

『触覚技術の基礎と応用』特集号

解説

力触覚レンダリング—提示力計算とそのためのモデル

長谷川 晶一*

1. はじめに

コンピュータグラフィクスでは、物体の3次元形状や色、光源や視点のモデルから、画面に表示するための2次元画像情報を作る処理をレンダリングと呼ぶ。力触覚提示の場合にも、物体モデルと力触覚インタフェースの状態から、物体に触れたときの感覚・知覚を提示するための力や運動の情報を作り出す計算を力触覚レンダリングと呼ぶ。物体に触れる際には様々な感覚・知覚を得るが、本稿では物体形状、物体の操作感、材質感の提示について解説する。なお、Lin と Otaduy の洋書 [1] には、より多くの話題が取り上げられている。

2. 物体形状の提示

実世界では物体を指先でなぞるとき、指先と物体の間には垂直抗力が働き、指先が物体の中に侵入することはないため、なぞることで物体の形を知覚できる。計算機内の物体モデルの場合でも、力覚インタフェースが垂直抗力に相当する力を指先に与え、指先の侵入を防ぐことができれば、指先を動かして表面をなぞることで物体モデルの形状を知覚できる。

2.1 Penalty 法

力覚インタフェースは位置を計測して力を提示する場合が多いので、ここでは位置に応じて力を提示することで抗力を模擬することを考える。抗力は、指先が物体に侵入しないように保つ力なので、指先の位置 (= 力覚インタフェースの位置, Haptic Interface Position を略して HIP と書く) が物体モデルに侵入した場合に、物体の外に HIP (指先の位置) を追い出す向きに力を加えることが考えられる。

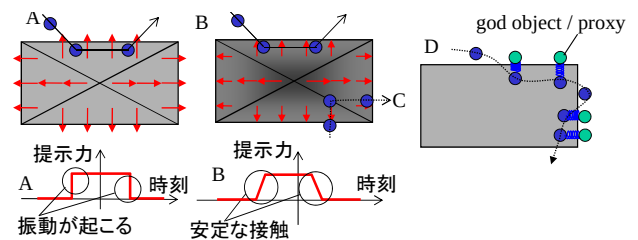
しかし、図 1-A のように、HIP が物体内部に入ったとたん強い力を加えてしまうと、ゆっくりと HIP を動かしても突然大きな力が出ることになり、物体に触れるたびに撃力が加わることになる。手は撃力により動くので、実際には物体に触れた瞬間に弾かれることが繰り返されてしまう。そこで、力を HIP の物体への侵入距離に比例させると、比例係数が小さければ安定な接触が提示できる (図 1-B)。この方法は、抗力が満たすべき拘束条件 (= HIP が物体に侵入しない) を満たすための力を、

拘束を違反した量 (= 侵入量) に比例させ「罰として」与えるので、Penalty 法と呼ばれる。

2.2 God Object 法

Penalty 法では、どちらから HIP が侵入したか区別しないため、例えば図 1-C の軌跡のように、物体を強く押すと途中で提示力の向きが不自然に変化してしまうという問題が生じる。

そこで図 1-C のように、質量を持たず、物体に侵入せず、できるだけ HIP に近づこうとする仮想の物体 (god object [2] や Proxy [3] と呼ばれる) を考え、Proxy と HIP の間にバネモデルを考え、バネによる力を提示する手法が用いられる。



第 1 図 物体形状を提示する手法を考える

2.3 テクスチャの提示と法線の補完

God Object 法では物体形状は三角形メッシュモデルで表現する。表面の細かな凹凸まで三角形メッシュで表現しようとする、三角形の数が増え計算量が増えてしまう。そこでコンピュータグラフィクスで用いられるテクスチャマッピングの手法を応用して、2次元画像を三角形にマップし、画素値に応じて提示する面の法線を変化させるなどすることで細かな形状を提示することが提案されている。また、なめらかな曲面を提示するために、頂点に法線を持たせ三角形内は法線を補間する Phong シェーディングのような手法も提案されている [4,3]。

3. 物体の操作感

遠隔地の物体を操作する遠隔操作では、操作者が動かすスレーブアームの動きに合わせて遠隔地のスレーブアームが動く。スレーブアームに加わる力をマスターアームを介して操作者に提示するバイラテラル制御が行われる [5]。

