

基礎論文

残像による動体軌跡上情報投影手法の提案と その実現にむけた残像特性の基礎的研究

安井雅彦^{*1} アルバロ カシネリ^{*1} 奥村光平^{*2} 奥寛雅^{*3} 石川正俊^{*1}

Proposal and fundamental study of a display method
relying on afterimage and a flying tracked object as support for projection

Masahiko Yasui^{*1}, Alvaro Cassinelli^{*1}, Kohei Okumura^{*2}, Hiromasa Oku^{*3} and Masatoshi Ishikawa^{*1}

Abstract – A new method to display information based on the afterimage using moving object is proposed. A laser light spot is projected on a fast moving object and draws pattern so that a human vision could recognize one larger pattern than the size of the object due to the afterimage in the region that the moving object wiped. The purpose of our study is to confirm the feasibility of the proposed method and to determine the fundamental characteristic of vision afterimage in particular with the proposed way of presentation. Preliminary experiment showed that the proposed method presented information to an observer successfully. Fundamental characteristics of visual perception of single scanned laser projection on a moving object were measured.

Keywords : visual afterimage, single scan, display on moving object, laser

1 はじめに

視覚的に情報を人間に伝える情報提示媒体は、情報技術の発展に伴って、新たなデバイスの開発とともにその重要性をさらに高めつつある。

筆者らは、既存技術の制約を覆す新たな情報提示手法として、図1に示すような、任意の動的物体に自由に光点を投影し、その残像軌跡を情報提示面として、大規模空間上に情報が提示可能となる手法を研究してきた[1]。本論文では、新たな情報提示手法を提案し、その提示手法に付随する残像の知覚特性、認識特性についての測定を行った結果を報告する。

従来の情報提示手法では、情報提示面にスクリーンやディスプレイ、あるいは情報提示面を形成するための何らかの装置が予め存在して設置されていることが必要であった。これに対して、近年では提示面に視覚情報提示の媒体を常に存在させる必要のないディスプレイの研究・開発が進んでいる[2, 3, 4, 5, 6, 7]。本研究で提案する新たな手法では、任意の動的物体の軌跡上に自由に光点を描画することで提示面に装置を常に存在させることを必要としないことに加え、持続的な繰り返しの連続提示を前提としない一度きりの情報提示によるディスプレイを提案する。

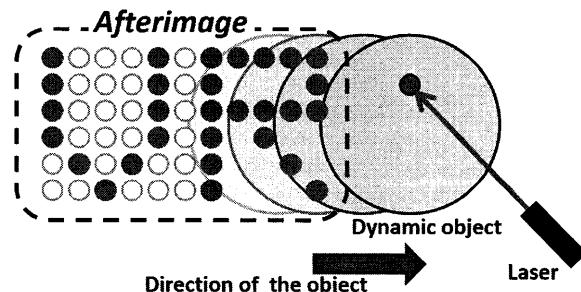


図1 提案手法での情報提示イメージ画
Fig. 1 Outline of this method.

具体的には、光源を持たない移動する物体に対して、その物体の空間的位置に応じて異なるパターンの輝点を提示する。時間的に異なるタイミングで空間的に異なる位置に提示されたパターンを人が観察することによって、その視覚が持つ残像特性がこれを統合し、投影対象となる物体より大きな一枚の情報提示面として認識されることを目指すものである。

これが実現されれば、球技スポーツや競争競技の場においての新たな情報提示が可能となり、スポーツ中継やスポーツ観戦に新しい形態・概念をもたらす。更には、提案手法の特性上、特定位置での一瞬の提示となることから、例えばある特定の場所を見ている観測者にのみ認識可能となるよう提示するなどの、観測者の視線位置・注視状況によって情報提示のON/OFF

^{*1}東京大学情報理工学系研究科

^{*2}鈴木特許総合事務所

^{*3}群馬大学大学院理工学府

^{*1}Graduate School of Information Science and Technology,
The University of Tokyo

^{*2}Suzuye and Suzuye

^{*3}Faculty of Science and Technology, Gunma University

を制御できることも十分に考えられる。

本論文で提案する情報提示手法をより具体的に示すために、図2に提案手法による実際の投影の様子を示す。これは飛翔する球体にレーザーで光点を投影し、直線部分と斜線部分を組み合わせた、3つの山のあるスパイク列を描いたものである。上の三枚に示されるのは飛翔球体のトラッキング映像の1フレーム（露光時間：およそ1[ms]）であり、各時刻では球体の各位置に応じて一点の輝点を提示する。ただし、右二枚の図で輝点が棒状になっているのは1フレームの露光時間に対して、球体上での輝点位置の移動が速いためである。下に示されるスパイク列の図は固定カメラによる一定時間露光（露光時間：およそ16[ms]）によって撮影されたものであり、人間の視覚にはこのように知覚されることを示す。

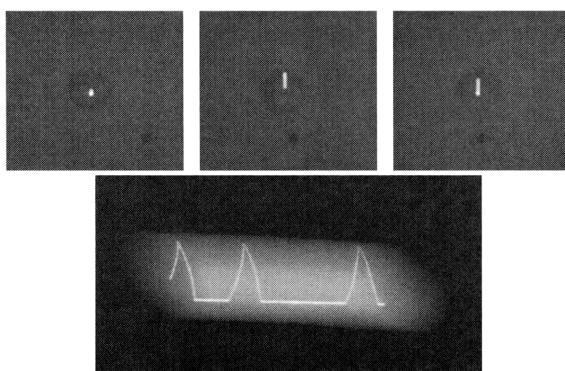


図2 提案手法での投影の様子
Fig.2 Presentation on a fast moving ball.

