材質識別のための櫛状多機能触覚センサ

正員 李 徳 勝 (佐賀大)

正員 和 久 屋 寛 (佐賀大)

正員 信 太 克 規 (佐賀大)

Comb Shaped Multi-Functional Tactile Sensor For Material Discrimination

Desheng Li, Member, Hiroshi Wakuya, Member, Katsunori Shida, Member (Saga University)

This paper presents a novel multi-functional tactile sensor. It has a mono-structure, but has three kinds of sensing functions for discriminating material properties and a touch force sensing function which is a basic function in a tactile sensor. The proposed sensor is used to discriminate typical materials such as iron, aluminium, copper, brass, rubber, acrylic resin, styrene foam and so on.

The sensor consists of two comb shaped metallic lines on both faces of a thin insulated substrate with eight terminals. From different combinations of these terminals, the four sensing functions discribed above can be realized.

The experiments show good results to discriminate each sample of materials. The proposed sensor is expected to serve as a step toward the development of an artificial skin tactile sensing system in the future.

キーワード： 触覚センサ, 接触センサ, 多機能センサ, 材質識別, センサフュージョン

1 始めに

近年、ロボットの触覚に関する様々な技術は知能ロボット実現のために必要なものという点から強く期待され、ロボットの視覚に関する研究と共に精力的に研究されている。そのような触覚に関する研究は接触の有無や圧覚、滑り覚などの物体表面に関するセンシングのみならず物体の目に見えない部分の情報収集や物体材質識別にまで広がっている⁽¹⁾⁽²⁾。

著者らは、これまで物体に接触させることによって、物体の材質を識別することを目的としたラセン状の多機能センサ⁽³⁾⁽⁴⁾を試作し、そのセンサを用いて様々な物体の材質識別の実験を行ない、その有効性を確かめてきた。そのセンサの特徴は、柔らかな薄い絶縁基板上に蒸着された導体細線により構成された単一構造センサであるにもかかわらず、インダクティブな電気特性とキャパシティブな電気特性及び温度特性の三種類の特性を有するという点にあった。それゆえ、この薄板状のセンサを被測定物体上に接触させることにより、被測定物の物理的特性、すなわち誘電特性、導電特性及び磁気的特性さらには熱伝導特性を測定しえる。その結果、従来の個々の単一機能センサによる識別方法に比して、より簡便で高精度な物体の材質識別を可能とすることを示した。また、その単一構造であることに

よるセンサの単純化、あるいは柔らかな薄形であることによる接触センサとしての機能性という面から、人間の皮膚の感覚すなわち触覚の有する被測定物体の材質を認識する機能の代替として、今後の材質センシングシステム実現への足がかりの役割が期待される。

しかしながら、そのセンサ構造は以下に示すような弱点あるいは不十分な部分を有している。すなわち、これまでに試作したラセン状多機能センサは、

1. 接触力をセンシングすることができない。接触力の程度が触覚（接触）センサの出力にかなりの影響を与えることおよびセンサ自体の保護のためにも、接触力のセンシング機能を付加することが望ましい。
2. 温度センシング機能がヒトの皮膚の感温モデルと異なり、センサ温度の低下を利用するゆえ、温度センシング機能の感度の点で十分とはいえないところがある。
3. 構造の点で、中心部の端子からのリード線が外部に引き出しにくいことから、製作上の困難がある。

以上の理由から、本研究は上述のラセン状センサの弱点を改良することを目的として、センサ基板の裏面の銅薄膜の活用およびセンサの細線構造のラセン状から櫛状への変更を試みた。

図1 櫛状センサ及びセンシング機能
Fig. 1. Comb shaped sensor and its sensing functions

図2 センサのインダクティブな機能の働き
Fig. 2. Activity of inductive function in the sensor

ラセン状センサと櫛状センサの構造を比較すると、後者は図1 (a)に示すように、センサの中心部に端子がなく、製作しやすくなっている。しかし、ラセン状から櫛状に変えることにより、センサの性能パラメータいわゆるセンサの抵抗、静電容量およびインダクタンスどのように変化するかを明らかにする必要がある。そこで、分析を試みた結果、両センサが同面積、同導線幅及び同線間隙の場合について、次の比較結果の得られることが分かった。

