Sumi-Nagashi: 作家の感性を刺激する触感を持つ絵の具によるデジタル作画ツール

吉田 俊介[†] 棚沢 順[†,††] 野間 春生[†]
須佐見 憲史[†] 柳田 康幸[†,☆]
鉄谷 信二[†,☆☆] 保坂 憲一[†]

デジタル技術の進展に伴い芸術の分野においても多様な表現手法を選択することが可能となった．絵画においても既存のデジタルツールは作業を効率化する上では有用ではあるが，芸術的な創作活動において重要である作者の身体性という要素を，作品としてのデジタルな絵画に取り入れることは困難であった．本システム「Sumi-Nagashi」は，キャンバスの触感やデジタルな絵の具の仮想的な属性を，作家が体感しつつ作品を創りあげることを可能とする一種のデジタルツールである．ユーザは筆型のデバイスを手に持ち動かすとき，その場の色の状態に応じた属性を体感する．例えば「色の重さ」という概念を定義することにより，心理知覚的な印象に応じて暗い色からは重く，明るい色からは軽い感触を，筆を持つ手で感じることができるようにする．絵画より生じる触感（力覚）を提示するための装置としてここでは「Proactive Desk」と呼ばれる 2 次元の力覚ディスプレイを用いた．既存の力覚提示を伴うデジタル作画ツールは，主に視覚的にも触覚的にも正しい絵画のシミュレータとなるべく開発されてきた．しかしながら我々は，デジタルならではの表現を用い，感性への新たな刺激を作家らに与える手段の提供こそが重要であると考える．本システムはデジタルな絵の具に対する意味付けを通じ，ユーザに創造的な芸術活動にいかに身体性が重要であったかを再認識させる機会を与える．

Sumi-Nagashi: Digital Painting Tool using Haptised Virtual Colors to Stimulate Creator's Senses

Shunsuke Yoshida,[†] Jun Kurumisawa,[†,††] Haruo Noma,[†]
Kenji Susami,[†] Yasuyuki Yanagida,[†,☆] Nobuji Tetsutani[†,☆☆]
and Kenichi Hosaka[†]

Nowadays, artists acquired various digital methods for creating their artworks. Current digital tools are useful to get more efficient at the process of drawing. However, it has been difficult to incorporate into these artworks the important element of the artist's corporeality, which is required for the creative work as a result. This system "Sumi-Nagashi" provides painters with a method for feeling attributes of digital colors and a fluid canvas. When a user of this system moves the stylus paintbrush over the digital canvas, he/she senses the "weight of the colors" through the brush. For example, the user experiences dark colors as heavy in weight and light colors as light in weight. Complex painting is expressed as a mixed tactile sensation using a new desk-style force feedback system called the "Proactive Desk." Other existing digital painting systems that use haptic cues usually aim to be physically and visually correct. In this approach, however, we invested effort in enhancing the relationship between digital colors as a virtual material and the sense of touch. We believe that this experience will arouse new inspiration and give digital painters the opportunity to experience again how important touch is for creativity in art.

† ATR メディア情報科学研究所
ATR Media Information Science Laboratories
†† 千葉商科大学
Chiba University of Commerce
☆ 現在，名城大学
Presently with Meijo University
☆☆ 現在，東京電機大学

1. はじめに

デジタル革命は芸術の分野にも大きな変化をもたらした．最先端の表現を求めるある種のアーティスト

Presently with Tokyo Denki University

（作家）らにとっては，現代においてコンピュータを道具として選択することは自然な傾向であったとも言える．しかしながら，現在のデジタル技術によって表現可能な形態は，コンピュータグラフィクスや音楽のような視覚や聴覚に訴えかけるものが主流であり，創作活動においてはディスプレイやマウスを用いた典型的なグラフィカルユーザインタフェースを通じてのみしか作家は作品と対話できず，鑑賞者も同様である．その結果，創造的な作業に必要とされる作家と鑑賞者の身体性，すなわち人の体が持つすべての感覚を活用した対話という重要な要素を，デジタルアートの世界では作品に取り込むことが難しくなってしまった．

芸術における身体の重要性は，芸術に関わる全ての者，特に作家らは強く認識するところであった．自らが関わる素材と道具とを体で会話し，深く感じるところから人を魅了する芸術は誕生するという[1)~3)]．いわゆるデジタルアーティストらはそういった体感を，存在しない道具と主に視覚の属性しか持たないデジタルな素材を用いて，あたかも実在し，触っているかのように自らの想像力で無理やり補完することにより，作品を創りあげてきた．すなわちこれは，ごく限られた生命体としての感覚のみを用い，全ての感覚が利用できた従来の芸術分野と同等の仕事をしなければならない状態に置かれていたとも言える．これがデジタルアートやメディアアートに他の芸術分野と比較して，多角的な創造性に限界があるように感じられる要因のひとつである．しかしながらこれをもってこの分野に将来性が無いと言う事は早計であり，単にそのための道具が未熟なだけであると我々は考える．

本研究はデジタルアートの世界に身体性を取り入れるためのひとつの試みであり，視覚と触覚の融合した新しい芸術の可能性を示すものである．本稿では逐次変化する絵画の流れを視覚的にも触覚的にも得ることができるシステム「Sumi-Nagashi」を示し，作家と鑑賞者が体感できる新しいデジタルツールの形を提案する（**図 1**）．

2. Sumi-Nagashi

2.1 コンセプト

タイトルのモチーフである「墨流し」は日本の伝統的な絵画手法のひとつであり，静止した水面に墨を流し，針や風を使い水面を乱すことで刻一刻と変化する模様を生み出す．そしてその一瞬の状態の美しさを和紙に写し取る表現形態を持つ[4)]．生理的な水と身体との関係から水をモチーフとした手法や作品は多いが，墨流しも水をメディアとした対話性に富む手法である．

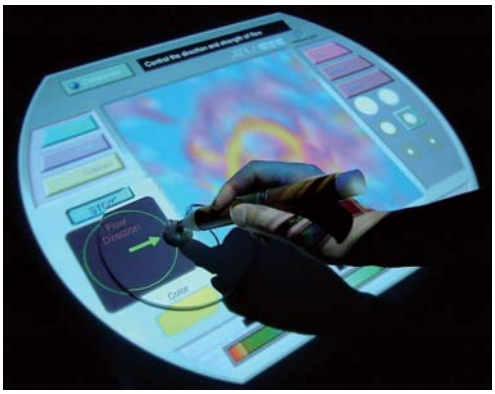

図 1 「Sumi-Nagashi」の体験風景
Fig. 1 Installation “Sumi-Nagashi.”