2 提示手法と従来研究

提案する新たな手法では、任意の動的物体の軌跡上に自由に光点を描画することで何も設置されていない空間上に情報を提示することが可能となっている。従来の手法においても、残像を利用して情報を提示することで、情報提示面全体を常に存在させる必要をなくす手法がある。その例として、図3に示すバーサライタでは高速で往復する光点アレイが残像を形成し、あたかも空中に光点のドットディスプレイが浮かんでいるように見える。このように視覚情報提示の媒体を提示面に常に存在させる必要のないディスプレイのほとんどは、持続する連続提示を行い、繰り返しの提示を前提とするデバイスであった[3, 4, 5, 6, 7]。これに対して渡邊らはサッカードと呼ばれる、眼球が高速で視線移動する動きを利用して残像ディスプレイを提案した[2]。これは、光点列アレイを横切るようにサッカードを誘発させ、その時の眼球運動のタイミングに合わせた

せたパターンを光点列アレイに提示し、一回の眼球による走査で生まれる残像として情報提示を行うものである。

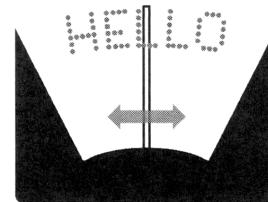


図3 バーサライタ
Fig.3 Device based on moving light array.

これらに対して本提案手法は、提示場所の事前知識がなく、一瞬で一度きりの提示であるがゆえに、対象を中心視野で捉えるため視線方向を移動させるという通常の能動的視覚制御による認識を前提としない手法である。人間の視野は、中心視野部分での空間分解能は非常に高いが、その周辺部に進むに従って空間分解能は急激に低下するため、小さい対象にはその対象を中心視野に収めるため視線移動を行い、大きな対象には対象上で中心視野を細かく動かすことでその対象の全体像を捉えようとする[8, 9, 10, 11]。つまり、前に述べた繰り返しの提示を前提とするデバイスには、提示された情報がその場所に連続的に存在するので、視線を移動させ、中心視野で認識を行う時間が十分にある。渡邊らのサッカードディスプレイについては、眼球にサッカードを誘発させる際、観察者の視線およびその走査位置をある程度制御することで、中心視野を始めとした所望の視野位置への残像描画を前提としている。このため、以上の既存デバイスと本提案手法とは能動的視覚制御による認識という点において異なっていることがわかる。

上に挙げた理由から、提案手法について先行研究から十分に説明することはできず、提案手法での知覚特性・認識特性に関する調査が必要であった。

そこで本論文では、提案手法による情報提示面の実現を実験で実証するとともに、提案手法を応用するための基礎的な知見として、輝点パターンを提示する場合の認識可能範囲や、描画に用いるレーザーの出力及び照明環境の条件と人間の知覚との関係について計測した結果について報告する。

3 実験

3.1 実験概要

本論文では「描画安定性確認実験」「認識可能視野角範囲検証実験」「認識可能コントラスト検証実験」と大きくわけて3つの実験を行う。「描画安定性確認実

安井・カシネリ・奥村・奥・石川：残像による動体軌跡上情報投影手法の提案とその実現にむけた残像特性の基礎的研究

験」では、提案手法での安定した残像描画が可能であるかを検証する。「認識可能視野角範囲検証実験」では、注視点位置からの認識可能範囲を計測する。「認識可能コントラスト検証実験」では、認識に必要な、背景と描画像のコントラストを計測する。

提案手法と基本的に同一の手法によって、飛翔する球体の動体軌跡上に描画を行い、その知覚を実現することはすでに達成されている[1]が、これは破線・矩形波・三角波といった像のおおまかな形状を分類するという比較的低次の認識課題であった。そこで本論文では、後に説明するスパイク列中のスパイク本数を計数するという、より高次の認識課題について、再現性の確かな軌跡が確保された水平運動装置の上で実験を行った。なお、この形状分類レベルでの認識実験の内容と結果の詳細は付録(A.1)に別途記載した。

3.2 実験装置

本論文では、動的物体の任意位置に光点を投影するため、レーザーモジュールとサッカードミラーと呼ぶ装置を用いた。2つの装置の構成を図4に示す。更に投影対象である動的物体の各試行での安定した運動を実現するため、レール上を投影対象が運動する水平運動装置を用いた。以下にその説明を行う。

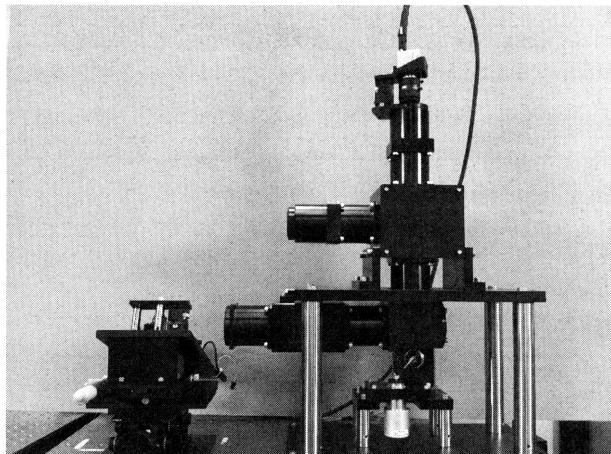


図4 レーザーモジュール（左）とサッカードミラー（右）

Fig. 4 Laser Module and Saccade Mirror.

レーザーモジュール 今回用いる実験装置の光源部分に当たるレーザーモジュールを図5に示す。使用しているレーザー（図5右）は波長532[nm]、出力10[mW]、ビーム径($1/e^2$)1[mm]、ビーム拡がり角0.5[mrad]の固定焦点式グリーンレーザーである。レーザーの出力は必要に応じてNDフィルタによる調整が可能となっている。レーザーのON/OFFは100[us]オーダーで制御し、二枚の鏡によって構成されるガルバノスキャナ（図5左）によって100[us]オーダーでの高速な光線方向制御を行う。

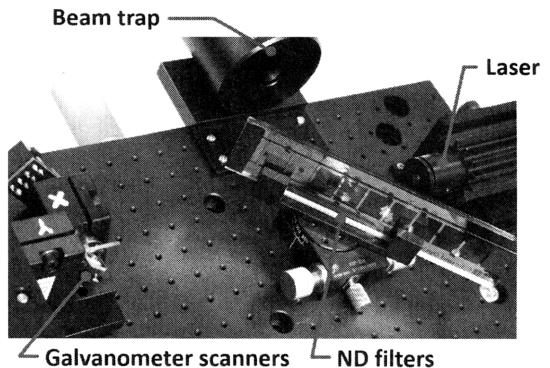


図5 レーザーモジュール
Fig. 5 A photograph of the Laser Module.

