

## 特集記事

## ペン入力特集

## 描画・形状表現手法としてのペン入力

東京大学大学院 五十嵐 健夫

## 1. はじめに

ペン入力の利点としては、手書き文字で文字入力が行える点や、携帯機器などのようにキーボードがない状態での操作に適している点の他などが挙げられるが、それ以外に、マウスと比較して特に自由に絵を「描く」操作に適しているという点が挙げられる。もちろん、ただ単に絵を描くだけであれば紙とペンがあればよいのであってわざわざ計算機を利用する必要はないのであるが、描かれた絵をなんらかの形で処理して他の目的に利用したり、逆に絵を描くという行為自体を積極的に支援したりする場合に、計算機上で描くことのメリットが生きてくる。そもそも、絵を描く場合には、自分の頭の中の情報を整理したり他人に情報を伝えたりといった目的があるわけであり、計算機システムはこのような目的の遂行を支援するものとしてデザインされるべきである。本稿では、このような「ペンで描く」という操作をうまく活用して種々の問題解決に利用している研究プロジェクトの例をいくつか紹介したい。

なお、手書きの図面等を計算機に認識させようという取り組みは古くから存在しているが、主に人工知能や画像認識の分野において、入力された複雑な図形を一度に解析する認識アルゴリズムの開発に重点がおかれていた。近年研究が盛んに行われているものは、ペンによる描画行為を総合的に活用したアプリケーションシステムを構築しようとしているものであり、特にシステムの対話的側面を重視している点が異なっている。すなわち、単に絵や図を認識して終わりにするのではなく、結果をどう提示しそれに対してさらにユーザがどう行動するべきかまで考慮にいれている点が最近のペンによる描画システムの特徴であるといえる。

以下、まず2次元の絵を対象にしたものを紹介し、ついで3次元グラフィクスを対象にしたものに紹介していく。前半では、ペンでの描画をGUIやWEBの画面デザインの道具として利用するシステム、ホワイトボードなどにおける情報伝達に利用するシステムなどについて紹介する。後半では、ペン入力での3次元形状や3次元的な動きを作成するものについて紹介するほか、完全な3次元表現でなく擬似的な3次元表現を行うシステムなどについて紹介する。

## 2. ペン入力による画面デザイン

ペン入力の利点として、通常のGUIを利用した編集作業と比較して非常に早く自分の考えを表現したり変更したりすることができるため、特に種々のデザイン活動の初期段階において頭の中の曖昧な概念を整理して具体化していく作業に適しているという点が挙げられる。ここでは、このような特徴を生かしてペン入力をGUIやWEBの画面デ

ザインに利用したシステムについて紹介する。

SILKは、ペン入力を利用してGUIの画面デザインを行うシステムである。通常このようなラフな画面デザインは、インタフェースビルダを利用した計算機上での詳細な編集作業に先立って、紙とペンを利用して行われている。SILKは手書きスケッチを利用することでこのデザイン作業を計算機で行えるようにしたものであり、単に見かけのデザインだけでなく簡単な動作も試してみることを可能している。例えば、画面上にスクロールバーを描くとそれで画面をスクロールしたり、ボタンを描くとそれを押して別の画面に移ったり、といったことができる。認識は行いが整形は行わずに手書きの絵をそのまま表示するので、ユーザはスケッチ画のまま操作を試してみることができる。あえて整形せずにスケッチのまま表示することで、まだ最終決定ではなく案の段階であることが表現され、様々な可能性についてより柔軟に検討することが可能となっている。

図1 SILKの画面例(右は認識結果)<sup>1)</sup>

Denimは、同様にスケッチ画を利用してWEBサイトのデザインを行うシステムである<sup>2)</sup>。最初にサイト構造を編集するモードで画面上に個々のページを表すラベルを配置し、さらにその間のリンク構造を表す線で結ぶ。典型的には、トップページの下にいくつか関連ページがぶら下がっているような構造になる。次に、ページをデザインするモードに入り、個々のページの画面イメージを手書きスケッチで描く。更に、ページ内の任意の場所から他のページへ向かう線を描くことで、ハイパーリンクを張ることができる。ある程度デザインができたあとで「実行」モードに入ると、擬似的なWEBブラウザ上で、これらのスケッチ画で表現されたページ群をハイパーリンクをたどりながらブラウズすることができ、気に入らなければ即座に手書きスケッチで内容を訂正することができる。本システムは、WYSIWYGエディタなどで実際のページ作成を行う前の全体的なサイト構造のデザインの段階で使うことを想定