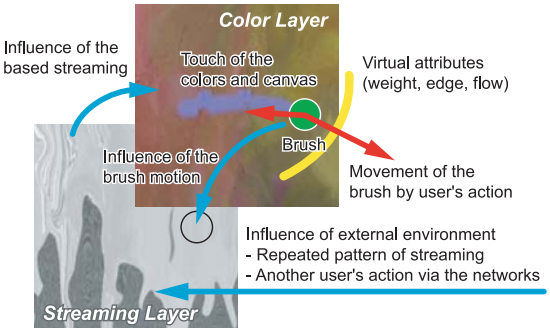

図 2 二つのレイヤの構造
Fig. 2 The structure of two layers.

この対話性と動的な変化の様は，近年のデジタルアートやメディアアートに通じる物があり，これがデジタルな作品に触れることが可能なこのシステムのモチーフとした理由でもある．

本システムは作画過程が体感できる一種のデジタルペイントツールであり，キャンバスに見立てた机の上に直接絵を描くかのように，ユーザは筆型の入力デバイスを操作することでデジタルな作品を描くことができる．これらの作画過程の実現には通常のデジタルペイントと同様な手法を用いるが，本システムではさらに流れを持つデジタルキャンバスを実現するための仕組みを用意する．キャンバスには通常の作画の状態が保持される色の層（カラーレイヤ）に加えて仮想的な流れを持つ層（ストリーミングレイヤ）を定義する（**図 2**）．ストリーミングレイヤの各場所における流れの向きや強さはユーザの行動により変化し，その流れがカラーレイヤの色にも反映される．これにより，刻一刻と変化しつつ新しい絵が生み出される動きのある絵画を創り出す（**図 3**）．

このような視覚的な作画過程の体験に加え，さらに触

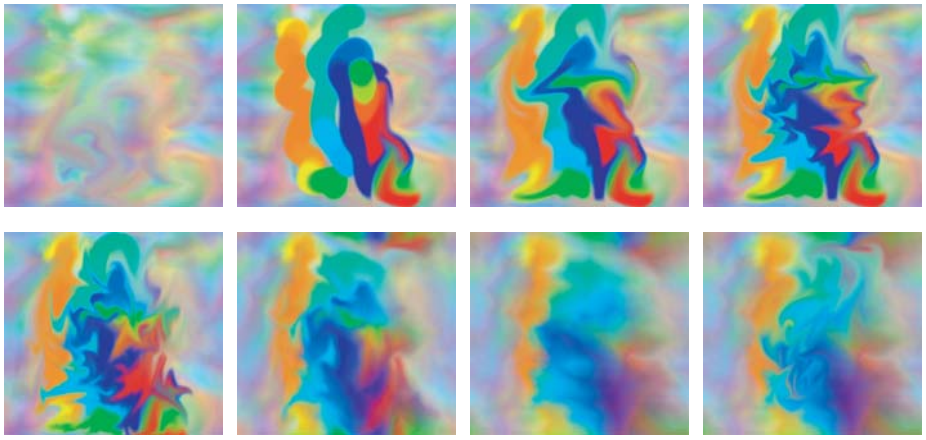

図 3 視覚と触覚が調和するデジタルな絵の具を用いた新たなメディアアートの創作
Fig. 3 Creation of a new style media art using digital paints in a harmonization of the senses of vision and touch.

覚的な体験をユーザに与えるため,「Proactive Desk[5]」と名付けた新しい力覚ディスプレイを用いてシステムを構築した．この装置では，コンピュータにより計算される描画動作の結果としての反力が，ユーザが把持する筆型のデバイスに物理的な平面方向に移動させられる力として伝わる．

これを用いて，本システムでは伝統的な絵画には存在しない仮想的な触覚の属性を色に付加することにより，色から受ける印象を視覚だけではなく触覚的にも得ながら絵を描くことができるようにした．例えば，デジタルな絵の具の属性として「色の重さ」という概念を定義し，心理知覚的な印象に応じて暗い色からは重く，明るい色からは軽い感触を，筆を持つ手で文字通り体感できるようにした．これにより，創造的な芸術の作業の中に含まれる身体性の重要さやその過程の楽しさを，デジタルアーティストだけではなく絵を描く全ての人々に再認識させることを試みる．

2.2 関連研究

Painter[6] に代表される描画ソフトウェアは，既に多くのデザイナにとって一般的なデジタルツールとなっている．これらは，例えば無制限なやり直し操作など，伝統的な作画の道具と比較して多くの利点を持つことは明らかである．一般的な作画過程は，入力デバイスより得られる作画時のストロークや筆圧を入力とし，現実のタッチを模倣するための適切なシミュレーションを行った後，その結果がモニタに視覚的な情報として提示される．これらは表現的に正確な絵画の作成を目的としており，視覚以外には絵からのフィードバックを得ることはできないが，作画の目的だけであればそれだけで十分である．

これに対し，デジタルツールに視覚以外の属性をも付加する試みとして，力覚ディスプレイを用いた触覚的にも正しい制作環境の構築に関する研究がある[7)~10)]．例えば DAB は現実の作画過程を筆とキャンバスの三次元的な物理的モデルを用いて再現した作画シミュレータである[8]．入出力装置として力覚ディスプレイ PHANToM[10] を用い，マウスの代わりに 6 軸の自由度を持つスタイラスを操作して描画のストロークを得る．これによりコンピュータ内の筆のモデルの姿勢が更新され，筆とキャンバスとが接触したと判定されたとき，その物理的なモデルに基づいて，接触面の計算や適切な抵抗力を算出する．シミュレーション結果はモニタ上に視覚的に表示されると同時に，スタイラスを通じてユーザの手にも物理的な力として帰される．

これらは実際の技法をデジタル化した優れたシミュレータではあるが，この手段がいかに作家の新たなインスピレーションを呼び起こせるかという点に着目すると，これらは従来の作画行程と何ら変わりが無く，単なる作業性を向上させたツールでしかない．

本研究の目的は，誇張された属性や現実には存在しない感触をデジタルな創作環境に持ち込むことにより，従来の創作活動に存在する身体性の持つ意味や楽しさを認識できるようにすることであり，描画のための忠実なシミュレータの開発ではない．新しいハードウェアとデジタルメディアを用い，デジタルな絵の具と，流れを持つキャンバスに触れるための手段を提供することにより，鑑賞者に対しても，より直接的に作品というメディアを通じて作家の身体性を伝えることを試みる．