サッカードミラー カメラの視線方向やプロジェクターの投影方向を制御する際、本体自体を動かしてしまうとその慣性力によって高速性には限界がある。そこで本体は固定する代わりに、先に紹介したレーザーモジュールに使用されるガルバノスキャナと同様の構造をもつ二枚の回転する鏡を用いて、ミリ秒オーダーの高速な視線方向制御を可能にする機構がサッカードミラーである[12]。より高速な視線制御を実現するためには、使用するミラーの重量は軽く、大きさは小さいものを用いることが望ましいが、駆動する二枚の鏡の後ろにカメラやプロジェクタを単純に設置するだけでは、得られる画角は非常に狭いものとなってしまう。そこでこのサッカードミラーは、瞳転送光学系と呼ばれるレンズ系によって、カメラやプロジェクタの瞳位置を二枚の鏡の間に移すことで、広い画角の光線束すべてがその小さな鏡を通過するような設計を実現している。本システムと高速ビジョンシステムを統合し、対象の位置に合わせて視線方向を制御することで、動体を常にカメラの画角中心に置きながら追従することができる。レーザーモジュールとサッカードミラーの接続の概略を図6に示した。サッカードミラーの高速ビジョン用光軸と同軸にレーザーモジュールからのレーザー光をハーフミラーを用いて入射させることで、動体の任意位置にレーザーの光点を投影することができる。

水平運動装置 再現性のある運動体を用意するため、図7に示す水平運動装置を作成した。直径50[mm]の円形の橙色画用紙を貼付した円盤を投影対象とし、これがゲージの中に敷かれたレールの上を運動する。実験中はレールの背後300[mm]の位置に背景として暗幕を張った。円盤を載せた台車は、ゴムの弾性力によって発射され、発射装置は試行ごとに引く長さが同じとなるよう、フック式の引き金を実装した。発射された円盤は、装置向かって右から左へおよそ4[m/s]から5[m/s]の速度で直線運動する。この速度に幅が

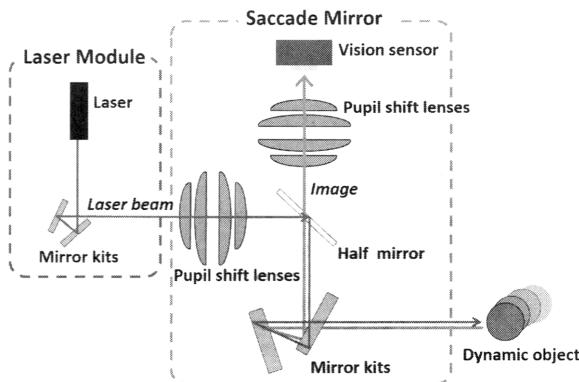


図 6 レーザーモジュールとサッカードミラーの接続
Fig. 6 Connection of the Laser Module and the Saccade Mirror.

あるのは、発射装置の再現性に限界が有ることと、レールの僅かな抵抗により発射直後とレール終端付近では速度に差が生じることに起因している。また、終端において台車の跳ね返りが無いよう、アブソーバによって台車を受け止める。円盤を載せた台車が、発射装置から解放されてアブソーバに吸収されるまでの滑走距離は 1100 [mm] である。

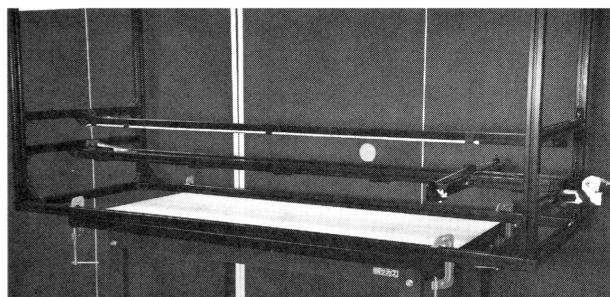


図 7 水平運動装置
Fig. 7 A photograph of the Liner Rail.

被験者視線固定台 被験者の視点位置が変化しないようにするために、図 8 に示す視線固定台を用いた。被験者は顎と額の二点を台に添えることで頭部を安定させる。実験は両目での視認を行い、これより以下では、被験者視点位置とは両眼の中点を示すものとする。被験者視点位置と動体の運動軌跡直線は同一の高さとなるようにした。被験者視点位置正面の円盤軌跡上的一点を注視点と定め、その 40 [mm] 上方に目印を付けた。

図 9 に示すように、被験者、サッカードミラー、水平運動装置を設置し、各実験を行った。被験者視点位置とサッカードミラー瞳位置の間は 350 [mm]、水平運動装置から被験者視点位置までの距離は 2 [m] とした。実験環境は、円盤運動軌跡上でおよそ 400 [lx] 付



図 8 被験者視線固定台
Fig. 8 A photograph of the Head Support.

近、被験者視点位置でおよそ 400 [lx] 付近となるように保った。

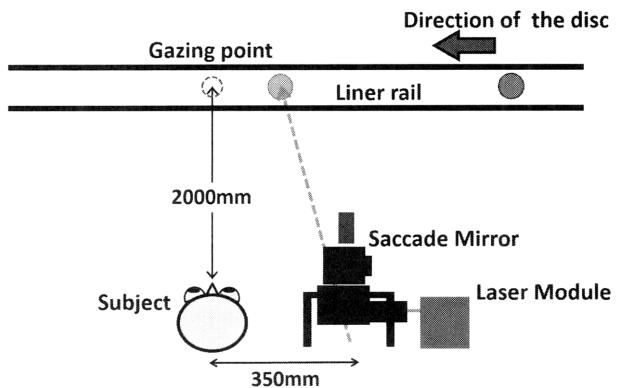


図 9 実験系全体の概要
Fig. 9 The setup of the system.

