

変形するタンジブルスクリーンへの適応的映像投影を行う インタラクティブディスプレイシステム

渡辺 義浩

アルバロ カシネリ

小室 孝

石川 正俊^{*1}

Interactive Display System based on Adaptive Image Projection
to a Deformable Tangible Screen

Yoshihiro Watanabe, Alvaro Cassinelli, Takashi Komuro and Masatoshi Ishikawa^{*1}

Abstract – We propose a variant of the multi-touch display technology that introduces an original way of manipulating three-dimensional data. The underlying metaphor is that of a deformable screen that acts as a boundary surface between the real and the virtual worlds. By doing so, the interface can create the illusion of continuity between the user's real space and the virtual three-dimensional space. The developed system presented here enables this by employing three key technologies: a tangible and deformable projection screen, a real-time three-dimensional sensing mechanism, and an algorithm for dynamic compensation for anamorphic projection. This paper introduces the concept of the deformable tangible workspace, and describes the required technologies for implementing it. Also, several applications developed on a prototype system are detailed and demonstrated.

Keywords : tangible screen, projection display, three-dimensional sensing, manipulation of virtual data, visualization

1 はじめに

我々は、自身の手で、現実の3次元物体を容易に動かし、操ることができる。一方で、対象物体がモニタ上の仮想空間内のものである場合、同タスクは途端に困難なものとなる。このように、実空間のユーザが仮想物体を操作するタスクは多くの課題を抱えている。しかし、複雑なシーンをリアルタイムに描画可能なモジュールの進歩とともに、その重要性が増している。本論文では、同タスクのための作業環境の開発において直面する問題の解決にあたる。

典型的な作業環境では、CADシステムを始めとして、固定のモニタと、マウス、ペン、及びキーボードのような1つ以上の入力デバイスの構成が採用されている[1]。このタイプの構成では、仮想物体を「触る」行為は、上述の入力デバイスを介して行われる。システム構成の影響により、仮想物体はユーザの手先とは離れたところに現れ、さらにその姿勢は手指の座標系に回転とスケールの変換が施されたものとなっている。そのため、ユーザは特殊な操作方法を学習する必要がある。その操作方は、実世界で採用される方策とは大きく異なっており、直感とは反したものとなっている。

このように、同システムでは、実空間と仮想空間の隔たりによって、知覚の不一致が生じている。このた

め、ユーザは座標空間の変形を補償しながら、タスクを遂行する必要がある。この点は、仮想物体の操作における効率性を大幅に低下させていると考えられる。

同問題の一部は、仮想物体の操作に最適化されていない入力デバイスに起因している。通常、実空間では、直感的な操作は身体動作の自然な挙動から生まれることから、適切な操作方はこの事実を十分に利用したものが望ましいと考えられる[2, 3]。このような操作方の設計に関する考えは明快であるが、仮想空間と仮想物体をどこにどうやって描画すればよいのか、という提示技術の問題が残されている。例えば、固定されたモニタを作業環境において利用すると、知覚される操作物体の位置、同物体に触れているはずの自己受容に基づいて捉えられるユーザの身体の位置、及び触覚の3者のずれは解消されない。

このような提示に関する問題は、頭部に搭載するヘッドマウントディスプレイまたは3次元ディスプレイによって部分的に解消される[4, 5, 6]。これらの利用によって、実空間と仮想空間の位置に関する知覚の不一致を低減することができる。しかし、この構成は、視覚や身体の運動感覚に関するモダリティの問題を解決しただけで、触覚に関して課題を残している。

そこで、本論文では、タンジブルインターフェースに着目し、このような問題を同時に解決、または低減し得る潜在力を備えた、入力・提示技術の新たなアプローチを提案する。提案システムは、Khronos Projector[7]

^{*1}東京大学情報理工学系研究科

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

と呼ばれるインスタレーションが着想の起点となっている。このインスタレーションは、ユーザが、スパンデックス素材の変形可能な投影スクリーンに触れることで、触れた部分に応じて、投影画像の時間を前後に変化させるものである。この他にも、タンジブルインターフェースの関連成果として、Tangible bits が挙げられる [8]。同成果では、投影のための媒体物として、粘土や砂を用いたものが開発された。このような媒体物は自由な変形が可能であるが、映像を背面から投影することができない欠点がある。これにより、媒体物へユーザの視点と同じ側から映像を投影する必要がある。インタラクティブなディスプレイ環境の場合、投影面の近くにユーザが位置することが考えられるため、同制限により、投影像がユーザによって遮られる問題が回避できない。

この他、テーブルトップの分野でも、仮想物体の3次元操作のニーズが高まっている。しかし、水平、または垂直に固定された作業面において、このようなタスクを達成することは困難であると考えられる。例えば、同問題を克服する有効な例に、タッチパネル上の2次元的な作業を、直感的に対応する3次元操作へマッピングする試みが報告されている [9]。既存のシステムに実装できる利点があるが、同機能が有効に働く場合が特定の作業に限られる問題があると考えられる。これに対して、作業面を水平の固定されたパネルから拡張する試みもある。例えば、ユーザが触れる表面と背面の間に、インクを封入し、変形を捉えるシステムが報告されている [10]。しかし、同構成では、変形のスケールや、捉えられるダイナミクスが小さいと考えられる。また、映像投影を背面ではなく、ユーザによるオクルージョンが生じる前面から行う問題がある。また、磁性体とその変形に伴う磁場変化を利用した3次元入力インターフェースが報告されているが [11]、鉄球が積層されたものを媒体として用いているため、変形の自由度が低い。さらに、ディスプレイとの融合による視覚等の感覚モダリティの融合を図っていない問題がある。