3. アプリケーション

3.1 デジタルな絵の具の感触

本研究において色（視覚）と触覚との関係を構築するために特に意識したことは，粘性のある絵の具を扱う感覚である．例えば，色情報の境界に生ずる視覚的な差異や，描画を行う段階での絵の具の構造的な段差，視覚的，心理的に重い色，軽い色といった感覚的な重み付けなどを考慮した．以下ではまず始めに視覚的な情報生成に関連する画像のレンダリング手法について述べ，次に色の属性に関連づけられた触覚のレンダリング手法について述べる．

3.2 視覚に関するレンダリング

3.2.1 カラーレイヤ：描画機能

本作品において用意された描画機能は，他の一般的なデジタルペイントと同様なものである．以下で説明される三つのツールはカラーレイヤに働きかける最も基本的な機能である．これらの機能はキャンバス上のアイコンを使い選択する．**図 4** にこれらを使い作成した絵を示す．

Paint 最も基本的な機能であり，筆の軌跡に選択中の色が置かれる．筆の大きさや色はサムネイルやセレクタを用いて編集する．

Smudge 未乾燥の絵の具を塗り広げるかのように，既にキャンバス上に存在する色を伸ばし広げたり，混ぜ合わせたりする機能．実装的には筆の位置のテクスチャを，透過度を掛け合わせつつ連続的にコピーしている．**図 5** にこの機能を用いた幾つかの例を示す．これは 4 種類の異なるパラメータで下方向に筆を走らせたものであり，左二つが大きめの筆で低い透過度と高い透過度を持つ例．右二つが小さめの筆での同様な例である．

Stamp キャンバス上にあらかじめ用意された絵を置く機能．キャンバス上に並ぶサムネイルから一つを選択し，スタンプを押すかのように絵をキャンバスに加えることができる．

3.2.2 ストリーミングレイヤ：流れる効果

上記の機能によりカラーレイヤに置かれた色は，ストリーミングレイヤの機能が有効であった場合，その流れに沿って徐々に流されてゆく．ストリーミングレイヤは，2 次元速度ベクトルの場として定義される物であり，本実装では計算量の問題から，特定の向きと動きのパターンを持つデータとして用意した．ここでの流れデータは，単調な映像変化となることを避け，水の流れる様に近くなるよう，各領域において方向と強さがそれぞれある程度の幅で独立して変動するようにした．全体的な流れの向きと強さは，キャンバスの脇に配置されたコントローラを使いユーザが自由に設定することができる．将来的には，実時間での流体シミュレーションの導入や，風や水滴で水面に広がる波紋のような局所的な流れを制御する手段を用意する予定である．色を流すかのような視覚的な効果は，以下の式を用いて計算される．

図 4 基本機能により描かれた絵
Fig. 4 Picture drawn using basic painting functions.

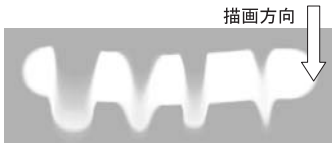

図 5 異なる Smudge 機能を用いた作画例
Fig. 5 Effects using different “Smudge” brushes.

$$C(t+\Delta t)[x,y] = C(t)[x - V'_x, y - V'_y] \quad (1)$$

$$\vec{V}' = M \cdot \vec{V}(t)[x,y] \quad (2)$$

ここで，$C(t)[x,y]$ は時刻 t の座標 $[x,y]$ におけるキャンバスの色であり，$\vec{V}(t)[x,y]$ は流れの向きと強さを表す 2 次ベクトルである．M は全体的な流れの向きと強さを決定する回転とスケーリングの要素を含む 2×2 の変換行列であり，V'_x と V'_y はベクトル $\vec{V}'$ の x 成分と y 成分をそれぞれ表す．**図 6** に仮想的な流れの中に浮かぶ色の様子を示す．Paint 機能を用いて描かれた文字（図 6 左）は，ストリーミングレイヤの流れに従って溶けていくかのように流されていく（図 6 右）．

3.3 触覚に関するレンダリング

ユーザは筆を動かすと，視覚的な変化の知覚に合わせて，手に持つデバイスからも触覚的な変化が知覚できる．本作品では**図 7** のようにモデル化した 3 種類

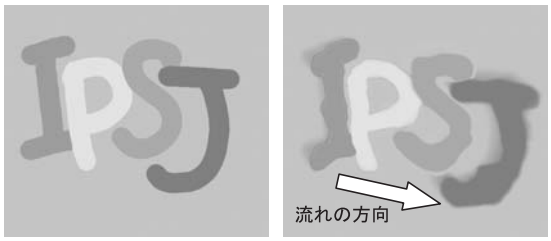

図 6 流れの影響により揺らめく絵画
Fig. 6 A melting image by influence of the streaming.

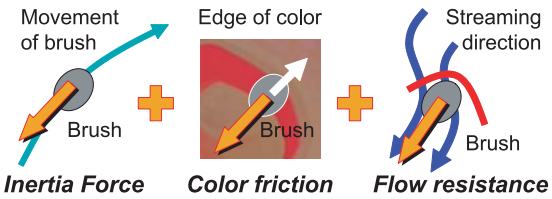

図 7 力覚生成用のモデル
Fig. 7 A model for haptic rendering.

の力をユーザに対して提示する．以下でそれぞれのモデルにて行った意味付けについて述べる．

3.3.1 色の重さ

本システムでは，最も基本的なデジタルな色の感触として「色の重さ」という概念を定義する．これは心理知覚的な色の印象を基にしているが，色より受ける印象は主観的なものであり，受け手個々の生活環境や背景によって全く異なる物であると考えられる．例えば，画家は高い輝度を持つ明るい色を「重い」色だと受け取るかもしれないが，逆に見る側は絵画や印刷物の明るい色は地に近い色として「軽く」感じるかもしれない．そこでユーザが定義を選択できるように，以下に示す 3 種類の選択肢を用意した．

彩度 絵の具の顔料に由来すると仮定したパラメータ．本来のその違いは，微妙な筆の運び具合に影響すると考えられる．

色相 暖色系や寒色系など，主に色の分類分けに関連すると仮定したパラメータ．例えばユーザ自身が好む系統に重きを置くように調整すれば，好みの色からより多くの感覚を得られるようになる．