* 東京工業大学 研究院

Key Words: haptic rendering

3.1 ツールとバーチャルカップリング

計算機内の物体モデルをバーチャルなスレーブアームで操作する場合にも、マスタアームがスレーブアームに加わった力を提示することが望ましい。この考えから、スレーブアームに相当するツールとマスタアームに相当する力覚インタフェースの間をバネダンパモデルで接続し、バネダンパから生じる力を提示するバーチャルカップリングにより Penalty 法の問題を解決している [6]。Proxy[2] と HIP をつなぐバネも、バーチャルカップリングであり、違いは、ツールには質量があり、バーチャル世界で他の物体と同様に動力学シミュレーションされるが、Proxy には質量がないため、質量 $\rightarrow 0$ の極限として、前述のように位置を求める点だけである。

バーチャルカップリングのツールは、動力学シミュレーションの対象になれば何でも良いため、対応する力覚インタフェースが存在するならば、並進回転6自由度の剛体や、多指多自由度のハンドでもよく、各自由度ごとにバーチャルカップリングを用意することで提示力を求めることができる。

3.2 バーチャルカップリングの係数と制御周期

バーチャルカップリングのバネ係数が小さすぎると、HIP の物体への侵入が大きくなると抗力が感じられないため、物体表面がわかりにくくなる。一方でバネ係数を大きくすると制御が不安定になり、振動や大きな力が提示されてしまう。

安定性の保証は重要だが、力覚インタフェースは利用者の手に触れているため、そのままでは解析できない。Colgate と Schenkel[7] は、利用者が力覚インタフェースに対して正の仕事をしない場合に、システム (力覚インタフェースと計算機内の単独では安定なバーチャル世界) のエネルギーが増加しない Passivity を安定性の条件として分析し、システム単独での安定性に比べて保守的な (厳しい) 条件 $b > KT/2 + |B|$ を導出した。ここで b は力覚インタフェース自体の粘性 (ダンパ) 係数、 T は制御周期、 K, B はバーチャルカップリングのバネダンパ係数である。

この式は、バーチャルカップリングのダンパ係数 B は安定性には貢献せずバネだけで良いこと、バネ係数 K を大きくしたければ、制御周期 T を小さくしなければならないこと、力覚インタフェース自体が持つ粘性抵抗が小さい (=軽く動かせるよい力覚インタフェース) ほど、 KT を小さくしなければならないことを示している。

この条件は、シミュレーション可能なすべての周波数で、力覚インタフェース自体の粘性係数が一定であること、バーチャル世界が安定性の限界にある場合にも Passivity が成り立つことを求めており、実際の使用条件より厳しいため、実際にはこれより大きな K や B が用いられる場合もある。文献 [7] は、周波数を残した形の条件式や、システム単独の安定性との比較も示している。

3.3 物体の動力学の提示と機構透明性

実世界で物体や機構を操作する場合、物体の重量や慣性、機構の弾性や粘性を知覚できる。力覚インタフェースとバーチャルカップリングを介して操作する場合にも、物体モデルを動力学シミュレーションにより動かすと、バーチャルカップリングを介してこれらを知覚することができる。文献 [4] では並進3自由度、文献 [8,9] では回転を含む平面運動、6自由度の剛体やリンク機構の運動をシミュレーションし、バーチャルカップリングを介して操作感を提示している。

ところで、文献 [4] では God Object、文献 [9] ではツールを用いている。物体を動かしたとき慣性力は質量や慣性テンソルによるが、ツールには質量があるため両者で感じられる質量や慣性は異なる (図2)。



第2図 ツールと God Object による慣性力の違い

物体モデルを直接手で操作する場合により近いのは God Object 法であり、力覚インタフェースのインピーダンス (慣性、粘性、弾性) だけが追加される。ツールを用いるとツールのインピーダンスが追加されてしまい、より重たい操作感となる。慣性力などの動力学特性の提示を考えると、追加される余分なインピーダンスが小さいほど直接手で操作する場合に近くなる。この直接手で操作した場合とのインピーダンスの近さを機構透明性と呼ぶ。