我々が新たに導入するメタファは、ユーザが操作のために触れる面を、仮想空間と実空間を隔てるタンジブルな境界として機能する物理的な膜とみなす考え方である。ユーザは、この境界越しに、膜面を変形させることで、仮想空間の物体を実空間から操作するタスクを行う。このようなシステムを“Deformable workspace”と呼ぶ [12]。本システムを支える重要な基盤技術は、タンジブルなスクリーンと、リアルタイム3次元センシング、及び適応的映像投影の3つである。提案システムは、提示面と操作面が共有化されたマルチタッチインターフェースであり、テーブルトッ

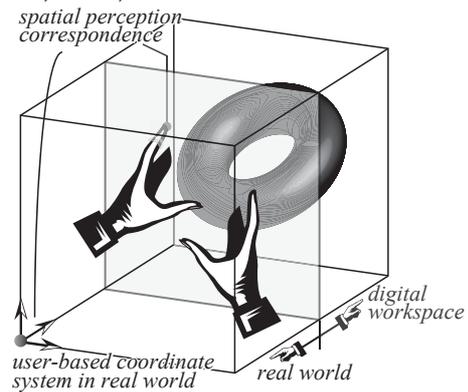


図1 Deformable Workspace の概念図
Fig.1 Metaphor diagram of the Deformable Workspace

プの一種であると考えられる。

本論文では、次の構成で議論を進める。まず、第2節では、提案するメタファの詳細と、本メタファを具体的に実証するための技術要件を述べる。第3節では、開発システムの構成と動作内容について述べる。第4節では、提案システムの下で有効に働くタスクの例を実証し、考察する。第5節では、本論文のまとめを述べる。

2 The Deformable Workspace

本節では、システム設計の基盤となるメタファの詳細と、実現するために要求される技術を述べる。

図1は、提案する Deformable Workspace の基本構想を示したものである。本構想では、仮想物体は仮想空間に存在するものとして描画されるものとし、ユーザは現実の空間に存在するが、仮想空間に描画されないものとする。また、両空間で唯一の座標系を共有し、両者の位置関係を維持する。このような目的のために、Deformable Workspace では、両空間の間に、透明でタンジブルな膜が境界面として物理的に存在する概念を導入する。同概念の下、ユーザはこの面を変形し、仮想空間内の仮想物体の効果を観測しながら、操作を行う。なお、境界面は変形の自由度が高いことを仮定している。例えば、外科手術において利用する半透明の手袋とその着用下での作業は、本境界面の変形とその作業形態のイメージに近い。

次に、このような構想をシステム開発する上での要求技術について述べる。本システムでは、ユーザがスクリーンの表面を押すことで、あたかも仮想空間へ入り込み、実空間と近い感覚で物体を操作する環境を実現する必要がある。このような機能の実現に向けて、システム設計では、ディスプレイ技術、センシング技術、及び処理技術の3者の最適な組み合わせが重要な課題となる。まず、ディスプレイ技術として、半透明の変形可能な投影スクリーンが必要となる。本スクリーンは、映像を提示する機能、ユーザの入力を捉え

る機能、及びユーザへの受動的な触覚フィードバック 3 つを担う。また、センシング技術として、システムへの入力指令を遅れなく捉えるとともに、適応的映像補正のために、スクリーンの 3 次元変形をリアルタイムに取得する技術が必要である。さらに、スクリーン曲面の変形による投影像の歪みを解消するために、投影される映像はスクリーン変形に応じて適応的に補正される必要がある。このように、これらの 3 技術に関してレベルの高い技術が必要となるが、開発システムはこのような課題を全て解決している。

一方で、触覚提示に関して、様々なテクスチャの感覚や、仮想物体の動きに関連した動的な圧力パターンを生成する機能を、境界面を担うスクリーンに搭載するためには新たなアプローチが必要とされる。例えば、このような問題に対する解決策として、形状記憶繊維が織り込まれたデバイスなどのようなアクチュエータをスクリーンに埋め込むことが将来技術として想定される。しかし、仮想物体の操作において、そのような複雑な触覚フィードバックの有無が致命的な問題とはならないケースも多いことが予想される。そこで、本論文では、より根本的な問題として、手の位置と描画された操作対象の位置に関して、視覚と運動感覚の間に生じる不一致を解消するシステムのデザインに重点を置く。

Deformable Workspace は、ヘッドマウントディスプレイに代表されるウェアラブルデバイスを必要とせずに、同問題を解決する見込みが高い。また、変形可能なスクリーンを用いることで生じる受動的な触覚フィードバックは、上述のテクスチャ感覚などを提供する段階になかったとしても、仮想物体とのインタラクションを円滑にする可能性が高いと考えられる。