輝度 心理学的な色の印象を基にしたパラメータ．一般的には，暗い色から重い印象を，明るい色から軽い印象を得ると言われている．

これらに加え，ユーザはさらに値の大小のどちらを「重い」方に割り当てるかを選択できるため，結果的に 6 種類の選択肢があることになる．

以下の記述では，重さのパラメータとして輝度を基準にして低輝度な色ほど重いと定義したものを例として用いる．このパラメータの輝度 L は，以下の式で求まる RGB カラースケールからグレイスケールに変換したものである．

$$L = 0.299 \times C_R + 0.587 \times C_G + 0.114 \times C_B \quad (3)$$

ここで C_R, C_G, C_B は色を構成する赤，緑，青の各成分の正規化された値を示す．これはビデオ信号の RGB フォーマットから YUV フォーマットへの一般的な変換式として知られている．

ユーザは Paint 機能を用いて描画している際に，この仮想的な色の重さの影響を強く感じる．この感触を与えるために用いたモデルは，以下のような慣性力 (Inertia force) を模したものである．

$$F_{inertia} = -m \cdot \vec{a} \quad (4)$$

$$m = f_i(L, S) = c_1 \cdot (1 - L) + c_2 \cdot S \quad (5)$$

ここで，a は筆の動きから算出される加速度，S は筆の大きさに比例した変数，f_i は L と S に従い線形に変化する関数であり，式 5 は定数 c_1 と c_2 を用いて表した輝度を基準とした例である．

描画と同時にカラーセレクタを用いて色を変更する際には，慣性力として感じられる色の重さも合わせて変化する．Smudge や Stamp の機能が選択されている際には，m の定義は上記の物と若干異なる．Smudge 機能が有効である場合，L はメモリ上に保管されたテクスチャの輝度を基に算出される．また，Stamp モード時には，m は選択されたキャラクタの画素が持つ輝度値の総和平均として表される．

3.3.2 キャンバスに置かれている色の感触

色摩擦抵抗 (Color friction) はキャンバス上の色の状態，すなわち一種のテクスチャを触感として得るためのモデルであり，以下のような式で表される．

$$F_{friction} = -c_3 \cdot R \cdot \vec{d} \quad (6)$$

ここで c_3 は定数，$\vec{d}$ は正規化された筆の進行方向ベクトルである．R は抵抗の度合いを示すパラメータであり，筆の進行方向に存在する色を数点サンプリングし，それらの「重さ」の標本偏差より決定した．すなわち，縞模様のような色の境界や，色の変化が激しい高いコントラストの領域が筆の進行方向前方に広がる場合には標本偏差が大きくなるため R が増大し，逆に，同等か同程度の明るさの色で構成される低いコントラストの領域を通過する際には，この値が減少する．すなわち，これはキャンバス上の色に応じた一種の抵抗値として機能する．

ユーザの描画によりカラーレイヤの状態が変化すると，色摩擦抵抗により生じる力も動的に変化する．例えば，Smudge 機能を用いて色を塗り広げた場合，視

覚的に滑らかに一色に近づいていく印象を，指先でも同時に抵抗値が減り滑らかになる感触として得ることができる．

3.3.3 水の流れのような感触

仮想的な流れを持つキャンバスによる動的な絵画表現もこの作品の新規性の一つである．この流れの感触を視覚だけではなく触覚でも得られるようにするために，ここでは流体抵抗 (Flow resistance) と呼ぶ以下のようなモデルを用いる．

まずはストリーミングレイヤ上の筆が触れている箇所を対象として，筆の領域内の速度ベクトル $\vec{V}'$ の総和平均から，今現在の平均的な流れの向きと強さを決定する．流体抵抗による力は，上記の平均ベクトルと筆の領域の大きさを表す変数 S を用いて以下のように表される．

$$F_{flow} = c_4 \cdot S \cdot f_f(\vec{V}') \tag{7}$$

ここで，c_4 は定数であり，f_f は以下の式で表される関数である．

$$f_f(\vec{V}') = \sum_{x,y}^{area} w[x,y] \cdot \vec{V}'[x,y] \tag{8}$$

なお，$w[x,y]$ は筆の中央からの距離で減衰する以下の条件を持つ重み付け変数である．

$$\sum_{x,y}^{area} w[x,y] = 1 \tag{9}$$

この式により，色が流れる方向へと押されるような力が，ユーザの手先に感じられる．

3.3.4 合　　力

力覚ディスプレイに出力される最終的な力は，以下の式で表されるような各モデルにより生じた力の合力となる．

$$F_{total} = w_1 \cdot F_{inertia} + w_2 \cdot F_{friction} + w_3 \cdot F_{flow} \tag{10}$$

ここで，w_1,w_2,w_3 は各モデルの寄与率を変化させる重み付けパラメータである．この式より,「重い」色が選択されたときや素早く筆を動かしたとき，筆が色の境界や高いコントラストの領域を通過するとき，流れが速く強い箇所に差し掛かったとき，より大きな力を感じることがわかる．

4. ハードウェア

4.1 Proactive Desk

Proactive Desk は，デジタルな世界との物理的なインタラクションを行うためのシステムである（**図 8**）．

図 8 Proactive Desk の全景
Fig. 8 An overview of the Proactive Desk.

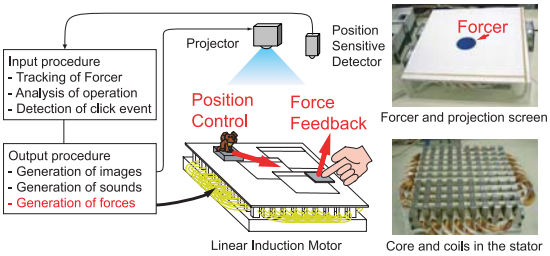

図 9 ハードウェアの構成
Fig. 9 Configuration of the hardware.