機構透明性を改善するためには、操作の際の力は、力覚インタフェースのインピーダンスを制御して、物体モデルのインピーダンスに合わせることで提示できる [10,11]。また、力覚インタフェースの慣性力を補償することで機構透明性を高めることもできる [11]。ただし、補償のためのフィードバック係数は制御の安定性が保証できる範囲に限られるため、制御周期や計測精度により提示可能なインピーダンスの範囲は限られる。

3.4 接触の提示

前述したとおり、バーチャルカップリングのバネ係数 K は制御周期 T との兼ね合いで大きくすることが難しい。このため、物体モデルに触れた瞬間には大きな抗力が提示されないため、接触の感触はわかりにくくなりがちである。バーチャルカップリングにダンパ係数 B を与えると、接触により God Object の速度が大きく変化するため、大きな力が生じ接触がわかりやすくなる。しか

し HIP が物体から離れる際にも大きな速度変化があり、このときのダンパによる力には HIP を物体に引き寄せる向きであるため、指が物体に貼り付くような感覚が提示されてしまう。

テレオペレーションの分野ではスレーブアームで生じる振動をマスタアームに伝えることで操作しやすくなることが知られている [12]。また、VR 世界の物体モデルの操作でも、接触時に振動を提示すると材質の区別がつかなくなりリアリティが向上することが知られている [13]。また、バーチャルカップリングの力に加えて、接触時に撃力を提示することで、接触の知覚を助けられることも指摘されている [14]。

3.5 マルチレートシステム

バーチャルカップリングのバネ係数 K を十分な大きさにした場合、力覚インタフェースの安定性に必要な短い更新周期 T は、1ms 程度と物体運動の動力学シミュレーションに必要な更新周期と比べて短くなることが多い。動力学シミュレーションの周期が短いと使用できる計算量が少なくなり、シミュレーション対象の物体数や複雑さの制限が厳しくなる。そこで、力覚レンダリングと物理シミュレーションの更新周期を分けたマルチレートシステムが提案されている。

Adachi ら [15] は、バーチャル世界の物体モデルで HIP に一番近い点の法線を持つ面を中間表現として抽出・更新し、これを短い更新周期で力覚提示することを提案している。Hasegawa ら [16] は、力覚レンダリングにより中間表現に加わった力積を、更新周期の長い動力学シミュレータ内の物体モデルに加えることで、動的バーチャル世界のマルチレートシステムを実現した。Susa ら [17] は、動力学シミュレータを利用して求めたインピーダンスの情報を中間表現に追加し、中間表現の運動を力覚レンダリングの周期でシミュレーションすることで、[16] では遅れにより正確に提示できなかった動力学特性をより正確に提示できるようにした。

3.6 6 自由度力覚レンダリング

God Object, Proxy, 中間表現とも物体モデルに触れるバーチャル世界の手 (プローブや力覚ポイントとも呼ぶ) の形は球で、3 自由度のバーチャルカップリングにより提示力を計算する。一方、ツールとバーチャルカップリングの場合は、ツールの形状は動力学シミュレータ次第で多自由度のツールとバーチャルカップリングを用いることができるが、十分高速な動力学シミュレータを用いないと制御周期 T が長くなってしまふ。そのため、複雑な形状を持つプローブについて 6 自由度の提示力計算を行う手法がいくつか提案されている。McNeely ら [18] は、物体を表面からの距離情報を持つ Voxel, プローブを点群でモデル化し、Voxel 内の各点の侵入距離に応じて提示力を計算している。Ho ら [19] は物体を三角形メッシュ、プローブを点群でモデル化している。Hasegawa

と Sato [20] は両方を凸メッシュでモデル化し、侵入部分の 3 次元形状に基づいて提示力を計算している。これらはいずれも Penalty 法による。一方、Ortega ら [21] は、ツールの質量 $\rightarrow 0$ の極限として 6 自由度の God Object を提案している。また、Berkelman らや須佐ら [22,23] は中間表現と Proxy を用いて凸形状の組み合わせでモデル化されたプローブについての 6 自由度の提示力計算手法を提案している。

4. 材質感の提示

物の材質を確かめるとき、人は目で見ただけでなく、能動的に手を動かし触れたり擦ったりする [24]。物体に触れると接触力 (垂直抗力と摩擦力) が加わるほか、皮膚の変形や温度の変化などいろいろな現象が生じるが、ここでは力と振動による材質感の提示について解説する。