しており、SILK の場合と同様にあえて手書きのままで表示することで様々なデザインを手軽に試すことを後押ししている。

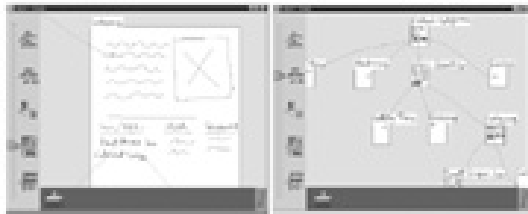


図2 DENIMの画面例<sup>2)</sup>。ページビュー(左)とサイトビュー(右)

3. 大画面を用いたコミュニケーション支援

ペン入力、上記のようなデザイン活動だけでなく、講義中に先生と生徒の間で対話的に行われる、黒板を利用した説明などにも利用されている。五十嵐らは、算数や理科の授業ででてくるような図の板書を補助するものとして、手書きで描かれた線を受け取って平行や直角・対称といった幾何学的な関係を満たすように清書するPegasusというシステムを提案している<sup>3)</sup>。Davis らは、力学を説明するためのツールとして、手書きスケッチで描いた車輪や傾斜面・パネや重りといった要素に対して物理シミュレーションを適用できるシステムを提案している<sup>4)</sup>。手書きスケッチを利用することで、様々な初期条件を与えるとどのような結果の違いにつながるのかを簡単に見せることが可能となる。LaViola らは、手書きで描いた図が同じく手書きで書かれた数式に従ってアニメーションする、といったシステムを提案している<sup>5)</sup>。例えば、 $x_0=t$ 、 $x_1=t^2$ といった数式を書き、さらに丸を二つ描いてそれぞれを $x_0$ 、 $x_1$ に関連付けると、二つの丸が式に従って移動する(はじめは $x_0$ の方が先行するが、後から $x_1$ が早くなって追い抜く)といったアニメーションが示される。このようにすることで、一見ただけではわかりにくい式の意味の理解を促進することができる。

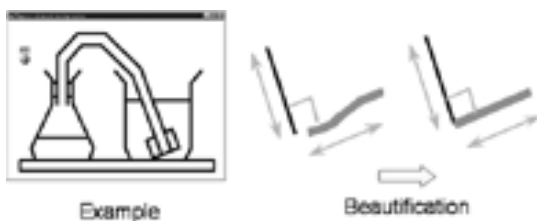


図3 Pegasusの画面例と整形操作<sup>3)</sup>

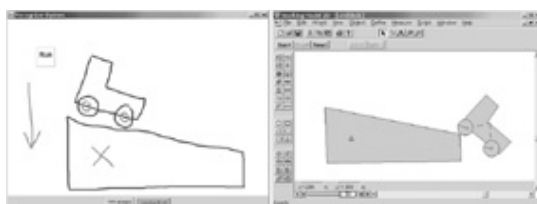


図4 スケッチへの力学シミュレーションの適用<sup>4)</sup>

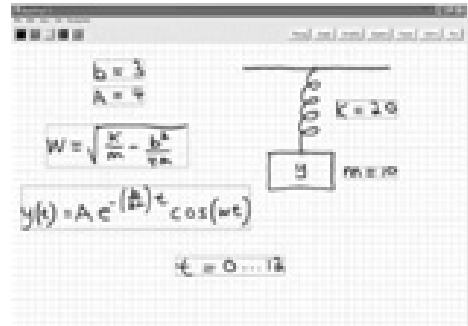


図5 MathPad<sup>2</sup>の画面例<sup>6)</sup>

電子ホワイトボード上で種々のアプリケーションをサポートするシステムとしてflatlandというものが開発されている<sup>6)</sup>。このシステムでは、画面上に複数のアプリケーションが共存しているときにそれらの間で重なりが起らないように調整をする空間管理機構、画面上の特定の領域においてアプリケーションを起動して個別の作業を支援する支援機構、および履歴をすべて自動的にデータベースに保存し過去の状態をいつでも復元できるようにする履歴管理機構などを提供している。具体的なアプリケーションとして、手書きで一本の線を引くと自動的に2本に増やして道路にしてくれる(交差点などがあれば自動的にその処理も行ふ)地図描画機能、手書きで数式を書くと自動的に計算してくれる計算機能、手書きの図を描くと自動的に整形してくれる整形機能などが実装されている。実装上の特徴として、本システムではすべての入力と表示がストロークとして表現されており、アプリケーションはその構造を解釈して変換を行う一種のフィルターと動作するように設計されている。