1. 両センサの導線の長さが同じゆえ、抵抗は同じである。
2. 櫛状センサのインダクタンスはおおむね櫛数 N_c に比例して増えるが、ラセン状センサの場合は巻数 $N_r (= 2N_c/\sqrt{\pi})$ の二乗に比例して増える(本論文付録参照)。しかし、細線化構造とすることにより櫛数が増加すれば、十分なインダクタンスが得られることになると思われる。
3. 櫛状センサの同一導線間には静電容量が存在しないゆえ、その全静電容量の大きさはラセン状の場合の半分となる。また、細線化構造による巻数あるいは櫛数が増えることにより、両センサの静電容量は増加する。しかし、導線の幅を極端的に減らすことはセンサの相対感度を下げることになると予想される。例えば、キャパシティブな機能のとき、いずれのセンサも倒れたような形でのコンデンサとして働くが、導線の幅が導線の厚さより小さくなると、センサは従来使われているコンデンサのような形で働くことになり、サンプルの影響があまり反映されなくなる。ここで、本センサのインダクタンスとキャパシタンスとのバランスを配慮し、導線の幅は導線の厚さの10倍以上が必要となると考えられる。

本論文はこの櫛状構造センサの四つのセンシング機能、すなわち、インダクティブな機能(L機能)、キャパシティブな機能(C機能)、温度センシング機能(T機能)及び接触力センシング機能(F機能)を実験結果から明らかにしたことを示す。さらに、センサの二種類の温度変化モデル、いわゆる恒温モデル(Model-1)と非恒温モデル(Model-2)を設定し、その場合の温度センシング機能によるセンサ表面の温度変化を考察する。本論文に示す研究は、今後マイクロマシン技術⁽⁵⁾⁽⁶⁾を用いたセンサの細線化によるセンサ感度の向上及び実用化を目指したものである。

2 櫛状センサの構造及びそのセンシング原理

本研究において試作したセンサの構造を図1 (a)に示す。厚さ0.8mmの薄く、かつやや柔らかなエポキシ系絶縁材料表面の厚さ約1.5 μ mの銅薄膜をエッチングにより、幅約0.6mmの一对の櫛状細線としている。基板の裏面も同じ

構造であるが、両面間の電磁気の影響を抑えるために、両面の櫛状細線は直角に配置した構造となっている。また、センサと被測定物体との間の電氣的な接触を防ぐために、センサ表面を非常に薄い絶縁膜で被っている。なお、試作したセンサのサイズは $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ である。図 1 (a) に示すように、本センサ構造では中心部に端子が不要となる点がラセン状センサと異なる、本センサは八個の端子の電氣的な接続の組み合わせを選択することにより、図 1 (b) から図 1 (e) に示す四種類のセンシング機能を得ることができる。これらのセンシング機能を以下に述べる。

2.1 インダクティブな機能

本センサのインダクティブな機能の場合、その櫛状の構造は、図 2 に示すように、正面にある二本の導線による多数のループと見なすことができる。実際に測定した結果、一本の櫛状導線のインダクタンスは約 $1.75\mu\text{H}$ であった。その際、一本の導線に交流電流 i_{13} を流した場合、渦電流現象あるいは磁化現象により、もう一方の導線間 24 に起電力 e_{24} が誘起される。図 2 から、 e_{24} は

$$e_{24} = e_1 + e_2 + e_3 + \dots \quad (1)$$

となる。文献⁽⁴⁾の分析によると、その起電力 e_{24} は被測定物体の導電率、透磁率あるいは流す電流の周波数によって定まる。一般的には、被測定物体が絶縁物の場合のセンサの出力電圧は非磁性金属の場合より大きく、磁性金属に対する出力は絶縁物より大きいという結果が得られている。

2.2 キャパシティブな機能

本センサのキャパシティブな機能の場合、表面上の二本の導線は、図 3 に示すような平面状のコンデンサ C と見なすことができる。そこで、導線を半径 b の円形に近似し、長さ a 、距離 d の両導線間の容量 C は

$$C = \frac{\pi \epsilon a}{\log(d - b)/b} \quad (2)$$

となる。櫛数 N_c の場合、センサの総容量 C_x は

$$C_x = \frac{2\pi \epsilon a N_c}{\log(d - b)/b} \quad (3)$$

となる。ここで、 ϵ は被測定物体の誘電率。

式 (3) から、センサの容量 C_x は被測定物体の誘電率に依存し、誘電率が大きければ、センサの容量は大きくなることから分かる。また、被測定物体がないときのセンサの容量は実測で約 31.2pF であった。本センサでは、この場合の測定に際し、センサへの外乱の混入を防ぐために基板の反対面にある二本の薄い導線をシールドとして用いている。なお、センサ出力を電圧として得るために、センサと直列に接続した $1\text{k}\Omega$ の抵抗の両端から出力を得ている。