3.3 描画安定性確認実験

本手法を用いて、任意の位置に安定した残像描画が可能であることを確認する。水平運動装置の円盤軌跡上で、被験者の注視点位置を 0 [deg] 位置と定め、被験者から見て、注視点から右に 5 [deg] の位置を +5 [deg] 位置と呼ぶこととし、同様にもう 3 点を定め、合計 5 点の 0, ±5, ±10 [deg] 位置に対して水平線分と斜線分によって構成された像の描画を行い、像の歪みや像の位置、レーザー光点のはみ出しの有無などを確認した。

描画の手法について説明する。円盤が発射されると、サッカードミラーによって常に円盤はトラッキングされ、描画予定位置の中心からおよそ 165 [mm] 手前的位置を始点として、そのミラー角度データから運動速度の計算が開始される。これをもとにレーザー光点の走査速度が決定される。そして円盤が描画の開始予定位置の直前に来た段階でサッカードミラーの視線方向は描画予定位置の中心で固定する。直後に対象が描画

安井・カシネリ・奥村・奥・石川：残像による動体軌跡上情報投影手法の提案とその実現にむけた残像特性の基礎的研究

開始予定位置に到達した瞬間から、レーザーモジュールのガルバノスキャナによって描画を行う。これは前述の通り、サッカードミラーに使用しているガルバノスキャナより、レーザーモジュールに使用されるものの方が小型で高速であるため、より細密で安定した描画が可能となるためである。描画する像は、被験者視点位置から見て縦方向に 0.5 [deg]、横方向に 2.0 [deg] とした。これは円盤軌跡上ではおよそ縦 17.5 [mm]、横 70 [mm] となる。

この像を、5つの描画位置に対して各 30 回、合計 150 回の描画を行い、その挙動を Vision Research 社製ハイスピードカメラ Phantom v640 を用いて確認した。この結果、描画予定位置と実際の描画位置の誤差は高々 1, 2 [mm] であり、像の歪みは全く認められなかった。また、150 回の描画の中でレーザー光点は常に円盤を中心軸付近にあり、円盤から光点がはみ出るということは無かった。以上から、提案手法での安定した描画が可能であることが確認された。

3.4 被験者への課題

この後説明する「認識可能視野角範囲検証実験」、「認識可能コントラスト検証実験」では、20 代から 30 代の 10 名（男性 8 名、女性 2 名）に対して残像認識の実験を行った。日常生活で眼鏡・コンタクトレンズを使用する被験者には実験中にも着用してもらった。被験者には、実験中は常に注視点を固視してもらい、視線を固定した。この状態で、水平運動装置上の円盤を被験者から見て右から左の方向へと発射し、被験者はその軌跡上に投影される像を観察する。描画する像は図 10 に示した 1 本から 4 本のスパイクを有するスパイク列とした。被験者はこのスパイク列を観察し、何本のスパイクが含まれていたかを口頭で回答する。被験者には予めスパイクの本数は最少 1 本、最多 4 本であるという情報は伝えておく。なお、スパイク列に含まれるスパイクの本数はランダムかつ当確率に決定される。円盤の発射のタイミングは 3 つのカウントダウンの後と定め、投影中に瞬きなどがないように注意を促した。

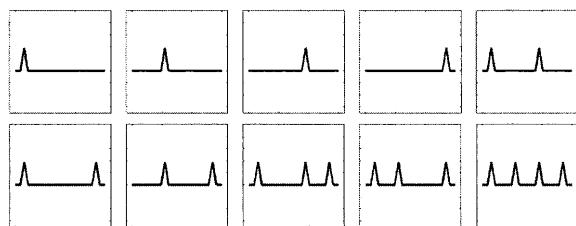


図 10 描画するスパイク列（全 10 種）

Fig. 10 Spikes.

実験の流れは、実験内容全体の説明の後、被験者が

注視点に視線を向けた状態で、円盤に貼付したものと同じ画用紙で作成したスクリーン（縦 60 [mm]、横 200 [mm]）を注視点位置（0 [deg] 位置）に設置し、スパイク列を約 15 秒間連続提示するということを 2 回行い、被験者の色認識能力と視力に問題がないか確認した。その後スクリーンを取り去り、本実験のためのトレーニングとして、発射された円盤への投影を本実験と同一の環境で 2 回行った。このときの像の提示位置は 0 [deg] 位置とした。この連続提示 2 回及び動体軌跡上投影 2 回でのレーザーパワーは、「認識可能視野角範囲検証実験」では 8 [mW]、「認識可能コントラスト検証実験」では 10 [mW] とした。

被験者には、実験中任意のタイミングで休憩をとつて良いことを伝え、疲労による集中力低下が無いよう配慮した。

3.5 描画する像の大きさについて

照明環境にも依存するものの、中心視野での視力が 1.0 付近であった場合、本研究中での実験における最大提示距離 ± 10 [deg] の位置では視力がおよそ 0.1 まで低下する [13] ことから、スパイクの幅は、視力 0.1 で弁別可能なランドルト環の切れ目の間隔 0.167 [deg] よりわずかに狭い 0.16 [deg] とした。

投影対象の視野角速度を ω [deg/s]、描画にかかる時間を T [s]、描画像の水平方向の大きさを S [deg] とすると、各変数は次の関係式で表される。

$$S/\omega = T$$

ここで、動対象は視野角速度の上昇にともなって対象そのものの形状知覚が困難となり [14]、50 [deg/s] 以上で光の帯として知覚される [15] こと、20~100 [ms] の呈示時間では文字の認識が著しく低下する [16] ことが知られており、これらと先述のランドルト環の大きさを考慮して、視野角速度をおよそ 130~140 [deg/s]、描画にかかる時間をおよそ 14~16 [ms]、描画像の水平方向の大きさを 2 [deg]、垂直方向の大きさを 0.5 [deg] とした。

3.6 認識可能視野角範囲検証実験

観測者の視界の中で、注視している点からどの範囲まで像の認識が可能かを確認するため、0, ± 2 , ± 4 , ± 6 , ± 8 , ± 10 [deg] 位置に対してそれぞれ 15 回の提示を行い、各位置での正答率を計測した。左右のどちらに提示するかはランダムに決定される。レーザーパワーは 8 [mW] で固定した。被験者 10 名全員に対して実験を行い、その結果を図 11 に示す。提示を行う順番は、提示位置が 0 [deg] 位置から始まり、最後を ± 10 [deg] 位置で行うというように、視野中心から遠ざかっていくグループと、視野中心に近づいていくグループの 2 つに分けたが、2 つのグループの間に明確な差は認めら