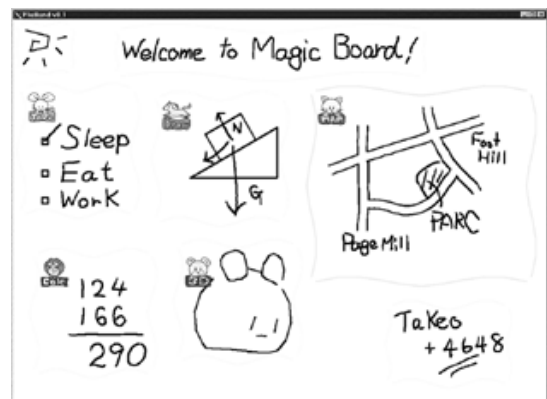


図6 Flatlandの画面例<sup>6)</sup>。  
様々なアプリケーションが共存している。

4. ペン入力による3次元形状・動作表現

ペンによる描画の応用の一つとして、3次元グラフィクスがある。通常の3次元グラフィクスの作成環境は、訓練を受けた専門家が映画や広告に使う高品質の画像を注意深く作成するようにデザインされており、多くの制御点を設定したり複雑な編集コマンドを組み合わせ使用したりし

なくてはならないといった問題点がある。このような複雑なインタフェースはデザインが確定した後にそれを計算機上の表現へと変換する目的には適しているが、アイデアを膨らませてデザインを試行錯誤しながら確定させていくプロセスには適さない。そのため、通常このようなデザイン作業は、紙とペンを利用して計算機の外で行われている。ペン入力を利用した3次元インタフェースシステムは、このようなデザインプロセスに計算機の計算能力を活用していこうとするものであり、複雑な操作を通じて詳細な表現を時間をかけて作成するのではなく、簡単な操作でラフな表現を即座に作成することを目的としている。また、操作を簡単にすることによって、初心者や一般のユーザが、自分の考えを整理したり他人に伝えたりするための道具として使うことも可能となる。以下、いくつかのシステムを紹介する。

インタラクティブな3次元スケッチングの可能性を最初に示したのがZeleznikらによるSKETCHというシステムである<sup>[7]</sup>。それ以前にも、手書きの線画から3次元形状を自動生成するという取り組みは画像認識や人工知能の分野で長く行われてきていたが、あくまでも計算機は線画を入力として受け取って3次元形状を出力として返すというバッチ処理的な考え方に基づくものであった。SKETCHは対話性を重視しており、計算機上で視点を変更したりしながら徐々に形状を作り上げていくことを特徴としている。基本的には、用意された直方体や円柱・円錐といった3次元のプリミティブを3次元空間中に配置していくというシステムになっている。プリミティブ毎に2次元のジェスチャーが設定されており、ユーザが画面上にジェスチャーを描くと、その場所に対応する3次元プリミティブが配置される。重要な点は、2次元入力に含まれていない奥行き情報をどのように決定するかであるが、本システムの場合は「あらゆるオブジェクトはすでにあるオブジェクトの上に乗っている（宙に浮いていない）」という暗黙の前提を利用することで、この問題を解決している。どうしても宙に浮かせたい場合には、物体から少し離れた位置に影を描くことで宙に浮いている状態を表現することができる。本システムは建物のような空間の表現に適しており、実際の細かい設計に入る前のデザインの検討などに利用されることを想定している。

SKETCHが建物のように平面で囲まれた形状を対象としているのに対し、Teddyと呼ばれるシステムは生物のように自由曲面で囲まれた形状を表現することを目的としてい