図3 センサのキャパシティブな機能
Fig. 3. Sensor used as capacitive function

2.3 温度センシング機能

鉄、水、空気などの物質によって熱伝導特性が異なる。物体内の単位面積を単位時間に通過する熱量 $q[\text{W}/\text{m}^2]$ は、

$$q = -\lambda du/dx \quad (4)$$

で表わされる。ここに u は温度、 x は距離、比例定数 $\lambda[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ は物質により定まる熱伝導率である。上式から、熱伝導率の情報により材質を識別する場合には、温度差が必要であることが分かる。

本研究は試料の熱伝導率の情報を得るために、センサ基板の反対面にある一対の導線のうちの一本の導線（実測抵抗 1.7Ω ）をヒータとして用い、もう一本の導線を温度制御センサとして用いる。さらに、本センサは参考文献⁽⁴⁾に示すコントロール回路と組み合わせ、センサの温度を室温より高い一定の温度に保つ。センサを室温中の被測定物体と接触させたときに、センサの温度が下がることは、センサ表面にある二本の導線の抵抗の温度変化によって生じる変化から検出される。その場合、センサの温度の下がる速度は被測定物体の材質によって異なる。

2.4 接触力センシング機能

センサ本体が柔らかく、圧力により変形しやすい場合、図 3 に示すように、センサ基板の両面にある導線を一対の電極として、本センサを静電容量型接触力センサと見なす。図 3 及び図 4 から以下の式が得られる。

$$C_F = C'_1 + C'_2 + C'_3 + \dots = \frac{\epsilon S}{d} \quad (5)$$

$$C'_F = \frac{\epsilon S}{d - \Delta d} \quad (6)$$

また、ある程度の圧力変化の範囲で、

$$\Delta F \propto \Delta d \quad (7)$$

ゆえに

$$\Delta C = \frac{\epsilon S}{d - \Delta d} - \frac{\epsilon S}{d} \approx \epsilon S \frac{\Delta d}{d^2} \propto \frac{\epsilon S}{d^2} \Delta F \quad (8)$$

図4 センサの力センシング機能の働き
Fig. 4. Principle of touch force sensing function in the sensor

ただし、 C_F は圧力 F の時のセンサの容量、 C'_F は圧力 $F + \Delta F$ の時のセンサ容量、 Δd は圧力 ΔF によるセンサ厚さの変化、 ϵ はセンサ基板の誘電率、 S はセンサの等価面積である。式 (8) によるセンサ容量の変化量 ΔC はある程度の圧力変化の範囲で圧力 ΔF に比例することがわかる。

3 実験結果

本センサのインダクティブな機能及びキャパシティブな機能による実験結果を図5 (a) に2次元的に示す。ここで、実験用サンプルは全て、縦 10cm 、横 10cm 、厚さ 1cm の長方体である。また、センサに加える入力信号の周波数は 25kHz であり、接触圧力は 1kg である。横軸に本センサのインダクティブな機能によるセンサの出力電圧、縦軸に本センサのキャパシティブな機能によるセンサに直列に接続した基準抵抗 ($1\text{k}\Omega$) の端子間電圧を示す。この実験結果を図5 (b) のラセン状センサ (その面積は約櫛状センサの面積の $1/2$) の結果と比べると、インダクティブな機能において、センサ感度は若干下がるが、キャパシティブな機能の場合、その感度の低下は見られないことが分かった。