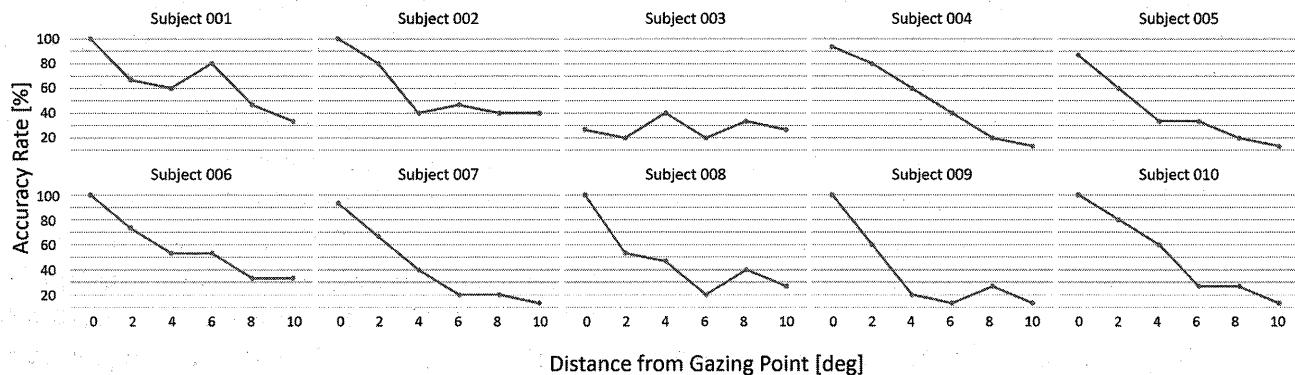


図 11 被験者ごとの認識可能視野角範囲検証実験結果

Fig. 11 Relation of accuracy rate to distance from gazing point (individual).

れなかった。

平均を取ることで全員のデータを統合したものを図 12 に示す。各提示位置におけるデータに対して、チャンスレベル 25%，有意水準 5% で single sample t-test を行ったところ、0 [deg] 位置、 ± 2 [deg] 位置、 ± 4 [deg] 位置において各水準は 25% より有意に高かった。更に、100% と 25% の中間である 62.5% となる視点位置をスパイク列の本数を数えるという課題における閾値と定め、これを線形補間によって計算すると、閾値は ± 2.161 [deg] 位置であった。像の大きさが横方向に 2 [deg] であるので ± 2.161 [deg] 位置まで認識可能ということは、認識可能範囲は ± 3.161 [deg]、つまりおよそ幅 6 [deg] の範囲までこの解像度での認識が可能であることが分かった。

した。なお、認識可能視野角範囲検証実験と認識可能コントラスト検証実験はこの順番に、各被験者に対して 2 週間以内に行い、視力などの条件が変化しないよう考慮した。この点において、被験者 008 は認識可能コントラスト検証実験を行うのが早くとも認識可能視野角範囲検証実験後、4 週間以上先となってしまったため、被験者 008 を認識可能コントラスト検証実験の対象とはせず、先ほどの実験での被験者 008 を除く 9 名（男性 7 名、女性 2 名）に対して実験を行った。その結果を図 13 に示す。提示を行う順番は、レーザーパワーを 2 [mW] から始め、最後を 10 [mW] で行うというように、高強度になっていくグループと、低強度になっていくグループの 2 つに分けたが、2 つのグループの間に明確な差は認められなかった。

平均を取ることで全員のデータを統合したものを図 14 に示す。各提示位置におけるデータに対して、チャンスレベル 25%，有意水準 5% で single sample t-test を行ったところ、すべてのレーザーパワーの値において各水準は 25% より有意に高かった。更に、100% と 25% の中間である 62.5% となる視点位置を注視点に提示されるスパイク列の本数を数えるという課題における閾値と定め、これを線形補間によって計算すると、閾値は ± 2.523 [mW] であった。

ここで、使用したレーザーのビーム径が 1 [mm]、ビーム拡がり角が 0.5 [mrad]、対象までの距離がおよそ 2200 [mm] であるので、投影対象である円盤上でのレーザー光点の直径はおよそ 2.1 [mm] である。また、使用したレーザーの波長 532 [nm] では比視感度係数が「0.88」であるので、閾値であるレーザーパワー 2.523 [mW] でのレーザー光点の光束は 1.517 [lm] とわかる。以上から、レーザーパワーを 2.523 [mW] で像を描画した際のレーザー光が照射されている点の照度は 4.379×10^5 [lx] である。ここで本論文での提案手法におけるコントラスト (C) を背景照度 (L_{bg}) と描画光点照度 (L_{lp}) の比

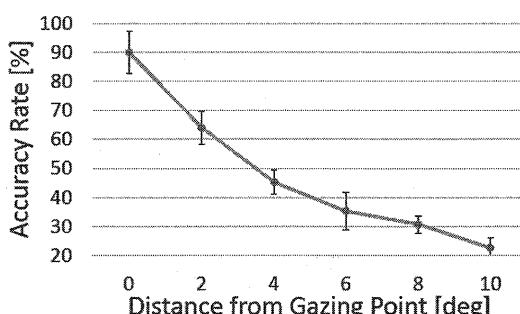


図 12 認識可能視野角範囲検証実験結果

Fig. 12 Relation of accuracy rate to distance from gazing point.

3.7 認識可能コントラスト検証実験

先に示した実験環境の中で、像の認識が可能となるために必要なレーザーパワーを確認するため、0 [deg] 位置にのみ像を提示し、その際にレーザーパワーを 2, 4, 6, 8, 10 [mW] と変化させ、その際の正答率を計測

安井・カシネリ・奥村・奥・石川：残像による動体軌跡上情報投影手法の提案とその実現にむけた残像特性の基礎的研究

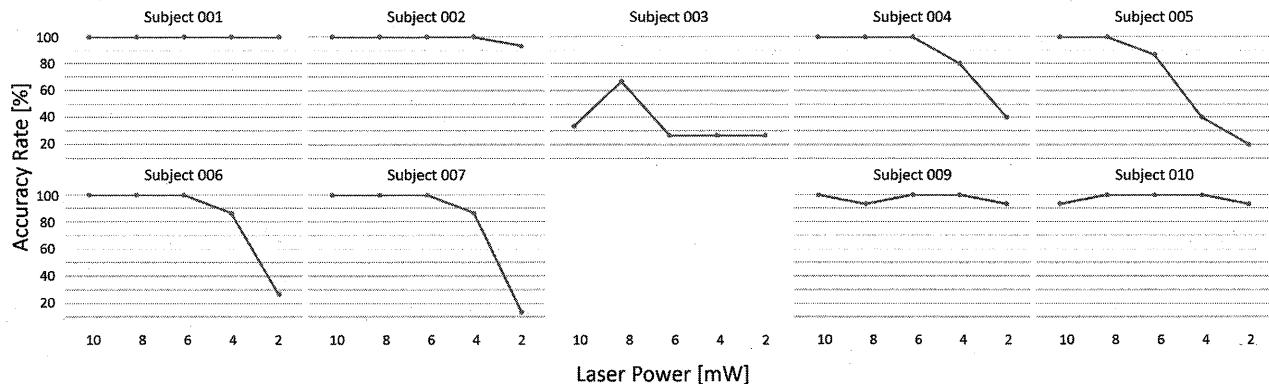


図 13 被験者ごとの認識可能コントラスト検証実験結果
Fig. 13 Relation of accuracy rate to laser power (individual).

