p_k, W_k) = \|p - p_k\| - \tilde{w}_k \quad (4)$$

とする。複合的重み付きボロノイ分割では、 $W_k = \{w_k, \tilde{w}_k | w_k > 0, \tilde{w}_k > 0\}$ として

$$d(p, p_k, W_k) = \frac{\|p - p_k\|}{w_k} - \tilde{w}_k \quad (5)$$

とする。加法的重み付き乗ボロノイ分割では、 $W_k = \{\tilde{w}_k | \tilde{w}_k > 0\}$ として

$$d(p, p_k, W_k) = \|p - p_k\|^2 - \tilde{w}_k \quad (6)$$

とする。(3),(4),(5) 式がユークリッド距離 $\|p - p_k\|$ に基づくのに対して、(6) 式はユークリッド距離の2乗(2乗距離と略称する) $\|p - p_k\|^2$ に基づいている。重みの付け方には、乗法的、加法的、複合的の3通りがあり、距離の種類にはユークリッド距離と2乗距離の2通りがあるので、それらの組合せの総数は6となる。すなわち、上記四つの重み付きボロノイ分割のほかに、乗法的重みと2乗距離の組合せである乗法的重み付き乗ボロノイ分割、複合的重みと2乗距離の組合せである複合的重み付き乗ボロノイ分割の二つが考えられる。乗法的重み付き乗ボロノイ分割では、 $W_k = \{w_k | w_k > 0\}$ として

$$d(p, p_k, W_k) = \frac{\|p - p_k\|^2}{w_k} \quad (7)$$

とする。しかしこれは $w'_k = \sqrt{w_k}$ とすると、 $W_k = \{w'_k | w'_k > 0\}$ を重みとする乗法的重み付きボロノイ分割に帰着するので新規性はない。複合的重み付き乗ボロノイ分割では、 $W_k = \{w_k, \tilde{w}_k | w_k > 0, \tilde{w}_k > 0\}$ として

$$d(p, p_k, W_k) = \frac{\|p - p_k\|^2}{w_k} - \tilde{w}_k \quad (8)$$

$TL(p)$	$T(p)$	$TR(p)$
$L(p)$	p	$R(p)$
$BL(p)$	$B(p)$	$BR(p)$

図1 p の隣接画素
Neighboring pixels of p .

とする。これは重みをどのように調節しても上記四つの重み付きボロノイ分割に帰着しない新しい重み付きボロノイ分割法である。

次章では、上記5種類の重み付きボロノイ分割の2スキャンアルゴリズムを提案する。

3. 重み付きボロノイ分割の2スキャンアルゴリズム

母点の座標を $p_k = (i_k, j_k)$ とし、任意の点の座標を $p = (i, j)$ とする。各座標値の差の絶対値を $r_{ki} = |i - i_k|$, $r_{kj} = |j - j_k|$ とすると、 p_k から p までのユークリッド距離を2乗したもの(2乗距離と呼ぶことにする)は $D_k^2(p) = r_{ki}^2 + r_{kj}^2$ で計算できる。これを用いると p の隣接画素 $(i, j+1)$ までの2乗距離は $D_k^2(i, j+1) = r_{ki}^2 + (r_{kj}+1)^2 = r_{ki}^2 + r_{kj}^2 + 2r_{kj} + 1 = D_k^2(p) + 2r_{kj} + 1$ と表せる。同様に $(i+1, j+1)$ までの2乗距離は $D_k^2(i+1, j+1) = D_k^2(p) + 2(r_{ki} + r_{kj} + 1)$ と表せる。以下では r_{ki}, r_{kj} をまとめて $r_k(p) = (r_{ki}, r_{kj})$ と表すことにする。このように、 p_k から p の隣接画素までの2乗距離は $D_k^2(p), r_k(p)$ を用いて計算できるので、これらの値を隣接する画素に次々と伝播させていけば、母点からの2乗距離を効率的に計算することができる。本論文では、 $D_k^2(p), r_k(p)$ に加えて母点番号も同時に伝播させることによって、画像平面を高速にボロノイ分割するアルゴリズムを提案する。