また、接触力センシング機能の場合、本センサの接触力による静電容量変化 C/C_M (C_M は接触力 5kg のときのセンサの静電容量) は図6の R_1 として示される。本センサ基板はエポキシ系絶縁材料ゆえ、圧力変化に対するセンサ感度 C/C_M は十分とはいえないことが実験結果より分かる。しかし、センサ基板材質として柔らかなゴムを用いるならば、その実験結果を図6のパラメータ R_2 として示したように、十分な接触力センシング機能を得ることが分かる。この結果から、今後、より柔軟なセンサ材質を用いることにより、圧力変化に対するセンサ感度の向上が期待され、本センサの接触力センシング情報によるアクチュエータでの接触力調整が可能となり、より安定な材質識別動作が実現しうるであろう。

また、本センサの温度センシング機能については、非恒温モデル (Model-1) の実験結果を図7に、恒温モデル (Model-2) に関しては図8に示す。両モデルにおける実験結果を比べると、モデルにより異なる温度変化を示すこと

(a) Experimental results of comb shaped sensor

(b) Experimental results of spiral sensor

図5 L機能及びC機能における両センサの実験結果の比較

Fig. 5. Comparison of experimental results in capacitive and inductive function between comb shaped sensor and spiral sensor

図6 接触力センシング機能における実験結果

Fig. 6. Experimental results in touch force sensing function

図7 温度センシング機能の実験結果 (モデル-1)
Fig. 7. Experimental results in thermal function (Model-1)

図8 温度センシング機能の実験結果 (モデル-2)
Fig. 8. Experimental results in thermal function (Model-2)

が分かる。前者は、一定の温度降下 (例、30 °Cから10 °Cまで) にかかる時間が材質によって異なり、一方後者はセンサ表面 (絶縁膜の真下) における最終的な温度が材質によって異なることが示された。

4 温度センシング機能のモデルの考察

本センサの非恒温モデル、すなわちセンサをサンプルに接触させると同時にセンサに流す電流を止める場合、その実験条件は文献⁽⁴⁾と同じゆえ、同じ実験結果となることが考えられる。一方、恒温モデルの場合、センサの裏面に常に一定の高い温度に保っている、これは人の皮膚を模倣した感温モデルに近いと考えることができる。本節では、図9 (a) に示す実際のセンサとサンプルとの接触状態を図9 (b) に示すような単純なモデルで表わし、その非恒温モデルと恒温モデルにおける挙動を考察する。両モデルのセンサ表面の温度変化を比較することにより、今後のセンサ感度の改善を意図している。それらの分析⁽⁷⁾⁽⁸⁾により、次の結論が得られる。

(A) 非恒温モデルの場合:

図9 センサの温度センシングのモデル
Fig. 9. Thermal sensing function model of sensor

1. センサ表面の温度は接触瞬間に初期値定理により、

$$\lim_{t \rightarrow 0} u_{1or2} = \frac{\sqrt{\lambda_1 p_1 c_1} Q_T}{\sqrt{\lambda_1 p_1 c_1} + \sqrt{\lambda_2 p_2 c_2}} \quad (9)$$

となる。すなわち、センサ表面 (F点) の温度は、接触ときに、センサの初期温度 Q_T から急激に変化する。その温度はサンプルの厚さに関係なく、最高温度となる。但し、 λ_1 , c_1 , p_1 はそれぞれ、センサの熱伝導率、比熱、密度であり、 λ_2 , c_2 , p_2 はそれぞれ、サンプルの熱伝導率、比熱、密度である。

2. 時間が無限になると、センサ表面の温度、センサ内の温度 u_1 およびサンプル内の温度 u_2 は最終値定理による環境温度 (ここで零度を仮定する) となる。すなわち、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} u_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} u_2 = 0 \quad (10)$$

(B) 恒温モデルの場合:

1. センサ表面の温度は接触瞬間に非恒温モデルと同じように急激に変化する。
2. 無限時間後には、センサ表面の温度は最終値定理により、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} u_{1or2} = \frac{\lambda_1 L_2}{\lambda_1 L_2 + \lambda_2 L_1} Q_T \quad (11)$$

となる。すなわち、センサ表面の最終的な温度はセンサの厚さ L_1 及びサンプルの厚さ L_2 に関係することになる。これはサンプルの厚さ依存性を生じることから利用しにくいと考える。

図10は両モデルのセンサ表面 (図9のF点) の温度変化である。但し、その場合、他の要素を含むセンサの厚さ、5mm、環境温度、0 °Cと設定する。図10から、理論的には非恒温モデルより恒温モデルの方がセンサ表面の温度変化が大きく、材質識別に適しているといえる。