と定義すると、コントラストが次式

$$C = L_{lp}/L_{bg}$$

で表すことができる。実験環境の背景照度はおよそ 1100 [lx] であったので、ここで定めるコントラストがおよそ 3.981×10^2 以上のとき、注視点において認識可能であることがわかった。

このコントラストの値と、筆者らが過去に行った実験結果 [1] とを比較した。この実験では、4名の被験者に対して、飛翔する球体にスパイク列を投影し、本研究の実験と同様、1本から4本のスパイク本数を回答させるという課題を設けた。この結果、被験者4名の認識結果は 100, 33.3, 35.3, 37.5% となり、完全に認識不可能とまではいかないものの、完全に認識可能であるとは言えないというものであった。なお、この実験の内容と結果の詳細は付録 (A.2) に別途記載した。先程と同様の計算からこの時のコントラスト (C) を計算すると、およそ 5.688×10^2 であり、これは今回の認識可能コントラスト検証実験でのレーザーパワーが 2 [mW] 時と 4 [mW] 時の中間に当たるコントラストである。コントラストが 5.688×10^2 付近になるときの認識結果を、認識可能コントラスト検証実験でのデータから推測すると、被験者 9 名のうち正答率 90% 以上になる者が 4 名である一方、残りの 5 名は正答率が低下し始めているか、あるいは正答率 40% 以下であると考えられることから、認識可能な者と認識が困難である者の 2 つのグループに二極化する刺激強度であることがわかる。このように、あるコントラストのもと行われた過去の実験での結果と、本論文で示された認識可能となるコントラストの値とが矛盾しないことがわかった。おそらく、このようにコントラストが完全に十分でないという要因と、飛翔物体の発射装置に起因する動体軌跡の安定性と再現性の低さという要因の 2 点が、このような結果の主因であったと考えることが

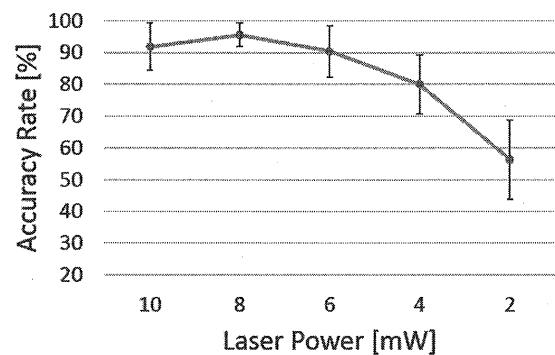


図 14 認識可能コントラスト検証実験結果
Fig. 14 Relation of accuracy rate to laser power.

できる。

4 考察

本研究の中で行われた 2 つの実験における認識結果についてより詳細に考察する。認識可能視野角範囲検証実験では、注視点付近ではほぼ完璧に認識できても、提示位置が注視点から離れるにしたがってその認識率が低下していくという特徴を 9 名の被験者が示したが、被験者 003 だけは注視点付近でも認識率が 25% 付近となっており、例外的なデータとなった。認識可能コントラスト検証実験では、認識結果から被験者を大きく 3 つのグループに分けることができる。レーザーパワーを落とし、コントラストが小さくなつても完璧に認識できている 4 名のグループ、レーザーパワーが 6 [mW] や 4 [mW] を下回るところから認識率が低下し始める 4 名のグループ、そしてレーザーパワーによらず低い認識率となった被験者 003 によるグループである。認識可能コントラスト検証実験におい

て見られた、低コントラストでも認識できた被験者のグループについても、必ず認識できなくなるコントラスト値が存在するはずであるので、各々の閾値となるコントラストを計測することで、今後はより厳密にその閾値の分布を検証する必要があることが示された。被験者 003 は両方の実験で例外的なデータとなったが、実験前の描画像の確認として行った約 15 秒間の連続提示ではスパイク列を正しく認識できており、本手法のような瞬間提示によるものではなく、通常の提示手法においては、視力や色認識能力が不十分であるというわけではない。更に実験後のアンケートでも日常生活やレクリエーションレベルでのバスケットボールなどのスポーツも問題なくできていることから、通常の視覚に関する問題が有るとは考えにくい。被験者 003 の感想の中に、瞬間的な提示ゆえに認識が追いつかなかったという内容があり、この被験者にとって提示時間が短いことが認識に大きな影響をもたらしたと考えられる。色の認識にその提示時間が影響することを示唆する研究 [17] も存在し、今回の被験者 003 の例によって、通常の提示手法においては問題無く色認識できているにも関わらず、瞬間提示において顕在化する色弱に似た存在の可能性が新たに示された。これを受けて、今後はレーザーとその背景の色の組み合わせがどのように認識結果に影響をおよぼすかを明らかにしていきたい。

今回の実験では視力 0.1 を基準とした像の描画を行い、その認識可能範囲が明らかになった。人間の視野はその中心ほど分解能が高いことは先に述べたとおりで、より高い解像度の認識にはより注視点に近い範囲に描画することが必要であり、おおまかな形状認識程度の課題であればより広い範囲への描画でも認識できるということである。このことから、スポーツ観戦への応用においては動体軌跡に文字や記号情報を提示するような、分解能の高い認識が必要な場合には、観測者はある程度距離をとった客席から、注視点付近にその動体軌跡を収めた状態で観測することが想定されるので、視力 0.1 を基準とした像よりも高い解像度の情報でも認識可能であることが考えられ、観客から見た動体軌跡の視野角の大きさを考慮すれば、バレーボールやバスケットボールなどの球技におけるボールへの投影、F1 レースでの車体への投影、野球でのバットスイングへの投影などへの展開が考えられる。大まかな像の形状認識のような簡単な課題で十分である広告サイネージなどの応用には、視野の広範囲に展開可能であるため、通過電車の車体への投影や、電車や車の乗客に対してその風景への投影など、十分な実用可能性が存在すると考えられる。