まず p の隣接画素を図1のように表す。2乗距離の伝播式は伝播の方向(上下、左右、斜め)によって3通りに場合分けされる。そこで p の隣接画素を三つの集合

$$V(p) = \{T(p), B(p)\} \quad (9)$$

$$H(p) = \{L(p), R(p)\} \quad (10)$$

$$C(p) = \{TL(p), TR(p), BL(p), BR(p)\} \quad (11)$$

に分ける。 p の隣接画素の一つを $q = (i', j')$ とすると、 q から p への伝播による2乗距離の増加分は

$$h(p, q) = \begin{cases} 2r_{ki'} + 1 & q \in V(p) \\ 2r_{kj'} + 1 & q \in H(p) \\ 2(r_{ki'} + r_{kj'} + 1) & q \in C(p) \end{cases} \quad (12)$$

と表される。すなわち q から p への2乗距離の伝播は

$$D_k^2(p) = D_k^2(q) + h(p, q) \quad (13)$$

と表される。 q から p への伝播による $r_k(p)$ の変化分は

$$g(p, q) = \begin{cases} (1, 0) & q \in V(p) \\ (1, 0) & q \in H(p) \\ (1, 1) & q \in C(p) \end{cases} \quad (14)$$

と表される．すなわち q から p への $r_k(p)$ の伝播は

$$r_k(p) = r_k(q) + g(p, q) \quad (15)$$

と表される．本論文で提案するアルゴリズムの基本は， p の隣接画素（図 1）の中から (13) 式の値が最小になる画素 q^* を選び， q^* から p へと 2 乗距離を伝播させるというものである．全画素について，隣接する八つの画素すべてを調べるには，画像を 2 回走査する必要がある．このように画像を 2 回走査するアルゴリズムは 2 スキャンアルゴリズムと呼ばれる¹⁴⁾．走査方法としては，まず各行を左から右に走査するというのを上の行から下の行まで順に行い，次に各行を右から左に走査するというのを下の行から上の行まで順に行うラスタ走査が標準的であるが⁵⁾，偶数行と奇数行で走査方向を交替するジグザグ走査¹⁵⁾のほうが精度がよいことが知られているので，本論文では後者のジグザグ走査を採用することにする．ジグザグ走査では， p の隣接画素を四つの部分集合

$$FF(p) = \{L(p), TL(p), T(p), TR(p)\} \quad (16)$$

$$FB(p) = \{R(p), TR(p), T(p), TL(p)\} \quad (17)$$

$$BF(p) = \{L(p), BL(p), B(p), BR(p)\} \quad (18)$$

$$BB(p) = \{R(p), BR(p), B(p), BL(p)\} \quad (19)$$

に分ける． p へ 2 乗距離を伝播できる隣接画素は p よりも前に伝播が終了している 4 画素であり，ジグザグ走査の場合，上記 4 通りの組合せが考えられる．以上の準備の下で，重み付きボロノイ分割の 2 スキャンアルゴリズムは次のようになる．

【重み付きボロノイ分割の 2 スキャンアルゴリズム】

Step 0: (初期化) 任意の点 p における最近傍母点からの 2 乗距離を $D^2(p)$ とし，母点画素 p_k については $D^2(p_k) = 0$ ，母点でない画素 p については $D^2(p) = \infty$ と初期化する．任意の画素 $p = (i, j)$ における最近傍母点との座標値の差の絶対値を $r(p) = (r_i, r_j)$ とし，すべての画素 p について $r(p) = (0, 0)$ と初期化する．任意の画素 p のラベルを $K(p)$ とし，母点画素 p_k について $K(p_k) = k \in \mathcal{N}$ ，母点でない画素 p については $K(p) = 0$ と初期化する．