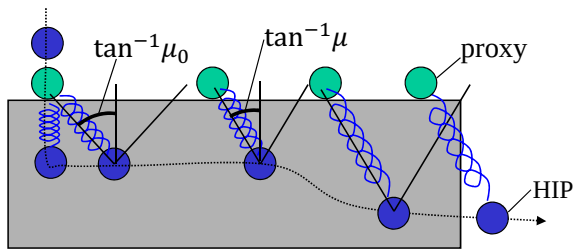
4.1 抗力と摩擦力の提示

バーチャルカップリングによる抗力はバネダンパモデルによるため、係数 K, B により物体表面の硬軟を感じさせることができる。しかし実際には Passivity [7] を保つために大きな K, B を使うことはできない。一方、接触時に振動や撃力を加える手法 [13,14] は安定性に影響を与えないため、大きな振動や撃力により硬さを表現することができる (4.2 節参照)。

また、摩擦力を決める摩擦係数は材質によるので、材質感の手がかりとなる。God Object 法を拡張した Proxy をクーロンの摩擦モデルに基づいて移動させることで、抗力と摩擦力の両方を提示する Proxy 法 [3] が提案されている。Proxy は抗力に加えて摩擦による制約条件も考慮しつつ HIP にできるだけ近づくように動く。更新ごとの Proxy の動きは次のような手順となる。まず物体と接触するまで HIP に向かって動き、次に物体表面に沿って HIP に向かって移動するかどうかを判別する。もし直前の更新で水平方向に移動していれば動摩擦、そうでなければ静止摩擦が働くと考え、バーチャルカップリングによる力と摩擦力を比較する。具体的には、バーチャルカップリングと垂直抗力のなす角度を θ 、動摩擦係数を μ 、静止摩擦係数を μ_0 として、前回移動していたなら $\theta < \tan^{-1} \mu$ 静止していたなら $\theta < \tan^{-1} \mu_0$ の場合は摩擦力により静止するので、物体表面に沿っての移動は行わない。そうでない場合は、動摩擦力により静止するまで、即ち $\theta = \tan^{-1} \mu$ となるまで移動する。図 3 に Proxy の動きの例を示す。

4.2 叩いたときの振動

物体を叩くと、物体の材質や構造、叩いた場所や叩き方により異なる波形の振動が生じる。この振動も材質感の手がかりとなる。Wellman ら [13] は、いくつかの材質の物体を異なる速度で叩いた際の振動を計測し、振幅 $A(v)$ が材質により異なる比例係数で叩く速度 v に比例し、材質によって異なる周波数 ω と減衰率 B の減衰正



第3図 Proxy動きの例

弦波 $Q(t) = A(v)e^{-Bt}\sin(\omega t)$ で近似することを提案し、この波形の振動を提示することで、密度や硬さが大きく異なる材質の区別がつくことを示している。振動による材質感は硬さの感覚を含む。Ikeda ら [25] はバーチャルカップリングのバネダンパと振動の硬さ感覚への効果を調べている。Higashi ら [26] は振動波形と硬さの関係を調べている。

Susa ら [27] は、有限要素法のモード解析に基づく振動シミュレーションによって求めた振動波形を提示することで、任意の材質と形状の物体の任意の位置を叩いた際に生じる振動を提示する手法を提案し、叩くことで物体の材質や構造が区別できることを示している。

材質や構造によっては、提示すべき振動には高い周波数が含まれる。人は 1kHz 程度までの振動も感じ取るが、力覚インタフェースが提示できる振動(力の変化)は低い周波数に限られる場合もある。そこで、振動を提示するために、ボイスコイルなどで作られた振動提示装置を付加して振動を提示することもある [28]。糸とコアレスモータを用いた SPIDAR の場合 300Hz 程度までの振動を提示できる [25]。