今後の展望として、より多くの情報を伝達可能とす

るために、より解像度の高い描画を行う方向性と、より広い範囲に描画を行う方向性の 2 つがある。一方はレーザー走査の高速化によって、高解像度の描画を実現することである。本研究で使用したレーザー、ガルバノミラーはともに 100 [us] 周期で駆動させているが、特に動体の運動方向と垂直方向の走査速度がこれでは不十分であり、線描としての描画が限界となっている。そこで垂直方向の走査に共振型の MEMS ミラーなどを用いることで高速化し、より解像度の高い像を描画できるようにするというものである。もう一方は、認識の重要な要素であるコントラストを上げること、更には低照度環境での描画を実現することである。高いコントラストのため、レーザーパワーを過度に上げることは、将来的に公共の場での使用を想定した際には現実的ではない。そこで低照度環境での実現を想定する。現状では、トラッキング用高速ビジョンに十分な光量が得られるよう、強力な可視光照明を用いているが、これを赤外照明などに代替することで、低照度環境でも提案手法における描画と認識が実現できると考えられる。人間の網膜は明暗を司る桿体細胞、色彩を司る錐体細胞の二種類の視細胞により構成されている。錐体細胞は中心視の部分に高密度に存在するため、視野中心の高い分解能が達成されているが、周辺視の部分ほどその密度は急激に低下するため、周辺部ほどその分解能は低下する [10]。桿体細胞は中心視にはほとんど存在しないが、周辺視の部分まで一定以上の密度で分布している。照度 $10^0 \sim 10^1$ [lx] 以上の明所視環境では、錐体細胞のみが機能しており、この時桿体細胞は順応によってほとんど機能できていない [11]。低照度環境での描画では、本実験の中での残像認識おそらく寄与していなかったであろう桿体細胞由来の残像形成を実現することができ、視野のより周辺部まで情報を提示可能になり得ると考えられる。このように、低照度環境での描画では、コントラストを大きく取ることで認識率を高めることができると期待できる他、認識可能範囲を拡大することも期待できる。

本提案手法では任意の動的物体の軌跡上へ自由に情報を提示するものである。しかし、本論文における実験では、描画する像の大きさの固定、視野角範囲の制限、動体軌跡の水平運動レール上への固定、というようにいくつかの条件に制限を設けて行った。これは認識に必要な基礎的な知覚特性の検証のためであった。今後は、様々な解像度における認識可能範囲や必要となるコントラストの検証、等速直線運動以外の軌跡をとる物体への適応的な描画手法の検討などを行うことで、これら各条件についても明らかにしていきたい。

安井・カシネリ・奥村・奥・石川：残像による動体軌跡上情報投影手法の提案とその実現にむけた残像特性の基礎的研究

5まとめ

本論文では高速で運動する動体に対してレーザーにより輝点を表示し、残像を通して対象より大きなパターンを提示する新たなディスプレイ手法を提案した。次に描画安定性確認実験から提案する手法での正確な残像描画が可能であることを示した上で、提案手法での残像認識に必要な提示可能範囲、背景と描画像のコントラストに関する視覚特性を明らかにし、将来の実現に向けての有用性を持った基礎的知見を得た。

本論文中において行われた人を対象とする実験は、東京大学情報理工学系研究科における倫理審査において、審査番号：UT-IST-RE-140408-1として承認された計画に基いて実施された。

参考文献

- [1] 安井雅彦, カシネリ アルバロ, 奥村光平, 奥寛雅, 石川正俊: 追跡の光線投影による残像を用いた大空間情報提示手法の提案と基礎検討; 日本バーチャルリアリティ学会第18回大会, pp.499-502 (2013)
- [2] 渡邊淳司, 前田太郎, 館 瞳: サッカードを利用した新しい情報提示手法の提案; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.6, No.2, pp.79-87 (2001)
- [3] Sand, Antti, Ismo Rakkolainen: A hand-held immaterial volumetric display; IS&T/SPIE Electronic Imaging. International Society for Optics and Photonics, pp.90110Q-90110Q (2014)
- [4] 永徳真一郎, 谷川智洋, 鈴木康広, 広田光一, 岩井俊雄, 廣瀬通孝: 水滴を利用したVRオブジェクトを表示するディスプレイに関する研究; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.12, No.3, pp.425-435 (2007)
- [5] Yamamoto, Hirotugu, Shiro Suyama: Aerial 3D LED display by use of retroreflective sheeting; IS&T/SPIE Electronic Imaging. International Society for Optics and Photonics, pp.86480Q-86480Q (2013)
- [6] Kimura, Hidei, Taro Uchiyama, and Hiroyuki Yoshikawa: Laser produced 3D display in the air; ACM SIGGRAPH 2006 Emerging technologies. ACM, pp.20 (2006)
- [7] 佐伯祐哉, 広田光一: 手動スクリーンを用いた断面投影ディスプレイ; 日本バーチャルリアリティ学会第11回大会, pp.239-242 (2006)
- [8] 大山正, 今井省吾, 和氣典二: 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック; 誠信書房, (1994)
- [9] 池田光男: 眼はなにを見ているか; 平凡社, (1988)
- [10] 平井有三: 視覚と記憶の情報処理; 培風館, (1995)
- [11] 篠森敬三: 視覚I 視覚系の構造と初期機能; 朝倉書店, (2007)
- [12] Kohei Okumura, Hiromasa Oku, Masatoshi Ishikawa: High-speed Gaze Controller for Millisecond-order Pan/tilt Camera; IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 6186-6191 (2011)
- [13] J. Mandelbaum, L.L. Sloan: Peripheral visual acuity with special reference to scotopic illumination; American Journal of Ophthalmology, Vol.30(5), pp.581-588 (1947)
- [14] Ludvigh, Elek, James W. Miller: Study of visual acuity during the ocular pursuit of moving test