Step 1: (第 1 走査) 上の行から下の行へと 1 行ずつ順にすべての行を見ていき，注目行が奇数なら左から右へと走査し，注目行が偶数なら右から左へと走査する．走査途中での注目画素 p が母点でなければ次の処理を行う． p が奇数行に含まれるなら Step 1-1 へ，偶数行に含まれるなら Step 1-2 へと進む．

Step 1-1: $D_{\min}^2(p) = \min_{q \in FF(p)} \{f(p, q)\}$ を求めて Step 1-3 へ進む．

Step 1-2: $D_{\min}^2(p) = \min_{q \in FB(p)} \{f(p, q)\}$ を求めて Step 1-3 へ進む．

Step 1-3: $D_{\min}^2(p) < D^2(p)$ なら $D^2(p) =$

$\phi(p, q_{\min}), r(p) = r(q_{\min}) + g(p, q_{\min}), K(p) = K(q_{\min})$ と更新する．ここで $q_{\min}$ は $D_{\min}^2(p)$ を与える q である．

Step 2: (第 2 走査) 下の行から上の行へと 1 行ずつ順にすべての行を見ていき，注目行が奇数なら右から左へと走査し，注目行が偶数なら左から右へと走査する．走査途中での注目画素 p が母点でなければ次の処理を行う． p が奇数行に含まれるなら Step 2-1 へ，偶数行に含まれるなら Step 2-2 へと進む．

Step 2-1: $D_{\min}^2(p) = \min_{q \in BB(p)} \{f(p, q)\}$ を求めて Step 2-3 へ進む．

Step 2-2: $D_{\min}^2(p) = \min_{q \in BF(p)} \{f(p, q)\}$ を求めて Step 2-3 へ進む．

Step 2-3: $D_{\min}^2(p) < D^2(p)$ なら $D^2(p) = \phi(p, q_{\min}), r(p) = r(q_{\min}) + g(p, q_{\min}), K(p) = K(q_{\min})$ と更新する．

以上が重み付きボロノイ分割の 2 スキャンアルゴリズムであり，最終的にラベリング処理の結果が $K(p)$ に格納される．上記アルゴリズム中の関数 $f(p, q), \phi(p, q_{\min})$ は，乗法的重み付きボロノイ分割では

$$f(p, q) = \frac{D^2(q) + h(p, q)}{w_{K(q)}^2} \quad (20)$$

$$\phi(p, q_{\min}) = w_{K(q_{\min})}^2 D_{\min}^2(p) \quad (21)$$

であり，加法的重み付きボロノイ分割では

$$f(p, q) = \sqrt{D^2(q) + h(p, q)} - \tilde{w}_{K(q)} \quad (22)$$

$$\phi(p, q_{\min}) = [D_{\min}(p) + \tilde{w}_{K(q_{\min})}]^2 \quad (23)$$

であり，複合的重み付きボロノイ分割では

$$f(p, q) = \frac{\sqrt{D^2(q) + h(p, q)}}{w_{K(q)}} - \tilde{w}_{K(q)} \quad (24)$$

$$\phi(p, q_{\min}) = w_{K(q_{\min})}^2 [D_{\min}(p) + \tilde{w}_{K(q_{\min})}]^2 \quad (25)$$

であり，加法的重み付きべき乗ボロノイ分割では

$$f(p, q) = D^2(q) + h(p, q) - \tilde{w}_{K(q)} \quad (26)$$

$$\phi(p, q_{\min}) = D_{\min}^2(p) + \tilde{w}_{K(q_{\min})} \quad (27)$$

であり，複合的重み付きべき乗ボロノイ分割では

$$f(p, q) = \frac{D^2(q) + h(p, q)}{w_{K(q)}} - \tilde{w}_{K(q)} \quad (28)$$

$$\phi(p, q_{\min}) = w_{K(q_{\min})} [D_{\min}^2(p) + \tilde{w}_{K(q_{\min})}] \quad (29)$$

である．なお， $w_0 = 1, \tilde{w}_0 = 0$ とする． $w_0 = 1$ は 0 割を避けるためである．

図 2 ボロノイ領域が不連続になる例: (a) 正確なボロノイ分割, (b) 2 スキャンアルゴリズムによる結果

Example of discontinuous Voronoi region: (a) Correct Voronoi tessellation, (b) Result by two-scan algorithm.