図 10 センサ表面温度変化の数値解析結果

Fig. 10. Surface temperature change of sensor (numerical analyses)

5 まとめ

本論文は物体の材質認識を目的として、インダクティブな機能とキャパシティブな機能及び温度センシング機能の三種類の被測定物体の物理的特性の検出機能、さらに接触力の検出機能も可能とする単一構造櫛状薄板触覚センサについて述べたものである。この二対の薄い絶縁板上の櫛状銅薄膜細線からなるセンサにより、数種類の典型的な物体の材質の識別を行ない、その有効性を示した。櫛状センサはラセン状センサと比べると、より簡単な構造である共に、ヒトの皮膚を模倣した感温モデルに近い恒温モデルとすることを示した。さらに、本論文は非恒温モデルと恒温モデルの双方の考察により得られた結果から、今後のセンサ設計へのヒントを得た。今後、このセンサを必要に応じて縮小（例えば $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ ）し、マイクロマシン技術で細線化することによる櫛数の増加を実現させ、より効率的なセンサとして実用化を目指したい。

(平成 8 年 6 月 7 日受付、同 9 年 2 月 3 日再受付)

参考文献

- [1] S. Omata: "New Type Tactile Sensor for Sensing Hardness Like the Human Hand and Its application for Living Tissue", Technical Digest of 9th Sensor Symposium in Japan, pp. 257-260, 1990
- [2] 坂口 豊: 能動的感覚統合による触知覚認識システム, 計測自動制御学会論文集, Vol.31, No. 8, 1217/1226 (1995)
- [3] 李 徳勝, 信太 克規: 容量-誘導形単一構造接触センサによる材質識別, 計測自動制御学会論文集, Vol.31, No. 9, 1252/1257 (1995)
- [4] 李 徳勝, 信太 克規: 材質識別のための単一構

図 11 両センサのインダクタンス

Fig. 11. Inductance of two kinds of sensors

造多機能接触センサ, 電気学会論文誌 C, Vol.115-C, No. 7, 908/913 (1995)

- [5] 江刺 正喜: 物理センサ, 電気学会論文誌 E, Vol.115-E, No. 1, 18/21 (1995)
- [6] 藤田 博之: マイクロマシン, 電気学会論文誌 E, Vol.115-E, No. 1, 26/29 (1995)
- [7] R. A. Russell and F. J. Paoloni: A Robot Sensor for Measuring Thermal Properties of Gripped Objects, IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol.IM-34, No. 3, pp. 458-460, Sept. 1985
- [8] 李 徳勝: 材質識別接触センシングに関する研究, 佐賀大学学位論文 (1996)
- [9] 後藤 憲一, 山崎 修一郎: 電磁気学演習, 共立出版株式会社 (1991)

付録: インダクタンスの計算

図 11 に示すように、両センサの面積が同じ場合、 $\pi r^2 = a^2$ ゆえ、 $r = a/\sqrt{\pi}$ となる。但し、 r はラセン状センサの半径、 a は櫛状センサの長さである。また、櫛状センサの櫛数が N_c の場合、ラセン状センサの巻数 N_r は $1.128 N_c (N_r = 2N_c/\sqrt{\pi})$ となる。

ラセン状センサのインダクタンスについて以下に示す。図 11 (a) を参照して、コイル i の内部インダクタンスは、

$$L_{ii}^r = \frac{\mu(2\pi r_i)}{8\pi} = \frac{\mu r_i}{4} \quad (12)$$

である。また、コイル i の自己インダクタンスは、

$$L_{ie}^r = \mu_0 r_i [\log(8r_i/b) - 2] \quad (13)$$

である。さらに、コイル i と j の相互インダクタンスは、Neumann の公式により、

$$M_{ij}^r = \mu_0 \sqrt{r_i r_j} [(2/k - k)K - 2E/k] \quad (14)$$

表1 L_c 及び L_r の数値実験結果
Table 1 Simulation results of L_c and L_r
Simulation condition: $a=50\text{mm}$

b(mm)	N_c	$L_c(\mu\text{H})$	N_r	$L_r(\mu\text{H})$
0.22			11	2.05 (2.2)
0.3	10	1.64(1.75)	11	2.85
0.3/2	20	3.87	23	10.4
0.3/4	40	8.97	45	41.6
0.3/8	80	20.4	90	163
0.3/16	160	45.7	181	648
0.3/32	320	101	361	2608
0.3/64	640	223	722	10500