- objects; Journal of the Optical Society of America, Vol.48, Issue11, pp.799-802 (1958)
- [15] テレビジョン学会: 画像情報圧縮; オーム社, (1991)
- [16] 渡部叡, 横渡清二, 畠中伸典, 田中聰行: 画像と注視点の分布; NHK技術研究, Vol.17, No.86, pp.4-20 (1965)
- [17] 斎藤晴美, 岡嶋克典: 2型二色覚者の色名応答における刺激呈示時間の影響; 電子情報通信学会論文誌, Vol.J97-D, No.1, pp.85-94 (2014)

A付録

A.1飛翔物体への投影 形状判別課題

飛翔する物体の動体軌跡上に図15に示す「破線」「矩形波」「三角波」の三種の像を描画し、その三種を判別させる実験を、20代～30代の被験者（男性3名）に対して行った。

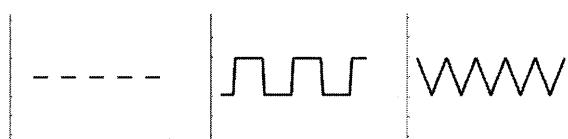


図15 描画するパターン（全3種）

Fig. 15 Lines.

ピッキングマシンによって発射された直径約72 [mm] の黄色のボールを投影対象とし、提示位置は0 [deg] 位置、描画する像の大きさは水平方向に2 [deg]、垂直方向に0.5 [deg] で、投影システムは本研究で用いたものと同じサッカードミラーとレーザーモジュールを使用しており、レーザーパワーは10 [mW] であった。ボールは被験者正面4 [m] の位置を通り、被験者から見て左から右へ進む方向に、およそ30～35 [km/h] の速度で飛翔し、描画時間は概ね15 [ms] であった。実験環境の背景照度はおよそ1400 [lx] に保たれており、動体軌跡の背景は、ボールの軌跡の後方1.5 [m] に位置する白色の壁であり、被験者視点位置から迎角+4.2 [deg] の位置に注視点用の目印として直径25 [mm] の円形シールを貼付し、被験者には実験中この目印を固視しておくよう指示した。ピッキングマシンは、発射するボールが被験者の固視視線上を通過するように調整された。描画方法は、像の垂直方向走査については本研究のものと同様であるが、水平方向走査においては、サッカードミラーの視線制御によって行った。3種のうちどの像が描画されるかは、コンピュータによってそれぞれ当確率かつランダムに決定された。被験者の課題は、知覚した像が「破線」「矩形波」「三角波」のどれであるかを回答させるもので、回答方式は口頭とした。試行回数は20回とし、描画方法の安定性の問題から、描画時に録画を行い、ボールの枠内に描画

できていないものは除外された。

この結果、3名の被験者全員が100%の正答率を示した。

A.2 飛翔物体への投影 形状認識及び計数課題

飛翔する物体の動体軌跡上にスパイク列の描画を行い、スパイク本数を回答させる実験を、20代の被験者4名（男性3名、女性1名）に対して行った。描画するスパイク列の大きさは水平方向に2[deg]、垂直方向に0.5[deg]で、スパイクの幅が0.267[deg]、提示位置は0[deg]位置であった。実験に用いた装置やその配置、描画方式などは(A.1)で示したものと同一であり、レーザーパワーは10[mW]、投影対象のボールの速度は30~35[km/h]、描画時間は概ね15[ms]であった。スパイク列には最少1本、最多4本のスパイクが含まれ、この情報は被験者に事前に伝えた。スパイク列に何本のスパイクが含まれるかは、コンピュータによってそれぞれ当確率かつランダムに決定された。被験者への課題は、本研究と同様、知覚したスパイク列の中のスパイク本数を回答させるもので、回答方式は口頭とした。試行回数は20回とし、描画方法の安定性の問題から、描画時に録画を行い、ボールの枠内に描画できていないものは除外された。この結果を表1に示す。

表1 飛翔体軌跡上での残像認識実験結果
Table 1 Result of experiment; the recognition of afterimage on a flying object.

被験者	有効試行回数	正答数	正答率[%]
A	18	18	100.0
B	15	5	33.3
C	17	6	35.3
D	16	6	37.5

(2014年9月17日受付)

[著者紹介]

安井 雅彦



2013年東京大学工学部計数工学科卒業。現在、東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程在学中。駆動鏡面を用いた高速視線制御システムとその応用に関する研究に従事。

アルバロ カシネリ（正会員）



2000年パリ第11大学博士課程修了。2001年東京大学リサーチアソシエイト。2002年科学技術振興機構研究員。2005年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻助手。2007年同助教、現在に至る。人間のコミュニケーションや表現を向上させるヒューマンコンピュータインターフェースの分野に関する研究に従事。PhD。

奥村 光平



2008年早稲田大学理工学部応用物理学科卒業。2010年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程修了。2013年同専攻博士課程修了。2012~2013年日本学術振興会特別研究員(DC2)。2013~2014年同研究員(PD)。大学院生・研究員時代は、駆動鏡面を用いた高速視線制御システムとその応用に関する研究に従事し、映像情報メディア学会鈴木記念奨励賞、日本ロボット学会学会誌論文賞、計測自動制御学会論文賞(蓮沼賞)等を受賞。現在、鈴榮特許総合事務所勤務。博士(情報理工学)。

奥 寛雅（正会員）



1998年東京大学理学部物理学科卒業。2000年東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了。2003年同専攻博士課程修了。2003~2005年科学技術振興機構研究員。2005年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻助手。2007年同助教。2011年同講師を経て、2014年群馬大学学術研究院電子情報部門准教授、現在に至る。ダイナミックイメージコントロール、ダイナモルフレンズなどの研究に従事。博士(工学)。

石川 正俊（正会員）



1977年東京大学工学部計数工学科卒業。1979年東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了。同年通産省工業技術院製品科学研究所研究員。1989年東京大学工学部計数工学科助教授。現在、東京大学大学院情報理工学系研究科創造情報学専攻教授。2002, 2003年度東京大学総長特任補佐。2004年度東京大学副学長。2005年度理事・副学長。2011年紫綬褒章受章。超並列・超高速ビジョン、センサフュージョン、メタ・パーセプションなどの研究に従事。工学博士。