3 システムの構成と動作原理

3.1 システムの全体構成

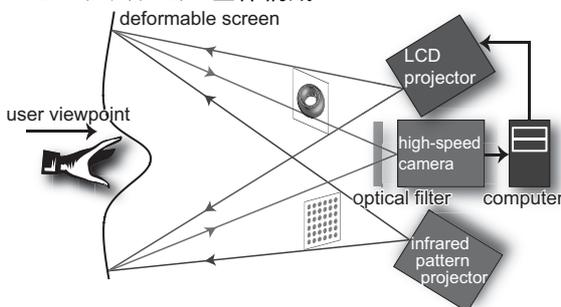


図 2 システムの構成
Fig. 2 System configuration

本節では、開発した Deformable Workspace の全体構成を述べる。本システムで中心的な役割を担う要素技術は、タンジブルかつ変形可能な投影スクリーン、リアルタイム 3 次元センシング、及び適応的な投影歪み補正の 3 つである。

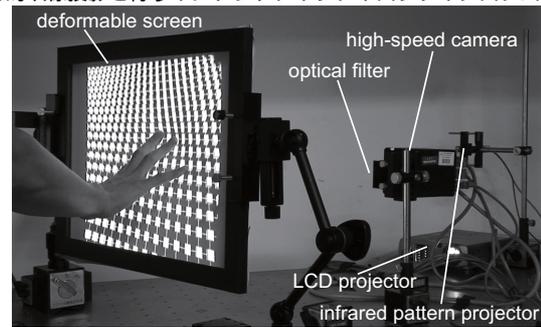


図 3 開発したシステムの写真
Fig. 3 Picture of prototype

システムの構成を図 2 に示す。また、開発システムの写真を図 3 に示す。本システムは、スクリーン、カメラ、及び 2 種のプロジェクタからなる。各プロジェクタは、ユーザに向けて画像を提示する機能と、スクリーンの変形をアクティブステレオによって捉えるために参照パターンを投影する機能を有する。プロジェクタとカメラは、スクリーンの背面側に設置され、ユーザは透過した映像を観測する。本システムでは、映像投影のためのプロジェクタとして、三菱電機製 LVP-XD50 を利用した。変形スクリーンとセンシング機構は次節以降で詳述する。

3.2 変形するプロジェクションスクリーン

本システムでは、離れた複数の点を押し込んだ場合、その入力形状に沿うような複数の山を生じる変形が現れるような素材であることがスクリーンの重要な要件となる。まず、この伸縮性を軸にスクリーンを選定した結果を述べる。

スクリーンを透過する光によって映像をユーザに提示する方法は、リアプロジェクションと呼ばれており、そのためのスクリーンも市販化されている。しかし、いずれも変形を許容するものではなく、伸縮性が十分ではなかった。

関連成果の Khronos Projector では、伸縮性の高いスパンデックス素材の生地を用いている [7]。これは、映像投影のために開発されたものではないが、同応用のための伸縮性、センシングのための反射特性、映像投影の品質の 3 点に関して、定性的に十分な性能を備えていることが確認されたため、採用されている。しかし、検証の結果、Deformable Workspace のためには、伸縮性が十分でないことが明らかになった。

ラテックス素材の生地を検証した結果、伸縮性の点で上述の要件を満たすものであることが分かった。しかし、同素材も、前述のラテックス素材と同様に、映像を精細に表示するためのコーティングが行われていない。そこで、映像投影の特性を検証した。

実験ではスクリーンゲインを測定した。スクリーンゲインは、標準白板での反射輝度を 1.0 とした場合の比率で表される特性であり、スクリーン特性の指標と

して広く用いられている．測定には，Edmund 製標準白板（反射率 99%@250-2500nm）とコニカミノルタ製輝度計 LS-100 を用いた．測定の結果，スクリーンゲインのピーク値が 0.4 程度であることが分かった．これは，市販のリアプロジェクション用のスクリーンで，スクリーンと視線の角度が 40 度程度となる場合の特性に相当する．投影光以外の周辺環境光がなければ，十分に視認できる映像が提示可能であると考えられる．その他，ホットスポット，光透過による映像のボケ，パターン光投影による 3 次元センシングのための反射特性などに関しては，許容可能な特性を備えていることを定性的に確認した．以上の判断結果から，選定したラテックス素材を本システムに用いることができると判断した．

3.3 スクリーン変形の 3 次元センシング

3 次元センシングは，ユーザの入力を捉えるとともに，投影像の適応的な補正を行うために用いられる．Deformable Workspace では，スクリーンは平面で常に静止した状態ではなく，継続的に形状の変形を起こしている前提がある．このため，3 次元センシングの代表的な手法である光切断法 [13] のように，パターンを走査して複数回の撮像から形状を取得するタイプのものは望ましくない．このような前提下では，1 回の撮像で，スクリーンの曲面の完全な変形を取り込むことが必要となる．

そこで，本システムでは，構造化光を用いたアクティブステレオに基づくものを用いた．これは，図 2 に示されるようなアレイ状のスポットパターンを投影することで，高速カメラによる 1 回の撮像毎に 3 次元形状を演算する独自のセンシングシステムである [14]．本システムは，画像処理専用超並列コプロセッサを用いることで，スクリーンの動的な変形を，スループット 955fps，レイテンシ 4.5ms でリアルタイムに計測することができる．