る<sup>[8]</sup>。ユーザが画面上に描きたい3次元形状の輪郭をなぞるような線を描くと、計算機が自動的にその輪郭に対応するような3次元形状を自動的に生成して提示する。計算機内部においては、輪郭に囲まれた領域を前後に「膨らます」ような処理を行っている。できあがった3次元形状に対してはさらに切断処理や突起生成処理を適用したりすることができる。これらの処理はすべて手書きスケッチを画面上に描くことによって行われる。Teddyのような手法を用いることにより、3次元グラフィクスに関する経験のない子供でも簡単に表現力豊かな3次元モデルを作成することが可能となっている。また、その場で簡単に3次元形状を作成できるという機能は3次元的な概念を伝えるための道具としても有用であり、医者が患者に対して疾患の状況を説明したり、学校の先生が生徒に対して立体的な概念の説明をしたりする場合に利用することができる。



図8 Teddyの操作の例(左)とモデリング例(右)<sup>[8]</sup>

その他、対象を限定することによってより複雑な表現を実現しているシステムがいくつかある。まず、植物を対象としているものとして、木をモデリングするものと花をモデリングするものが発表されている。木をモデリングするシステムでは、ユーザはまず幹や枝に表現した2次元スケッチを描き、これをシステムが自動的に3次元化する<sup>[9]</sup>。この際、枝同士がなるべく離れた場所に配置されるように、奥行き方向の形状が決定される。また、すべての枝を手で描くのは労力がかかるので、このシステムでは、既に描かれた枝を例として類似した枝を大量に自動生成する機構なども提供している。花のモデリングシステムでは、花びらやおしべ・めしべなどそれぞれに応じたパーツごとに専用のスケッチインタフェースを提供することで効率の良いモデリングを実現している<sup>[10]</sup>。例えば、花びらの作成では最初に3本の線を引くことで基本形状を作成し、さらに追加の変形ストロークを描くことで3次元的な形状が作成される。またこのシステムでは、花のもつ複雑な構造を扱いやすくするために、植物学の分野で伝統的に用いられてきた花式図や花序と呼ばれる表現を利用している。

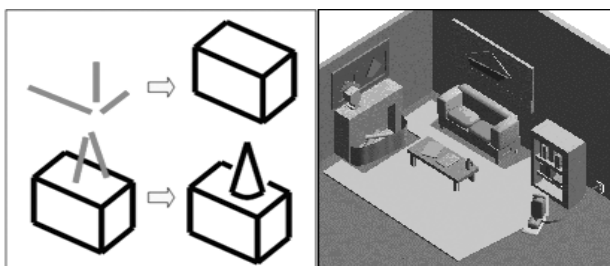


図7 SKETCHの操作の例とモデリング例<sup>[7]</sup>

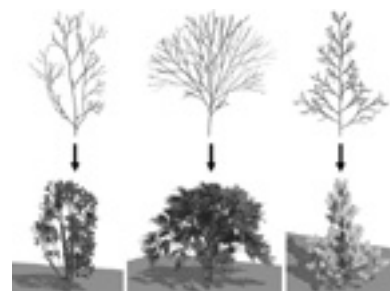


図9 樹木のモデリング例<sup>[9]</sup>

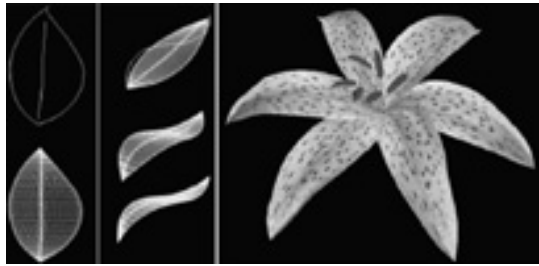


図10 花のモデリング例<sup>[10]</sup>

特定のアプリケーションを対象としたものとして、他に衣服のデザインを対象としたものがある。五十嵐らのシステムは、2次元のパターンとしてデザインされた衣服を3次元キャラクターに着せ付けるためのインタフェースとして、2次元のパターンと3次元キャラクターの上に対応するストロークを描く方法を提案している<sup>[11]</sup>。システムは、与えられたストロークがなるべく一致するように衣服を3次元キャラクターの体の上に配置する。このようにすることで、3次元空間中で移動したり回転したりするという複雑で面倒な操作を行うことなく、衣服を簡単に着せ付けることが可能となっている。一方、Truquinらのシステムは、2次元のパターンを描くのではなく、人体を表現した2次元の絵の上に直接服の絵を描くインタフェースを提供している<sup>[12]</sup>。与えられた服のスケッチ画は、システムによって自動的に3次元的な衣服の形状に変換され、3次元キャラクターの上に着せ付けられる。両者とも、衣服の形状を厳密に表現するためのものではないが、服の着せ付け方を検討したり、服のデザインの概略を検討したりする目的に適したシステムとなっている。