()内の数値は実測値

である。但し、 $k^2 = 4r_i r_j / (r_i + r_j)^2$, $r_i = iR/N_r$
 $K = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \theta}}$, $E = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-k^2 \sin^2 \theta} d\theta$
 N_r 個のコイルの全インダクタンスは次式で示される。

$$L_r = \sum_{i=1}^{N_r} (L_{ii}^r + L_{ie}^r) + 2 \sum_{i=1}^{N_r-1} \sum_{j=i+1}^{N_r} M_{ij}^r \quad (15)$$

次に楕円センサのインダクタンスについて示す。図1 1 (b)を参照して、楕円 N_c の場合、長さ a の $2N_c$ 本導線の内部インダクタンスは、

$$L_i^c = \frac{\mu(2N_c a)}{8\pi} = \frac{\mu N_c a}{4\pi} \quad (16)$$

である。また、 $2N_c$ 本の導線の自己インダクタンスは、

$$L_e^c = 2N_c \frac{\mu_0}{2\pi} \left(a \log \frac{a + \sqrt{a^2 + b^2}}{b} - \sqrt{a^2 + b^2} + b \right) \quad (17)$$

である。さらに、2本の導線間の相互インダクタンスは、

$$M_{ij}^c = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(a \log \frac{a + \sqrt{a^2 + d^2}}{d} - \sqrt{a^2 + d^2} + d \right) \quad (18)$$

である。それゆえ、 $2N_c$ 本の導線間の相互インダクタンスは、

$$M^c = \sum_{i=1}^{2N_c-1} \sum_{j=i+1}^{2N_c} M_{ij}^c = \sum_{i=2k+1}^{2N_c-1} \sum_{j=i+1}^{2N_c} M_{ij}^{+1} - M_{ij}^{-1} + \sum_{i=2k+2}^{2N_c-2} \sum_{j=i+1}^{2N_c-1} M_{ij}^{+2} - M_{ij}^{-2} \quad (19)$$

となる。但し、 $k=0,1,2,\dots,N-1$

$$M_{ij}^{+1} \text{ に対して, } d = (j-i-1)(d_1+d_2)/2 + d_1$$

$$M_{ij}^{+2} \text{ に対して, } d = (j-i-1)(d_1+d_2)/2 + d_2$$

$$M_{ij}^{-1}, M_{ij}^{-2} \text{ に対して, } d = (j-i+1)(d_1+d_2)/2 \text{ である。}$$

上述の結果を利用して、楕円センサの全インダクタンスは次式で示される。

$$L_c = L_i^c + L_e^c + 2 \sum_{i=1}^{2N_c-1} \sum_{j=i+1}^{2N_c} M_{ij}^c \quad (20)$$

両センサの数値実験の結果を表1に示す。その結果では、楕円センサのインダクタンスは概ね楕円数に比例し、ラセン状センサは概ね巻数の二乗に比例することがわかった。

李 徳勝

(正員) 1962年2月23日生。1988年7月中国ハルビン工業大学大学院修士課程修了。1990年政府派遣留学生として来日留学。平成5年4月佐賀大学大学院博士後期課程入学、平成8年3月修了。博士(工学)。同年4月佐賀大学理工学部電気工学科助手、現在に至る。知能計測、触覚センサなどに関する研究に従事。

和久屋 寛

(正員) 1966年10月9日生。1994年3月東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻博士課程修了。博士(工学)。同年4月佐賀大学理工学部電気工学科助手。1995年同講師、現在に至る。インテリジェント計測に関する研究に従事。電子情報通信学会、日本神経回路学会、日本ME学会、計測自動制御学会会員。

信太 克規

(正員) 1943年5月6日生。1970年3月東北大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了。同年4月通産省工業技術院電気試験所(現、電子技術総合研究所)入所。1987年同所標準計測部電気標準室長。1990年佐賀大学理工学部電気工学科教授、現在に至る。精密電気計測に関する研究に従事。工学博士。計測自動制御学会、応用物理学会、日本ME学会、日本ロボット学会、IEEE会員。