本センシングでは，各スポットの 3 次元位置が，三角測量の原理に基づいて，次の 2 直線の交点から決定される．まず，各スポットは，既知の直線上を通過する光線となる．また，カメラの観測画像から，該当するスポットが光軸中心とカメラの画像平面上の観測点を結ぶ直線上に存在することがわかる．これらの拘束条件に基づいた 3 次元点の算出を，各スポットに対して適用する．

開発した 3 次元センシングでは，Dalsa 製 CA-D6（解像度 256×256，最大フレームレート 955fps）の高速カメラを採用した．また，StockYale 製 SNF-533（33×33 dots，line pitch 0.59deg）のプロジェクタを採用した．スポットパターンの縦横は，スクリーンの水平垂直方向にほぼ平行に配置されるように投影した．また，ユー

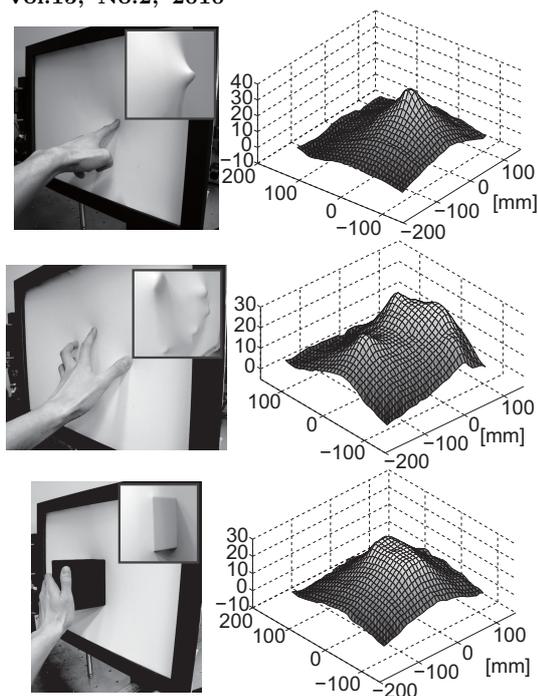


図 4 計測されたスクリーンの 3 次元変形の様子

Fig. 4 Examples of 3D sensing

ザに提示されたスクリーン上の映像を妨げないために，プロジェクタの照明は赤外光とした．高速カメラの正面には Edmund 製可視光ブロックフィルタを設置し，赤外光のみを検出するようにした．このような構成により，撮像画像からのスポットパターンの抽出を簡便な画像処理でロバストに実行することができた．

次に，センシング精度について述べる．今回は，スクリーンが平面である場合に，1cm 程度の空間解像度を達成することを目標とした．これは，スクリーンの最小変形が径 3cm 程度の滑らかな凹みであることを前提とし，復元するために十分な解像度として仮定されている．また，SVGA の映像を提示した際に，映像歪みが 10 画素以下の誤差になることを目標とした．

これを満たすために，スクリーンとプロジェクタを 90cm 程度離れた位置に設置し，スクリーン上の 30cm×30cm の範囲にスポットパターンが収まるようにした．30cm 四方のサイズは，スクリーン上の作業領域として許容可能であると考えられる．また，各スポットにおける計測誤差は 5mm 以下である．今回は，変形の自由度に対して，十分な解像度でサンプルが行われているため，この程度の精度でスクリーン全体の変形は捉えることが可能であると考えられる．なお，4 節で述べるタスク遂行時の手先の位置精度は，スクリーン変形の計測精度と同等であり，十分な性能であると考えられる．

図 4 に，計測されたスクリーンの変形例を示す．本システムでは，映像提示用のプロジェクタのフレームレートを超える速度で，図に示されるようなスクリーンの 3 次元変形が取得される．このため，高速なセン

シングは、スクリーンの3次元変形をシームレスなシステム入力として用いるだけでなく、インタラクションの遅延を抑えることができる。さらに、複数回のセンシングデータを平均化することで、各データの白色雑音成分を低減できるため、高速な現象を捉えつつ、高S/N化を達成することができる。

3.4 スクリーンの変形解析

本節では、スクリーン変形からユーザの入力を認識する方法を述べる。本手法で利用する時刻 t のセンサデータを式 (1) に示す。

$$X(t) = \{X_i(t) | i = 1, \dots, N\} \quad (1)$$

同集合の要素は、3次元の点 $X_i(t) = [x, y, z]^t$ である。これは、カメラを基準としたセンサ座標系に基づいて記述された空間点である。そこで、式 (2) に基づき、センサ座標系のデータ $X(t)$ をスクリーン座標系のデータ $\tilde{X}(t)$ へ変換する。ここで、スクリーン座標系は、平坦時のスクリーンを xy 平面とし、同平面に直交する方向を z 軸とするものである。

$$\tilde{X}_i(t) = RX_i(t) + T \quad (2)$$

2つの座標系の間の変換 (R, T) は、キャリブレーションの際に予め取得されているものとする。

次に、 $\tilde{X}(t)$ をメッシュデータ $\tilde{X}'(t)$ に変換する。メッシュデータは、式 (3) で表わされる頂点の集合である。

$$\tilde{X}'(t) = \{\tilde{X}'_{ij}(t) | i = 1, \dots, N_x, j = 1, \dots, N_y\} \quad (3)$$