関連先行研究である Wellner による Digital Desk[11] では，机上に置かれた物体をカメラや位置センサなどを用いて取得，解析し，デジタル化して情報をコンピュータに取り込む．入力情報はコンピュータにて処理され，その結果は頭上に設置されたプロジェクタから机上へ投影される映像として実世界に出力される．Proactive Desk ではこれに物理的な情報の出力チャネルを付加する（**図 9**）．

4.2 力覚生成の仕組み

物理情報を提示する仕組みとしてはリニア誘導モータ (Linear Induction Motor: LIM) を用いている．1 次元の LIM の動作原理は一般的な三相交流モータと同じである．1 次側固定子には 3 組で対となるコイルが動作方向に対して複数個並べ，これに三相交流を印加するとコイルを並べた方向に進行磁界 B が生じる．すると 2 次側移動子となる導体内にはこの磁界の進行を妨げる方向に磁界を発生させる渦電流 I が励起される．この渦電流に対して進行磁界が作用し，フレミング則に従い 2 次側の導体に並進力 F が生じる（**図 10**）．Proactive Desk では 2 組の LIM のコアを

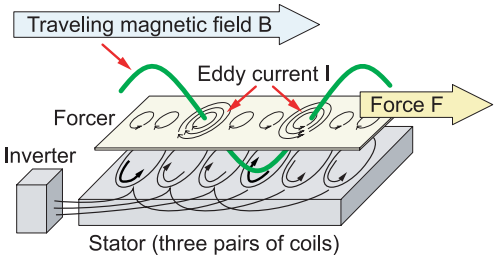

図 10 1 次元のリニア誘導モータ (LIM) の動作原理
Fig. 10 Mechanism for generating physical forces of a linear induction motor.

直交するように配置する方式[12] により，机の下に 2 自由度を持つモータを構築し，机上の非磁性導体（以下，Forcer と呼ぶ）に対して平面方向に自由に駆動させる力を発生させている．Forcer に生じる力はその面積や厚さに比例する[5]．本試作機では 200mm × 100mm，10mm 厚の銅製 Forcer にて最大 11N 程度の力を計測したが，本システムでは扱いやすさを考慮して直径 150mm，厚さ 5mm のアルミニウム製 Forcer を用いており，これにて 5N 程度の出力を確認した．

機能的には LIM は駆動力を発生できるのみなので，これを入出力装置として用いるために，さらに Forcer の位置に関するフィードバック処理を追加する．位置の追跡には Forcer 上に取り付けた LED と頭上に配置した光学式の位置検出装置を使用した．ここで LED には投影される映像に干渉しないように赤外光を発する物を用い，プロジェクタには赤外光カットフィルタを，位置検出装置には可視光カットフィルタを取り付けた．コンピュータは検出された位置情報を基に，適切な任意地点への移動力や，モデルに応じた触感を生み出すための力のレンダリングを行う．

Forcer は入力と同時に出力のデバイスとしても用いられるため，ここでは描画のためのツールを意識し，筆型の把持部を Forcer に取り付けた．把持部にはボタンが取り付けられており，その操作イベントにより描画操作を行う．イベント発生時には LED は数ミリ秒で特定パターンの明滅をし，これを位置計測装置が検出することによりコンピュータはボタンの押下イベントを得る．なお，より直感的な作業のためには圧力センサ等の他の入力手法の利用も考えられ，今後の検討課題としたい．なお Forcer のプレート部は，ユーザから見えにくくするためにスクリーン面と同じ白色に塗られており，頭上から投影される映像によって机と同化して見える（図 8 右参照）．

4.3 他の力覚ディスプレイとの比較

力覚ディスプレイはこれまでにも幾つかの手法[10),13)~16)] の物が提案されているが，作画作業においては少なくとも 2 次元方向に力を生み出せることが重要となる．本手法と他の手法とを比較した場合，力の発生原理として LIM を用いた本システムには幾つかの利点がある．例えば Actuated Workbench[15] は磁石の吸引力を利用した力覚ディスプレイであり，升目状に並べられた電磁石を制御することで磁石の取り付けられた物体を移動させる．一般的にこの種の方式では，升目に従うジグザグな動きを回避するために工夫を凝らす必要があり，駆動範囲を広げるためには配置する電磁石を増やす必要があるため制御が複雑になりがちで，発生力も比較的小さい．これに対して構造が単純な LIM は範囲を広げやすく，吸引力を利用した方式では不可能な任意方向に直接動かす力を物体に加えることが可能であり，発生力も大きくできる．

加えて，本手法では主要な力を生成する構造自体をキャンバスである机の下に隠蔽することが可能なため，ユーザはタブレットを扱うかのように操作をすることができる．これに対して他の力覚ディスプレイでは力覚提示の原理として机上にリンク構造を持つ機械的な腕[10),14)] やワイヤ[13)] を必要とするため，頭上から投影されるコンピュータの映像を阻害しがちである．

これらの点において本システムは 2 次元操作を主体とした Digital Desk のタスクにおいて有利であり，新しい芸術の形態としてのデジタルペイントツールに適していると言える．

5. 考　　察

5.1 Sumi-Nagashi の生み出す印象について

本システムにてデジタル絵画に新しく提案する表現である，色という視覚情報を力覚情報へ変換する手法が，作画体験時にユーザに与える印象について SD 法を用いて検討した．実験では被験者に力覚提示をする本来の Sumi-Nagashi と，力覚提示部を省いたものとをそれぞれ 10 分間程度ずつ体験してもらい，各体験後に 30 対の評価項目に関して 7 段階の評価尺度で回答させた．評価項目である形容詞対は，過去の展示の際に聞かれた意見や，SD 法の先行研究に用いられた形容詞対[17] を基に作成した．**図 11** に評価シートを示す．被験者は本システムの利用経験が少ない 20 ～ 40 代の男女 11 名ずつ計 22 名とした．なお，力覚有無の体験の順序効果を考慮し，被験者を 2 群に分けて実験を行った．

左にポジティブな印象を持つ形容詞を配置し，評価尺度をネガティブな形容詞からポジティブな方向へ −3 ～ 3 の得点に対応させて全得点値を因子分析（主

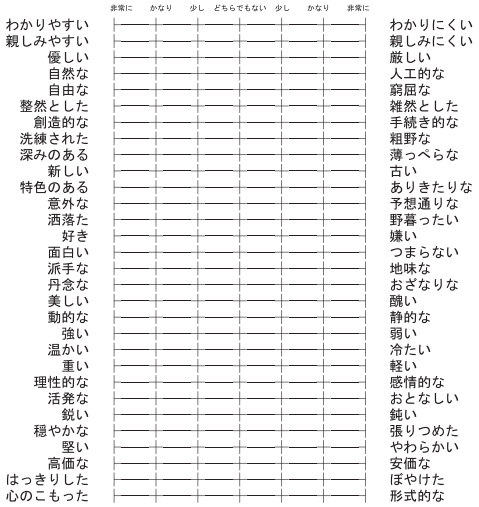

図 11 評価シート
Fig. 11 Evaluation sheet.