4.3 摩擦の振動

摩擦は、摩擦係数の違いによる静的な力の違い(4.1節)だけでなく、静止摩擦と動摩擦の遷移による力の変化とそれにより起こる振動も材質感の手がかりになると考えられる。Nahvi ら [29] は、振動がないと乾いた表面でなく液体の中を動かしている感触になり、特徴量の統計が一致する確率的モデルによる振動を付加することで、紙を消しゴムでこするのような感覚が得られたと報告している。Konyo [30] は、指先の皮膚を高速カメラで計測して静止摩擦と動摩擦の遷移により生じる Stick-slip 現象を計測し、同様の振動だけにより摩擦感を提示している。Hasegawa ら [31] は、静止摩擦係数が静止時間の対数に比例して増加する摩擦モデルを用いると、指全体で生じる Stick-slip のパターンを再現でき、紙を指で擦るときの感覚がより現実になると報告している。

5. おわりに

形状の提示など力触覚レンダリングの多くが力を提示する力覚インタフェースを対象にしているが、振動だけによる摩擦の提示 [30] のように、触覚と体性感覚の解明

と提示装置の変化に応じて新たな提示のための計算手法も考案されるようになってきている。力触覚提示の目的がバーチャルリアリティにとどまらず様々な情報提示に広がるにつれ、レンダリングという用語が妥当でない場合も増えているが、提示デバイスを駆動するための信号を作る手法とそのためのモデルと計算手法が力触覚提示に重要であることは変わらないと思う。

参考文献

- [1] M. C. Lin and M. Otaduy. *Haptic rendering: foundations, algorithms, and applications*. AK Peters/CRC Press, 2008.
- [2] C. B. Zilles and J. K. Salisbury. A constraint-based god-object method for haptic display. In *Proc. 1995 IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots*, Vol. 3, pp. 146–151. IEEE, 1995.
- [3] D. C. Ruspini, K. Kolarov, and O. Khatib. The haptic display of complex graphical environments. In *Siggraph*, Vol. 97, pp. 345–352, 1997.
- [4] K. Salisbury, D. Brock, T. Massie, N. Swarup, and C. Zilles. Haptic rendering: Programming touch interaction with virtual objects. In *Proc. of the 1995 symposium on Interactive 3D graphics*, pp. 123–130. ACM, 1995.
- [5] 横小路泰義. 特集 テレロボティクスの理論 マスタ・スレーブ制御の理論. 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 6, pp. 794–802, 1993.
- [6] J. E. Colgate, M. C. Stanley, and J. M. Brown. Issues in the haptic display of tool use. In *Proc. 1995 IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots*, Vol. 3, pp. 140–145. IEEE, 1995.
- [7] J. E. Colgate and G. G. Schenkel. Passivity of a class of sampled-data systems: Application to haptic interfaces. *J. of robotic systems*, Vol. 14, No. 1, pp. 37–47, 1997.
- [8] D. Ruspini and O. Khatib. Dynamic models for haptic rendering systems. In *Advances in Robot Kinematics: Analysis and Control*, pp. 523–532. Springer, 1998.
- [9] B. Chang and J. E. Colgate. Real-time impulse-based simulation of rigid body systems for haptic display. In *Proc. Symp. on Interactive 3D Graphics*, pp. 200–209, 1997.
- [10] C. L. Clover, G. R. Luecke, J. J. Troy, and W. A. McNeely. Dynamic simulation of virtual mechanisms with haptic feedback using industrial robotics equipment. In *Proc. of Int'l Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 724–730. IEEE, 1997.
- [11] C. R. Carignan and K. R. Cleary. Closed-loop force control for haptic simulation of virtual environments. 2000.
- [12] D. A. Kontarinis and R. D. Howe. Tactile display