ここで、 $\tilde{X}'_{ij}(t) = [x_i, y_j, z_{ij}]^t$ であり、 xy 座標は同平面で等間隔の格子点となることを条件とする。各頂点の奥行 z の値は、ガウシアンフィルタによって、近傍点から算出する。本論文では、スクリーンの変形をこのようなメッシュモデルで記述し、スクリーン変形による歪み補正演算において利用した。また、自由曲面を生成する応用や、仮想物体の切断面を提示する応用では、変形によって生じた曲面を、ユーザ入力として直接用いることができる。これらの応用例の詳細は次節で述べる。

一方、応用では、接触点を利用する場合も考えられる。そこで、本論文では、画像処理の適応的2値化を利用した方法によって、スクリーン変形から接触点を検出するアルゴリズムを提案する。アルゴリズムでは、スクリーンが急峻に変形した凹みの頂点を入力点としてみなす。凹みは、スクリーン座標系の xy 平面とほぼ直交する方向に、頂点を中心に対称な山を生じる変形となることを仮定する。

まず、曲面の高さ分布 $I(i, j) = z_{ij}$ を閾値 θ_k で2値化する。次に、2値化されたパターン $B(i, j)$ から接続領域を検出する。これは、上下左右の近傍で接続している要素を1つの領域とみなす処理を指す。検出

された各領域に対して、重心とサイズを領域の情報として保持する。これを複数の閾値に対して繰り返し行う。異なる閾値 θ_k における各領域情報を解析し、主要な入力点 $c_i(t)$ をサイズと位置をもとに決定する。なお、マルチタッチの際には、時系列に連続する2回のサンプルにおける入力点 ($c_i(t-1), c_i(t)$) は、ほぼ近傍に位置することを拘束条件として、入力点の割り当てを行う。複数の閾値を用いることで、高さの異なる複数の接触点を適応的に検出できると考えられる。

3.5 映像歪みの適応的補正

スクリーンが変形するため、画像を補正せずに投影すると、観測される画像に歪みが生じる。このような歪みを解消するためには、スクリーンの変形を捉えるとともに、プロジェクタの投影特性を予め取得し、同特性に応じた画像補正を適用する必要がある。プロジェクタの特性を取得するキャリブレーションでは、焦点距離などの内部パラメータと、位置と姿勢を含む外部パラメータを取得する。カメラに関しては、様々なキャリブレーション手法が開発されているが [15]、プロジェクタの場合にも同様の手法が利用可能である。但し、パラメータ推定に用いるデータを収集する方法が異なる。

今回は、Zhangの方法 [16] を用いて、カメラのキャリブレーションを行った。プロジェクタのキャリブレーションは次の手順で行った。まず、固定されたボードに、チェッカーパターンを投影したシーンをカメラで撮像した。なお、パターンを投影するボードの姿勢は、カメラキャリブレーションの際に利用したボードの姿勢と同一に保った。この撮像を異なる姿勢のボードに対して、複数回繰り返した。次に、カメラキャリブレーションの結果を用いて、撮像画像から各ボード上に投影されたパターンの空間点を計算した。この空間点と投影パターンの画像点の組から、プロジェクタの特性を求めた。最後に、カメラとプロジェクタのそれぞれのキャリブレーションで得られたデータを初期値として、両者のパラメータの最適化を図った。

一方、変形したスクリーン上の映像を高精度に補正するためには、ユーザの眼の位置とその観測モデルも必要となるが、今回のシステムでは、視点は固定され、観測モデルは透視投影で記述可能であると仮定し、これらのパラメータは手で調整した。

続いて、画像補正の具体的な手法を説明する。図5は、変形スクリーン上でユーザが観測する投影光線の軌跡を示したものである。まず、投影面の位置 p_a からの光線を考える。スクリーンが平面である場合は、同光線は、目の撮像面上の位置 p_d で観測される。一方、スクリーンが図のような変形を起こした場合、同

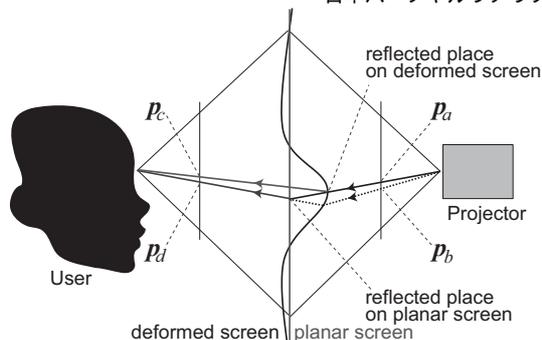


図5 スクリーンの変形によって画像歪みが発生するプロセスとその補正方法
 Fig.5 Compensation of image warp caused by screen deformation