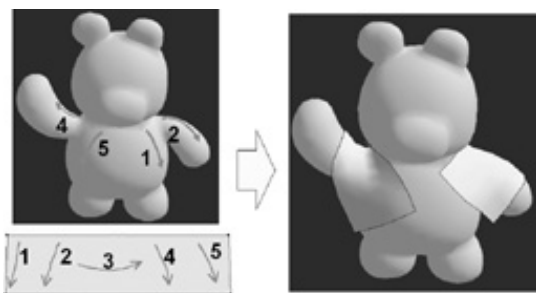


図11 対応する線を描くことによって衣服の着せ付けるインタフェース<sup>[11]</sup>



図12 衣服の概形を描いて着せ付けるインタフェース<sup>[12]</sup>

スケッチを利用してアニメーションを作成するシステムとして、Motion Doodlesと呼ばれるものがある<sup>[13]</sup>。これは、画面上に動きを表現する線を描くことで、簡単にアニメーションを作成するというものである。対象としている動作は、歩行や走行・ジャンプといった、地面の上を一方方向に向かって進んでいく動作のみであり、あらかじめ用意された動きをスケッチの形にあわせて組み合わせたり速度を変えたりして構成している。また、人型のキャラクターのポーズを腕や脚、脚などを一本の線で表した簡単な絵で設定し、それを連続して与えることでアニメーションを作成するシステムも提案されている<sup>[14]</sup>。この際問題となるのが、個々の線に対応した体のパーツの奥行き方向の傾きである。このシステムでは、あらかじめ与えておいた間接の可動範囲を考慮して自動的に決定する方法と、複数の候補を提示してユーザに選ばせる方法を組み合わせることでこの曖昧性を解消している。



図13 MotionDoodlesの例<sup>[13]</sup>。軌跡を描く。



図14 棒人間を描くことによるポーズの設定<sup>[14]</sup>

### 5. ペン入力による擬似的な3次元表現

前節で紹介したシステムは、内部表現自体は標準的な3次元モデルとなっており、出力結果は完全な3次元形状データとして利用することも可能である。しかし、ペンによる描画を纯粹にデザインのための中間表現と考えた場合には、そのような完全な3次元表現を作成しなくても様々な効果的な処理を実現することができる。

Projective Strokes と呼ばれるシステムは、自分の周囲を見回すように視点を変えながらスケッチすることで、自分を中心とした3次元空間を擬似的に表現するシステムである<sup>[15]</sup>。内部的には、画面上に描かれた手書きストロークを視点を中心とした球面上に投影することによって、このような効果を実現している。論文では、応用として建築でのインテリアデザインなどを挙げている。



図15 周囲を見回すように視点を変えながら描いた絵を、視点を囲む円柱面へ投影した例<sup>[15]</sup>。

Haroldと呼ばれるシステムは、3次元世界の中でユーザが描いたひとかたまりのストロークを一枚のビルボードに投影して表現する<sup>[16]</sup>。ビルボードとは、常に視線方向を向くように制御されたオブジェクトのことであり、この上に絵を描くことで人や木、建物といったものを実際の3次元構造を作成することなく擬似表現することが可能となる。ビルボード以外にも、地面から盛り上がるような線を引くことで丘を作成したり、空に絵を描くと天球面に投影されたり、といった機能が実装されており、全体として、2次元描画操作で表現力のある3次元世界を構築することが可能となっている。



図16 Harold による3次元描画例<sup>[17]</sup>

Bourguignonらは、2次元ストロークで擬似的に3次元世界を構築する別の方法として、ユーザが曲面の輪郭を現すストロークを描くと、その周囲にだけ局所的に曲面を張る方法を提案している。この局所曲面を輪郭線表示することで、ストロークが描かれた視点に近い視点から見たときのみ輪郭が表示され、それ以外の視点からみると見えなくなる、といったことが実現される。雲や木などといったもやもやしたものの表現に適している他、衣服や人物を抽象的に描くこともできる。