評価項目	命名	第１因子	第２因子	第３因子	第４因子	共通性
動的な－静的な	アトラクティブ性	0.783	0.044	0.314	-0.089	0.722
面白い－つまらない		0.743	0.412	0.046	-0.054	0.727
意外な－予想通りな		0.720	-0.033	0.194	0.033	0.559
重い－軽い		0.685	-0.457	0.080	0.296	0.772
新しい－古い		0.683	0.281	0.044	-0.149	0.570
特色のある－ありきたりな		0.653	0.103	-0.151	0.089	0.468
活発な－おとなしい		0.650	-0.300	0.276	-0.369	0.726
深みのある－薄っぺらな		0.504	-0.122	-0.161	0.391	0.448
派手な－地味な		0.466	-0.017	0.235	-0.249	0.334
温かい－冷たい		0.402	0.329	-0.049	0.087	0.280
高価な－安価な		0.368	-0.101	0.040	-0.035	0.148
自由な－窮屈な	作画操作性	0.073	0.739	-0.032	-0.112	0.565
堅い－やわらかい		0.135	-0.654	0.252	0.123	0.524
好き－嫌い		0.557	0.646	-0.101	-0.071	0.743
創造的な－手続き的な		0.449	0.594	-0.172	-0.082	0.591
親しみやすい－親しみにくい		0.303	0.496	-0.380	0.168	0.511
鋭い－鈍い		-0.257	0.495	-0.023	-0.062	0.315
理性的な－感情的な		0.015	-0.474	-0.144	0.190	0.282
自然な－人工的な		-0.058	0.424	-0.332	0.197	0.333
心のこもった－形式的な		0.118	0.414	-0.242	0.096	0.253
丹念な－おざなりな	画像印象性	-0.134	-0.144	-0.675	-0.063	0.499
洗練された－粗野な		0.032	0.074	-0.654	0.038	0.436
強い－弱い		0.560	-0.087	0.598	0.032	0.680
穏やかな－張りつめた		-0.144	0.421	-0.596	0.113	0.565
優しい－厳しい		-0.178	0.307	-0.575	0.088	0.464
整然とした－雑然とした		-0.080	0.095	-0.524	-0.158	0.315
わかりやすい－わかりにくい		0.226	0.166	-0.333	0.327	0.296
美しい－醜い	達成感	0.031	0.067	-0.435	-0.630	0.591
洒落た－野暮ったい		0.309	0.050	-0.196	-0.595	0.490
はっきりした－ぼやけた		-0.004	0.066	0.060	-0.245	0.068
負荷量の二乗和		5.489	3.859	3.314	1.615	
寄与率(%)		18.297	12.863	11.048	5.382	
累積寄与率(%)		18.297	31.160	42.208	47.590	

（網掛け部は解釈の対象とした因子負荷量の絶対値が0.5以上の評価項目）

図 12 バリマックス回転後の因子負荷量
Fig. 12 Factor loadings after the varimax rotation.

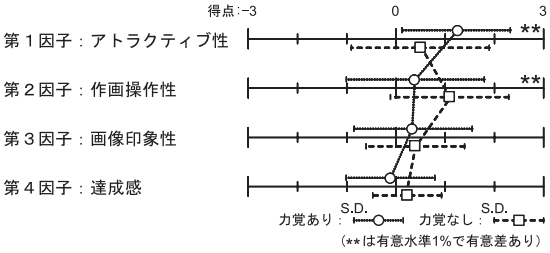

図 13 各因子での全得点平均プロファイル
Fig. 13 Profile of the average score for each factor.

因子法，バリマックス回転）した結果，因子数と因子寄与率の変化から見て 4 因子が適切であると判断した．バリマックス回転後の因子負荷量を**図 12** に示す．回転後の因子負荷量の絶対値が 0.5 以上の評価項目を解釈の対象とし，各因子を命名した結果，第 1 因子は「アトラクティブ性因子」，第 2 因子は「作画操作性因子」，第 3 因子は「画像印象性因子」，第 4 因子は「達成感因子」となった．力覚の有無について，各因子での全得点平均プロファイルを作成すると**図 13** のようになる．各因子上で力覚提示がある場合とない場合の得点について t 検定を行った結果，因子 1: $t(175) = 6.262$, $p < .01$, 因子 2: $t(87) = -4.546$, $p < .01$, 因子 3: $t(131) = -0.406$, n.s., 因子 4: $t(44) = -1.949$, n.s., となり，有意水準 1%でアトラクティブ性因子と作画操作性因子については有意な差が見られた．

以上の実験結果を基に，Sumi-Nagashi がユーザに与える印象に関しての考察を行う．

第 1 因子であるアトラクティブ性因子に含まれる因子負荷量の絶対値が 0.5 以上の形容詞対は,「動的な－静的な」,「面白い－つまらない」,「意外な－予想通りな」,「重い－軽い」,「新しい－古い」,「特色のある－ありきたりな」,「活発な－おとなしい」,「深みのある－薄っぺらな」というものであることから，主に Sumi-Nagashi の特徴である力覚を付加したことによる新しい体験やその面白さ，ひいてはそれらに起因する作画意欲の向上など本作品自体が持つ魅力に関する要因が含まれると考えられる．この因子においては，視覚情報のみのものと比べて，本来の Sumi-Nagashi がより高い評価を得ていることがわかる．これは，デジタルな絵画にデジタルならではの身体性を付与することにより絵を描く楽しさを提供するという，本システムの目的に合致するようなイメージとしてユーザにも捉えられている結果だと考えられる．

第 2 因子である作画操作性因子には,「自由な－窮屈な」,「堅い－やわらかい」,「好き－嫌い」,「創造的な－手続き的な」が含まれるため，主に筆運びの感触などの作画時の対話操作に関する要因が含まれると考えられる．この因子においては，力覚のない方がより高い評価を得ていることがわかる．これは，力覚が伴う場合は選択中の色やキャンバスの状態により筆運びの際の重さが変化するために，これが一種の抵抗として見なされ，逆の形容詞へ引き寄せる効果を与えたと推察される．したがって，操作時の拘束感の少なさを意味する作画操作性因子において得点が低いということは，力覚という物理的な情報が作画プロセスに対し