光線は、異なる位置 p_c で観測される。このように、システムが投影画像を変更しなかった場合、観測画像はスクリーンの変形に応じた歪みを生じる。今回の場合、画像点を位置 p_b から投影されるように補正を施せば、スクリーンが平面の際と同じ位置 p_d で観測される。このような配置条件を画像全体に対して満たすことで、ユーザからの視点では、スクリーンの変形に無関係に、常に同じ歪みのない画像を提供することができる。以上の議論は、下記の関係式を満たす空間点 $X = [x, y, z]^t$ を解く問題として記述される。

$$\begin{cases} P_e X = \omega_e u \\ f(X) = 0 \\ P_p X = \omega_p u_p \end{cases} \quad (4)$$

第1式は、ユーザによるスクリーンの観測に関して、透視投影モデルを記述したものである。 u は、2次元平面を仮定した人間の網膜上で観測される位置である。また、 X は観測点が反射するスクリーン上の3次元位置を表している。 P_e は人間の目をモデル化した透視投影行列である。 ω_e はユーザからの距離情報を表わす未知のパラメータである。第2式は、スクリーンの変形を表している。これら2式の条件から、人間が観測する所望の網膜上の位置 u に対応するスクリーン上の位置 X が取得される。さらに、第3式を用いて、スクリーン上の位置 X に光線が到達する投影画像の位置 u_p を取得することができる。同式で、 P_p はプロジェクタの透視投影行列、 ω_p は未知のパラメータである。

歪み補正のための計算と投影画像の描画は、いずれも、投影テクスチャマッピングと呼ばれる機能によって、効率的に記述できるとともに、Graphics Processing Unit(GPU)を用いることで高速に実行可能である。関連研究では、このような手法を、固定の非平面へ投影するために用いられている[17, 18]。一方、本システムでは、高速な3次元センシングでリアルタイムに取得される情報と、投影画像の適応的補正によって、動的に変形する曲面への投影が実現されている。

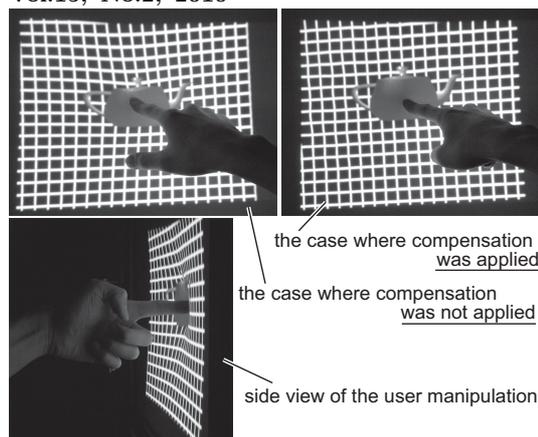


図6 映像歪みの補正

Fig.6 The compensation of image distortion

適応的映像投影の動作を図6に示す。同図は、スクリーンの変形を横から見たもの、映像の補正を適用しなかった場合に観測されるスクリーン上の映像、システムがリアルタイムに変形を補正した場合に観測されるスクリーン上の映像の3つを示したものである。スクリーンに変形が生じているにもかかわらず、歪みのない映像がユーザの目に観測された。これによって、スクリーンが実空間と仮想空間の間の透明な境界面として機能し、両空間が連続的に接続している感覚が強化されると考えられる。

4 Deformable Workspace の応用展開

4.1 応用展開における設計概要

本節では、Deformable Workspace が可能とする具体的な応用機能を述べる。本節で提案する全ての機能は、Deformable Workspace の効果を利用し、仮想物体の操作が有効に作用する設計となっている。

今回開発したシステムの全ての応用では、インタラクションにおけるスループットを30Hzとした。これまでに、仮想現実技術のためのタスクにおける更新レートとして、20fps程度が作業効率に影響を与えない性能であることが示されており[19]、同性能は妥当であると考えられる。計測精度に関しては前節で述べた。なお、次節以降で述べる応用のビデオコンテンツをウェブで公開している[20]。

4.2 物体の3次元平行移動

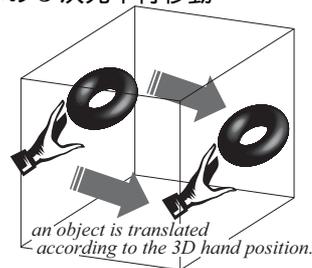


図7 Deformable Workspace による物体の移動
 Fig.7 3D translations on the deformable workspace

本節では、仮想物体を3次元の自由度で平行移動さ

せる操作について述べる．特に，ユーザの視点から奥の方向，本システムの場合は実世界から仮想空間へ向かう方向へ，物体を移動させる操作は，既存のシステムでは簡単には達成できなかったと考えられる．本システムにおける3次元移動操作の概念図を図7に示す．本システムでは，ユーザの手の3次元位置は，スクリーンの変形から推定されるとともに，その手先に物体を投影することが可能である．このため，実世界と同じように，手の位置と動きに従って，移動を制御することができる．

実際の操作の様子を図8に示す．複数の白い線は，仮想空間の水平面を表している．画面内の球形状の物体が操作対象である．分かりやすくするために，座標系の原点と移動物体の中央を直線で結んでいる．2枚の写真から，ユーザの指の移動に沿って，物体が移動している様子が確認できる．