図 3 計算時間
CPU time.

4. 実験

まず, 図 2 に示す簡単な例¹⁶⁾で提案手法の性質を説明する. 図 2(a),(b) に示す画像 (画素数は 13×15) は黒画素を母点とする通常のボロノイ分割の結果を示したものである. 図 2(a) は正確なボロノイ分割の結果である. 三つのボロノイ領域を異なる濃淡で塗り分けている. 正確なボロノイ分割にもかかわらず, 中段のボロノイ領域は右上の先端部分が途切れている. このようなボロノイ領域の不連続性は, ノンフォトリアリスティックレンダリングなどへの応用では望ましくない. それに対して, 図 2(b) の 2 スキャンアルゴリズムによる結果では, 図 2(a) のような不連続なボロノイ領域は生じない. 2 スキャンアルゴリズムでは母点からの 2 乗距離などの伝播が隣接画素に限られるため, ボロノイ領域の連続性が保たれる.

次に計算時間を比較した結果を示す. 画素数 300×400 の画像上に N 個の母点をランダムに配置して各種重み付きボロノイ図を作成するのに要する時間を測定した結果を図 3 に示す. 横軸は母点の個数 N であり, 縦軸は時間である. 実線は高速化を行わずに, 各画素について全母点との距離を計算してボロノイ図を作成するのに要する時間であり, 粗い破線, 中程度の破線, 細かい破線, 細かい一点鎖線, 粗い一点鎖線はそれぞれ乗法的, 加法的, 複合的重み付きボロノイ分割, 加法的重み付きべき乗, 複合的重み付きべき乗ボロノイ分割の 2 スキャンアルゴリズムでの時間である. 提案手法では, 母点の個数 N が増えても計算時間はほとんど変わらないことがわかる. 2 スキャンアルゴリズムによる

図 4 乗法的重み付きボロノイ図
Multiplicatively weighted Voronoi diagram.

図 5 加法的重み付きボロノイ図
Additively weighted Voronoi diagram.

図 6 複合的重み付きボロノイ図
Compoundly weighted Voronoi diagram.

図 7 加法的重み付きべき乗ボロノイ図
Additively weighted power Voronoi diagram.

各種重み付きボロノイ図の生成結果を図 4~図 8 (順に乗法的, 加法的, 複合的重み付きボロノイ図, 加法的重み付きべき乗ボロノイ図, 複合的重み付きべき乗ボロノイ図である) に示す. 母点の個数は 30 とし, 位置はランダムに与えた. $[0, 1]$ の範囲の一樣乱数を γ とするとき, 加法的重みは $30\gamma + 0.1$, 乗法的重みは $3\gamma + 0.1$ によって生成した. なお計算環境は, Pentium 4 CPU 3.4GHz, 2GB RAM, OS: Windows XP, プログラミング言語: Visual C++ である.

図 8 複合的重み付きべき乗ボロノイ図
Compoundly weighted power Voronoi diagram.

5. む す び

2回の走査(2スキャン)でデジタル画像を離散ボロノイ分割するアルゴリズムを提案し、計算時間が母点の個数によらないことを実験で確認した。また、従来の各種重み付きボロノイ分割に加えて、新たに複合的重み付きべき乗ボロノイ分割を提案し、その2スキャンアルゴリズムも示した。2スキャンアルゴリズムではボロノイ領域の連続性が保たれることも簡単な例で示した。提案手法を高次元離散空間の重み付きボロノイ分割に拡張するのが今後の課題である。