てより強い影響を与えているという点で妥当であると考えられる．

第 3 因子である画像印象性因子には,「丹念な－おざなりな」,「洗練された－粗野な」,「強い－弱い」,「穏やかな－張りつめた」,「優しい－厳しい」,「整然とした－雑然とした」が含まれるため，主に作成される絵の特徴に関する因子であると考えられる．また，第 4 因子である達成感因子には,「美しい－醜い」,「洒落た－野暮ったい」が含まれるため，出来上がる作品に関しての印象が反映されていると思われる．いずれも検定の結果から有意な差が得られなかったが，本実験では力覚の有無についてのみ条件を変えているため，これらの視覚的な特徴に起因する因子については差が出なかったものと考えられる．

5.2 Sumi-Nagashi の持つアート的意義について

絵画芸術におけるその表現形態について，多くの人々は図像を中心とした視覚情報に頼った意味表現だと捉える傾向がある．しかし本来の絵画表現とは，画材の物質的な特性とそれに相応しい表現技法を基に熟考され構築されたテクスチャによる色情報であり，全ての身体的感覚に刺激を与える色による物性の表現形態である．あらゆる芸術的な表現形態において最も重要な要素とは我々の身体との関係であり，造形物という装置を介すことによって作家も鑑賞者も各々の身体性を知覚し現実感を得ることが可能となる．これにより，造形物との間に個人的で決定的な関係を築くことができ,「作品」としての芸術的な価値が産まれる．

デジタル技術は異なる物性を持つ素材を，同一の方法論の中で自由に扱うことを可能にした．これがいわゆるデジタル革命の利点であるが，それは同時に，先行する視聴覚分野の技術発展に比して，人と芸術との関係において重要である身体性が置き去りにされてきた問題も含まれる．これまでのデジタルアートやメディアアートは，身体性を伴わない視覚という呪縛により，自らの外にメディアを求めるしかなかったと言えないだろうか．時にこれらの分野では，身体性を持たないことがこの新しい芸術の優位性であり価値であると捉えられる傾向があるようにも見受けられる．しかし我々は単にこの分野がまだ産まれて間もなく，ハードウェア，ソフトウェア共に未成熟であるがゆえの誤解であると考える．

理想的には，本来人が持つ全ての生理的な感覚器官が，芸術作品により喚起され活発に機能する状態が望ましい．しかし実際には全ての感覚器官に対して物理的な刺激を与える必要は無く，最小限の情報をもって大脳の広範囲が活性化されれば良い．現代のデジタル技術で制御可能な範囲で最も効率のよい情報，それが視覚と聴覚，そして触覚であろう．

1998 年と 99 年に SIGGRAPH Art Gallery にて発表した作品「Image to Touch[18]」と「Non-Material Construction #1[19]」において，棚沢は絵画の表現形態に触覚を取り入れることを試みた．これら一連の作品の目的は，彼の考案した特殊な作画技法を用いて，デジタルな絵画が持つ光学的な表現を通じ，触覚をも誘発させようというものである． Sumi-Nagashi は，この Image to Touch を先進的な装置と概念によって再構築した物と言うことができる．

本システムにおいて構築した色と触覚との関係は，もちろん仮想的な意味付けであり，物理世界の法則をそのまま引用するだけでは作品としての面白み，創造性に欠けることになる．単なるデジタルなデータである色情報に対して積極的に意味付けすることにより，データに生理的な意味が加わり，それが物理的な意味へと変換される．制作という過程において存在する視覚と触覚を介した身体的な対話は，その制作物が「作品」として認知されるための重要な説得力を与えるものになる．

Proactive Desk はこれらの感覚を融合して得るためのハードウェアとして本システムにおいて重要な役割を果たす．出力される色からユーザが身体的に感じる説得力はまさに未知の体験であり，彼らが造形作家であればその意味をすぐに理解するであろう．視覚と触覚，あるいはソフトウェアとハードウェアの両者が絶妙の関係を築くことによって産まれるその美しさは，体験者にしか認知されえない奇妙で不思議な時を創造する．Sumi-Nagashi が本質的に作品となるのは，ある意味この瞬間であると言える．

6. おわりに

本システム Sumi-Nagashi はデジタルアートの世界に本来の芸術創作において必要とされてきた身体性を組み入れるためのひとつの試みである．力覚ディスプレイを用い，デジタルな色に対し様々な触覚的な意味付けを行うことにより，視覚と触覚の調和による新しい芸術の可能性を例示するデジタルツールである．本研究の最終的な目的は，画家が絵の具の粘性やキャンバスと絵の具の接着具合を，微妙な触覚によって正確に把握し必要な効果を構築していくのと同じ次元において，デジタルならではの身体性の拡張を行う点にある．今後は芸術的作業における身体性や視覚と脳の生理的な関係をさらに研究し，合理的な意味での知覚の拡張が必要であると考える．

本システムは本来の作画において存在する触覚的な情報を，デジタルな作画に適用して再現しただけの例ではなく，新しい芸術の形態を模索する物である．その意味での拡張こそが今後の発展として適切である．例えば Proactive Desk は，現在のあるいは過去のユーザの行動を記録，蓄積し，再生することができるため，このデジタルメディアを介して時間と空間を超え，人々の経験や感覚を共有するための装置となりうる．また，本作品においては素材と身体の間に存在するインタラクションの重要性から，特に視覚と触覚の関係について重視したが，それ以外の聴覚などを仮想的な属性として組み入れることも興味深い．例えば，音についても「重さ」や「複雑さ」などのある種の主観的な印象があると考えられる．将来的には，五感を融合した新しいメディアアートへの展開を試みたいと考える．