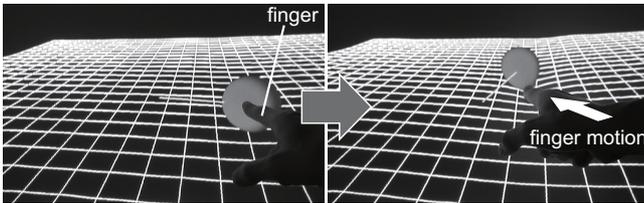


図8 3次元移動操作の様子
Fig. 8 Demonstration of 3D translations

一方，このタイプのタスクを実現するために，タッチパネルに入力される面上の圧力分布を検出し，入力された力に応じて物体を操作する方法なども考えられる．しかし，このような方法の場合，物体の位置と，接触しているはずの手先の位置が一致しない問題が生じる．提案の実装では，対象物体と自身の手が同じ位置で接触していることを視覚と運動感覚で捉えるとともに，指先で対象物体の反力を知覚する一連の知覚が実現されていると考えられる．その他の関連研究として，タンジブルなスクリーンを用いて，仮想物体をスクリーン面と直交する方向へ移動させるタスクを行うシステムがある [21]．魅力的なデモンストレーションが行われているが，同システムではスクリーンが剛体であることを仮定している．このため，ユーザの入力は同平面上の移動とタップに限定されており，奥行きに関する入力は考慮されていない．

4.3 マルチタッチ3次元操作

シングルタッチの操作では，達成できる自由度に限界があると考えられる．例えば，物体の回転と移動を同時に伴う操作が困難である．マルチタッチ型のテーブルトップの中にも，同操作を巧みに実現する構成を備えたものがあるが [9, 22]，例えば，スクリーンの平面に直行しない軸周りでの回転を行うなど，同平面内に限定されない移動を行う場合，ユーザの入力動作が十分に直感的なデザインとはならない可能性が高い．

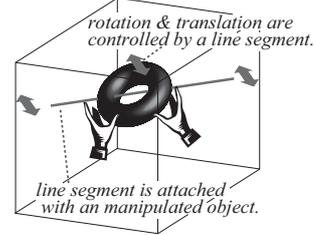


図9 Deformable Workspace によるマルチタッチ3次元操作
Fig. 9 Multi-touch 3D manipulation on the deformable workspace

一方，Deformable Workspace は，奥行き方向の自由度を伴うマルチタッチ型のインタラクションを提供することが可能である．これによって，上述の問題を解決した3次元の回転と移動を実現することが可能である．多くの接触点を利用することも可能であるが，ここでは最も簡単な構成として，2箇所の接触点を利用する構成を採用した．本タスクの概念図を図9に示す．図に示されるように，提案する操作方法では，物体の回転と移動が，2つの入力点を結ぶ線分によって制御される構成となっている．但し，同線分は，操作物体の中心を常に通過するものとする．

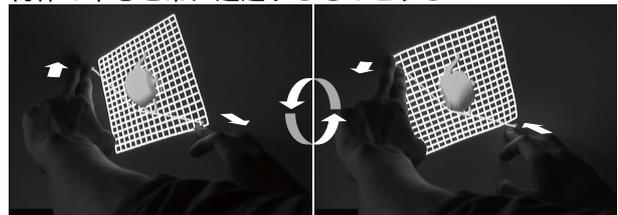


図10 マルチタッチ3次元操作の様子
Fig. 10 Demonstration of multi-touch 3D manipulation

実際のタスクの様子を図10に示す．図に示されるように，両手の動きに応じて，ティーポットの姿勢が変化していることが確認できる．なお，このタスクは片手のみの2本の指でも実施可能であることを確認した．

4.4 3次元ラインの自由描画

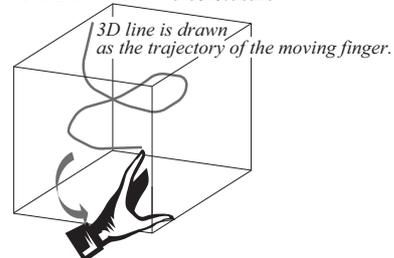


図11 Deformable Workspace による3次元ラインの自由描画
Fig. 11 3D freehand drawing on the deformable workspace

3次元空間への自由な描画作業について述べる．3次元物体のモデリングはニーズが高く，様々なシステムが各応用分野において開発されている．まず，本節では，3次元の自由曲線のシームレスな描画について

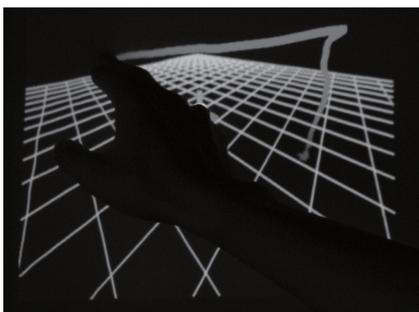


図 12 3次元ラインの自由描画の様子
Fig.12 Demonstration of 3D line drawing

述べる．Deformable Workspace で実現される本タスクの概念図を図 11 に示す．図に示されるように，今回は，ユーザの指先の軌跡を追跡し，3次元の自由曲線として仮想空間に描画する構成とした．