- of vibratory information in teleoperation and virtual environments. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, Vol. 4, No. 4, pp. 387–402, 1995.
- [13] P. Wellman and R. D. Howe. Towards realistic vibrotactile display in virtual environments. In *Proc. of the ASME Dynamic Systems and Control Division*, Vol. 57, pp. 713–718, 1995.
- [14] J. D. Hwang, M. D. Williams, and G. Niemeyer. Toward event-based haptics: Rendering contact using open-loop force pulses. In *12th Int'l Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2004. HAPTICS'04. Proc.*, pp. 24–31. IEEE, 2004.
- [15] Y. Adachi, T. Kumano, and K. Ogino. Intermediate representation for stiff virtual objects. In *Proc. Virtual Reality Annual Int'l Symposium'95*, pp. 203–210. IEEE, 1995.
- [16] S. Hasegawa, M. Ishii, Y. Koike, and M. Sato. Inter-process communication for force display of dynamic virtual world. *ASME DYN SYST CONTROL DIV PUBL DSC.*, Vol. 67, pp. 211–218, 1999.
- [17] I. Susa, M. Sato, and S. Hasegawa. Multi-rate multi-range dynamic simulation for haptic interaction. In *2011 IEEE World Haptics Conf.*, pp. 233–238. IEEE, 2011.
- [18] W. A. McNeely, K. D. Puterbaugh, and J. J. Troy. Six degree-of-freedom haptic rendering using voxel sampling. In *Proc. of the 26th Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '99*, pp. 401–408, New York, NY, USA, 1999. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [19] S. Ho, S. Sarma, and Y. Adachi. Real-time interference analysis between a tool and an environment. *Computer-Aided Design*, Vol. 33, No. 13, pp. 935–947, 2001.
- [20] S. Hasegawa and M. Sato. Real-time rigid body simulation for haptic interactions based on contact volume of polygonal objects. *Computer Graphics Forum*, Vol. 23, No. 3, pp. 529–538, 2004.
- [21] M. Ortega, S. Redon, and S. Coquillart. A six degree-of-freedom god-object method for haptic display of rigid bodies with surface properties. *IEEE trans. on visualization and computer graphics*, Vol. 13, No. 3, pp. 458–469, 2007.
- [22] P. J. Berkelman and R. L. Hollis. Lorentz magnetic levitation for haptic interaction: Device design, performance, and integration with physical simulations. *The Int'l J. of Robotics Research*, Vol. 19, No. 7, pp. 644–667, 2000.
- [23] 須佐育弥, 長谷川晶一. 6 自由度力触覚レンダリングのための中間表現. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 17, No. 1, pp. 45–54, 2012.
- [24] S. J. Lederman and R. L. Klatzky. Hand movements: A window into haptic object recognition. *Cognitive psychology*, Vol. 19, No. 3, pp. 342–368, 1987.
- [25] Y. Ikeda and S. Hasegawa. Characteristics of perception of stiffness by varied tapping velocity and penetration in using event-based haptic. In *Proc. of the 15th Joint virtual reality Eurographics conf. on Virtual Environments*, pp. 113–116. Eurographics Association, 2009.
- [26] K. Higashi, S. Okamoto, Y. Yamada, H. Nagano, and M. Konyo. Hardness perception based on dynamic stiffness in tapping. *Frontiers in Psychology*, Vol. 9, p. 2654, 2019.
- [27] I. Susa, Y. Takehana, A. Balandra, H. Mitake, and S. Hasegawa. Haptic rendering based on finite element simulation of vibration. In *2014 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 123–128. IEEE, 2014.
- [28] 齋藤靖之, 只野耕太郎. スタイラスの共振を利用したハプティックデバイスの硬さ表現能力の向上. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 24, No. 1, pp. 93–102, 2019.
- [29] A. Nahvi, J. Hollerbach, R. Freier, and D. Nelson. Display of friction in virtual environments based on human finger pad characteristics. In *Proc. ASME Dynamic Systems and Control Division, DSC*, Vol. 64, pp. 179–184, 1998.
- [30] M. Konyo, H. Yamada, S. Okamoto, and S. Tadokoro. Alternative display of friction represented by tactile stimulation without tangential force. In *Int'l Conf. on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 619–629. Springer, 2008.
- [31] S. Hasegawa, Y. Hashimoto, and H. Mitake. Realistic friction rendering using time-varying friction coefficients. In *World Haptics 2017 Work in Progress Paper*, p. WIP.29, 2017.

著者略歴

は せ がわ しゅういち
長 谷 川 晶 一 (非会員)

1997 年東京工業大学工学部電気電子工学科卒業。1999 年同大学大学院知能システム科学専攻修士終了。同年ソニー株式会社入社。2000 年東京工業大学精密工学研究所助手。2006 年 9 月博士 (工学)。2007 年電気通信大学知能機械科准教授。2010 年東京工業大学精密工学研究所准教授現在に至る。バーチャルヒューマン, 物理シミュレーション, 力触覚, ヒューマンインタフェースロボットの研究に従事。日本バーチャルリアリティ学会, 日本ロボット学会, 計測自動制御学会, 情報処理学会会員。