謝辞 本研究は情報通信研究機構の研究委託 “超高速ネットワーク社会に向けた新しいインタラクションメディアの研究開発” により実施した．

参 考 文 献

1) Zeki, S.: *INNER VISION: An Exploration of Art and the Brain*, Oxford University Press (1999).
2) 岩田誠: 見る脳・描く脳ー絵画のニューロサイエンス, 東京大学出版会 (2000).
3) Gregory, R.L.: *Eye and Brain: The Psychology of Seeing*, Princeton University Press (2004).
4) metaculture: SUMINAGASHI - The Ancient Art of Japanese Marbling, http://www.suminagashi.com/ (2000).
5) Noma, H., Yoshida, S., Yanagida, Y. and Tetsutani, N.: The Proactive Desk: A New Haptic Display System for a Digital Desk Using a 2-DOF Linear Induction Motor, *Presence*, Vol. 13, No. 2, pp. 146–153 (2004).
6) Corel co.: Painter, http://www.corel.com/ (2004).
7) Gregory, A. D., Ehmann, S. A. and Lin, M. C.: inTouch: Interactive Multiresolution Modeling and 3D Painting with a Haptic Interface, *Virtual Reality 2000*, IEEE, pp. 45–52 (2000).
8) Baxter, W. V., Scheib, V., Lin, M. C. and Manocha, D.: DAB: Interactive Haptic Painting with 3D Virtual Brushes, *SIGGRAPH ’01*, ACM, pp. 461–468 (2001).
9) Yeh, J., Lien, T. and Ouhyoung, M.: On the Effects of Haptic Display in Brush and Ink Simulation for Chinese Painting and Calligraphy, *Pacific Graphics 2002*, IEEE, pp. 439–441 (2002).
10) SensAble Technologies, Inc.: PHANToM, FreeForm, http://www.sensable.com/ (2004).
11) Wellner, P.: The DigitalDesk Calculator: Tangible manipulation on a desk top display, *UIST ’91*, ACM, pp. 27–34 (1991).
12) 大平庸一, 川西利昌: 2 方向リニア誘導モータの実験的検討, 計測自動制御学論, Vol. 19, No. 2, pp. 74–79 (1983).
13) Sato, M., Hirata, Y. and Kawarada, H.: SPace Interface Device for Artificial Reality-SPIDAR, *The Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (D-II)*, Vol. J74-D-II, No. 7, pp. 887–894 (1991).
14) Ramstein, C. and Hayward, V.: The Pantograph: A Large Workspace Haptic Device For A Multi-Modal Human-Computer Interaction, *CHI ’94*, ACM, pp. 57–58 (1994).
15) Pangaro, G., Maynes-Aminzade, D. and Ishii, H.: The actuated workbench, *UIST ’02*, ACM, pp. 181–190 (2002).
16) Immersion co.: CyberTouch, PenCAT, etc., http://www.immersion.com/ (2004).
17) 岩下豊彦: SD 法によるイメージの測定, 川島書店 (1983).
18) Kurumisawa, J.: Image to Touch, ACM SIGGRAPH98 Art Gallery: Touchware (1998).
19) Kurumisawa, J.: Non-Material Construction #1, ACM SIGGRAPH99 Art Gallery: TechnOasis (1999).

(平成 16 年 10 月 14 日受付)
(平成 17 年 5 月 9 日採録)

吉田 俊介（正会員）

1973 年生．1996 年中京大学情報科学部情報科学科卒業．1998 年同大学情報科学研究科情報科学専攻修士課程修了．2001 年名古屋大学人間情報学研究科社会情報学専攻博士後期課程修了．同年通信・放送機構本郷空間共有リサーチセンター研究員．2002 年 10 月より（株）ATR メディア情報科学研究所研究員．現在に至る．博士（学術）．バーチャルリアリティの実用的な応用に興味を持つ．電子情報通信学会，日本バーチャルリアリティ学会各会員．

棚沢　順

1958 年生．1983 年東京芸術大学美術学部絵画課油画専攻卒業．1989 年よりコンピュータグラフィックス作品制作．1991 年より毎年ディジタルイメージ展等，個展多数．1996 年より（株）ATR 知能映像通信研究所客員研究員．同年よりほぼ毎年 SIGGRAPH Emerging Technologies, Art Gallery 等で作品発表を行う．現在，千葉商科大学政策情報学部教授．人間の生理と芸術の関わりに興味を持つ．早稲田大学国際情報通信研究センター客員助教授（非常勤），美術解剖学会理事．芸術科学会，ACM Siggraph 各会員．

野間　春生

1966 年生．1989 年筑波大学第 3 学群基礎工学類卒業．1994 年筑波大学博士過程工学研究科修了．同年（株）ATR 通信システム研究所入所．1996 年同社知能映像通信研究所研究員．2002 年より同社メディア情報科学研究所主任研究員．現在に至る．博士（工学）．人工現実感，臨場感通信，力覚インターフェイス，体性感覚インタフェース，ウェアラブルコンピュータ等の研究に従事．日本バーチャルリアリティ学会，ヒューマンインタフェース学会，計測自動制御学会，電子情報通信学会，日本ロボット学会，IEEE，ACM 各会員．

須佐見憲史

1959 年生．1989 年中京大学大学院文学研究科博士後期課程満期退学．日本学術振興会特別研究員（PD），（株）ATR 人間情報通信研究所客員研究員，東京工業大学研究支援推進員，通信・放送機構高度三次元動画像遠隔表示プロジェクトサブリーダーなどを経て 2003 年 2 月より（株）ATR メディア情報科学研究所主任研究員．現在に至る．博士（心理学）．知覚心理学（立体視，運動視，眼球運動），視覚工学などの研究に従事．

柳田　康幸

1964 年生．1988 年東京大学工学部計数工学科卒業．1990 年同大学大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了．同年東京大学先端科学技術研究センター助手，1997 年同大学大学院工学系研究科助手．2001 年（株）ATR メディア情報科学研究所研究員，2003 年同研究所主任研究員．2005 年より名城大学理工学部情報工学科教授，現在に至る．博士（工学）．テレイグジスタンス，バーチャルリアリティ，五感インタフェースの研究に興味を持つ．日本音響学会，計測自動制御学会，日本ロボット学会，日本バーチャルリアリティ学会，電子情報通信学会，IEEE，ACM 各会員．

鉄谷　信二

1954 年生．1980 年北海道大学工学部大学院修士課程了．同年電電公社（現 NTT）入社．1991 年（株）ATR 通信システム研究所に出向．1994 年 NTT ヒューマンインタフェース研究所に復帰．2000 年（株）ATR 知能映像通信研究所に出向．2004 年 4 月より東京電機大学理工学部教授．現在に至る．マルチメディア関連の応用研究に従事．工学博士．電子情報通信学会，映像メディア学会，画像電子学会，日本バーチャルリアリティ学会各会員．

保坂　憲一

1954 年生．1978 年早稲田大学理工学部電子通信学科卒業．1983 年早稲田大学大学院理工学研究科博士課程後期修了．同年日本電信電話公社（現 NTT）入社．画質評価法の検討，設備図面 DB 構築システムの実用化，マルチメディアオンデマンド方式の研究開発，知的財産部にてソフトウェア開示契約，国際本部およびＮＴＴコミュニケーションズにてアプリケーションサービス開発などに従事．2004 年 1 月より（株）ATR メディア情報科学研究所に出向．同研究所五感メディア研究室室長．工学博士．電子情報通信学会，日本バーチャルリアリティ学会各会員．