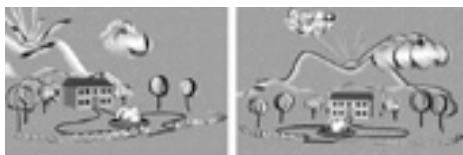


図17 局所的な曲面から構成された世界の例<sup>[16]</sup>

## 6. まとめ

本稿では、ペン入力によって絵や図を描いたり、3次元グラフィクスを操作したりする手法について紹介した。従来のペン入力システムが文字認識や図形整形などのようにキーボードやマウスを利用した入力の置き換えを目指していたのに対して、本稿で紹介したような最近のシステムはペン入力のもつ柔軟性や曖昧さをそのまま生かすことに重点がおかれているといえる。残された課題として、大学や研究所で提案されてきた以上のような手法・システムをいかにして世の中に出していくかという点が挙げられる。タブレットPCのようなペン入力デバイスの普及をきっかけとして、今後この点での進展が見られることを期待したい。

## 参考文献

- [1] Landay, J. A., Myers, B. A.: Sketching Interfaces: Toward More Human Interface Design, In IEEE Computer, 34(3), pp.56-64, March, 2001.
- [2] Lin, J., Newman, M. W., Hong, J. I., Landay, J. A.: DENIM, Finding a Tighter Fit Between Tools and Practice for Web Site Design, Proc. of CHI 2000, pp.510-517, 2000.
- [3] Igarashi, T., Matsuoka, S., Kawachiya, S., Tanaka, H.: Interactive Beautification, A Technique for Rapid Geometric Design, pp.105-114, 1997.
- [4] Davis, R.: Sketch understanding in design: Overview of work at the MIT AI lab. Sketch Understanding, Papers from the 2002 AAAI Spring Symposium, pp.24-31, 2002.
- [5] LaViola, J., Zeleznik, R.: MathPad2, A System for the Creation and Exploration of Mathematical Sketches, ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2004), 23(3), pp.432-440, August 2004.
- [6] Mynatt, Elizabeth D., Igarashi, T., Keith Edwards, W., LaMarca, A.: Flatland, New Dimensions in Office Whiteboards, ACM CHI'99, pp.346-353, 1999.
- [7] Zeleznik, R.C., Herndon, K.P., Hughes, J.F.: SKETCH: An interface for sketching 3D scenes, SIGGRAPH '96.
- [8] Igarashi, T., Matsuoka, S., Tanaka, H.: Teddy: A Sketching Interface for 3D Freeform Design, SIGGRAPH '99.
- [9] Okabe, M., Owada, S., Igarashi, T.: Interactive Design of Botanical Trees Using Freehand Sketches and Example-based Editing, Eurographics 2005.
- [10] Ijiri, T., Okabe, M., Owada, S., Igarashi, T.: Floral diagrams and inflorescences: Interactive flower modeling using botanical structural constraints, SIGGRAPH 2005.
- [11] Igarashi, T., Hughes, J.F.: Clothing Manipulation, UIST'02, 2002.
- [12] Turquin, E., Cani, M-P., Hughes, J. F: Sketching garments for virtual characters, Eurographics Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling 2004.
- [13] Thorne, M., Burke, D., Panne, M.: Motion doodles, an interface for sketching character motion, SIGGRAPH 2004.
- [14] Davis, J., Agrawala, M., Chuang, E., Popovic, Z., Salesin, D.: A Sketching Interface for Articulated Figure Animation, SCA 2003.
- [15] Tolba, O., Dorsey, J., McMillan, L.: Sketching with Projective 2D Strokes, UIST '99, Proceedings of the 12th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology, pp.149-157, 1999.
- [16] Bourguignon, D., Cani, M. P., Drettakis, G.: Drawing for Illustration and Annotation in 3D, Computer Graphics Forum, Vol. 20, (Eurographics 200) pp.C114-C122, 2001.
- [17] Cohen, J. M., Hughes, J. F., Zeleznik, R. C.: Harold, a world made of drawings, NPAR 2000.

## 著者紹介



五十嵐 健夫（いがらし たけお）:

2000年、東京大学大学院においてユーザインタフェースに関する研究により博士号（工学）取得。その後2年間、米ブラウン大学において博士研究員として研究活動に従事し、2002年3月に東京大学大学院情報理工学研究所講師就任、2005年8月より同助教授。ACM SIGGRAPH Impact Paper, Significant New Researcher Award等受賞。ユーザインタフェース、特にインタラクティブコンピュータグラフィクスに関する研究に取り組んでいる。