〔文 献〕

- 1) A. Okabe, B. Boots, K. Sugihara and S. N. Chiu: Spatial Tesselations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams, Second Edition, John Wiley & Sons (2000)
- 2) The Voronoi Web Site, <http://www.voronoi.com/index.htm>
- 3) A. Secord: "Weighted Voronoi stippling," Proceedings of the second international symposium on Non-photorealistic animation and rendering (NPAR 2002), pp. 37-43 (2002)
- 4) ヘンリー ジョハン, 松井一, 芳賀俊之, 土橋宜典, 西田友是: "領域ベース・ストロークベースのアート風画像生成法," 信学論, **J88-D-II**, 2, pp. 358-367 (Feb. 2005)
- 5) M. Balzer and O. Deussen: "Voronoi treemaps," IEEE Symposium on Information Visualization 2005 (Oct. 2005)
- 6) S. Fortune: "A sweepline algorithm for Voronoi diagrams," Algorithmica, **2**, 2, pp. 153-174 (1987)
- 7) K. Wong and H. A. Muller: "An efficient implementation of Fortune's plane-sweep algorithm for Voronoi diagrams," Technical report DCS-182-IR, Department of Computer Science, University of Victoria, Victoria, BC, Canada, (Oct. 1991)
- 8) 渡辺貴史, 村島定行: "2次元離散ボロノイ図を $O(1)$ の計算時間で描く方法," 信学論, **J79-D-I**, 3, pp. 114-122 (Mar. 1996)
- 9) K. E. Hoff III, T. Culver, J. Keyser, M. Lin and D. Manocha: "Fast computation of generalized Voronoi diagrams using graphics hardware," SIGGRAPH '99, pp. 277-286 (1999)
- 10) 寺本幸生: "ハードウェア支援による各種ボロノイ図の高速算法とその応用," 北陸先端科学技術大学院大学, 修士論文 (Mar. 2003)
- 11) 山本修身: "グラフィックスハードウェアを用いたボロノイ図の描画とその周辺," 東京大学空間情報科学研究センターシンポジウム「GISのツール:開発者と利用者の視点から」 (Mar. 2005)
- 12) B. F. Schaudt and R. L. Drysdale: "Multiplicatively weighted crystal growth Voronoi diagram," Proceedings of the Seventh Annual Symposium on Computational Geometry, pp. 214-223 (Jun. 1991)
- 13) 小林景, 杉原厚吉: "乗法重みつき結晶成長ボロノイ図の近似構成法とその応用," 信学論, **J83-A**, 12, pp. 1495-1504 (Dec. 2000)
- 14) F.Y. Shih and Y.-T. Wu: "Fast Euclidean distance transformation in two scans using 3×3 neighborhood," Computer Vision and Image Understanding, **93**, 2, pp. 195-205 (Feb. 2004)
- 15) 井上光平, 辻本陽子, 原健二, 浦浜喜一: "2スキャンアルゴリズムによるユークリッド距離変換の高精度化," 信学論, **J88-D-II**, 3, pp. 657-660 (Mar. 2005)
- 16) O. Cuisenaire and B. Macq: "Fast Euclidean distance transfor-

mation by propagation using multiple neighborhoods," Computer Vision and Image Understanding, **76**, 2, pp. 163-172 (Nov. 1999)

井上 光平 1996年, 九州芸術工科大学画像設計学科卒業。2000年, 同大学大学院博士後期課程修了。現在, 九州大学大学院芸術工学研究院助手。パターン認識, 画像処理, コンピュータビジョンに関する研究に従事。正会員。

原 健二 1987年, 京都大学工学部数理工学科卒業。1989年, 同大学院修士課程修了。同年, 武田薬品工業(株)入社。1991年, 福岡県工業技術センター入所。2001年, 東京大学生産技術研究所協力研究員。1999年, 九州大学大学院システム情報科学研究科博士課程修了。現在, 九州大学大学院芸術工学研究院助教授。コンピュータビジョンの研究に従事。

浦浜 喜一 1980年, 九州大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年, 同大学助手。1989年, 九州工業大学助教授。現在, 九州大学大学院芸術工学研究院教授。パターン認識, 画像情報処理の研究に従事。