図 12 は，実際のタスクの様子を捉えたものである．本機能は，前節までの機能と異なり，実際の作業ではなく，仮想空間でのみ実施可能な作業を実現したものである．しかし，シンプルな作業方法と，視覚や運動感覚などの統合が有効に機能したため，ユーザは簡単に作業を理解し，遂行することができた．なお，仮想空間の描画は，透視投影に基づいているため，線幅は奥行きに従って変化している．このような側面も，3次元空間での描画作業を強化するための補助的な役割を果たしていると考えられる．

4.5 自由曲面の生成

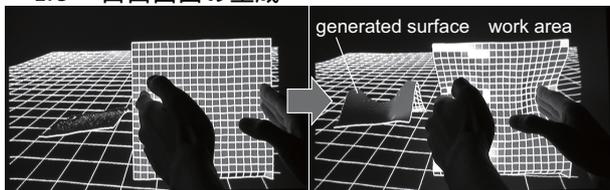


図 13 Deformable Workspace による 3次元曲面の生成
Fig.13 Demonstration of 3D Sculpture

本節では，Deformable Workspace による 3次元モデリングの簡単な例として，スクリーンの実際の変形を利用して，任意の曲面を有する立体を作り出す機能について述べる．Deformable Workspace による自由曲面の生成では，図 13 に示されるように，スクリーンの変形を仮想立体の表面に直接割り当てることで，モデリングを行うことができる．例えば，ろくろを用いた陶芸のように，仮想物体を回転させ，様々な方向から観察し，曲面の変形を施すことで，複雑な形状を生成することができると考えられる．

仮想物体の 3次元モデリングでは，既存の関連システムでも行われているように，知覚の整合性を保って作業を体感できる構成であることが必要である [3, 4, 5, 6]．本システムは，そのような要件を満たすとともに，受動的かつ単純ではあるが，触覚フィードバックを提供

することができる．このため，現実の手で仮想物体をモデリングする上で，有効な機能を提供することができると考えられる．

4.6 仮想物体の断面図のインタラクティブディスプレイ

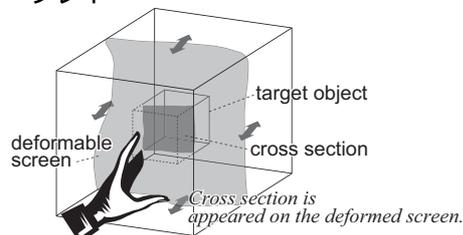


図 14 Deformable Workspace における仮想物体の断面図提示
Fig.14 Display of arbitrary volume slicing

本節では，仮想の 3次元物体の任意の断面図を表示する応用について述べる．本論文では，これを Volume Slicing と呼ぶ．このようなインタラクティブかつ直感的に内部の構造を捉えるための応用は，建築，医学，及び科学データの視覚化において重要性が高い．このようなニーズを受け，同機能に特化したシステムが開発されている [23, 24]．

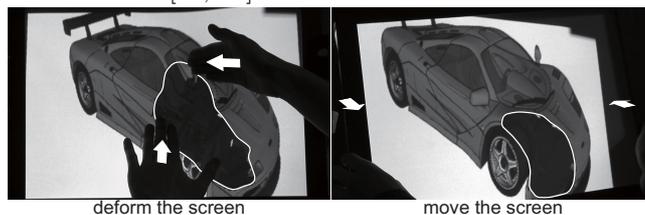


図 15 断面図のインタラクティブ提示の様子．スクリーンを変形させたり，移動させることで内部の構造を捉えることができる．
Fig.15 Demonstration of volume slicing

Deformable Workspace では，図 14 に示す構成で本タスクを実現する．図に示されるように，スクリーンが切断面として機能する．ユーザは，スクリーンを変形させたり，一定の範囲内でスクリーン全体を動かすことで，前面の層を突き抜けて，隠された奥の層の内部構造を確認することができる．スクリーンにラテックス材質を利用しているため，既存のものに比べると，自由度の高い切断面を容易に作り出すことができる．図 15 に開発システムで本タスクを実施した様子を示す．スクリーンの自由な変形によって，車内部のシートやエンジンの構造などを連続的に観察することができた．

4.7 考察

本システムの主要な効果は，視覚と触覚を使って捉えられる，自身の手的位置と接触している仮想物体の位置が一致した状態でタスクを遂行できる点である．この点に関して，全ての応用例で，想定通りの動作が実現出来ていることを確認した．

一方，今後の発展に向けて，各要素技術には改善の

余地があった。まず、曲面の変形から多数の入力点を認識するためには、スクリーン解析のアルゴリズムを発展させる必要があることが分かった。現状のアルゴリズムは、スクリーンと直交する方向に変形の極大値が顕著に生じることを仮定している。このため、斜め方向の押し込みなどが、複数箇所が生じる場合は検出が困難であると考えられる。今後は、手の開き具合や、実世界の道具などを、スクリーンに現れる変形から認識することを目指しており、スクリーン解析のアルゴリズムは高度化が必要になると考えられる。例えば、予め変形形状をモデル化し、該当する部分変形領域をマッチングによって探索するなどの方法への拡張を予定している。

次に、立体知覚について考察する。今回の構成では、ユーザが仮想物体に接触しているとき、同物体は実際の奥行き位置に描画される。これによって、物体の絶対位置に関して奥行きが知覚される。また、このとき、物体に接触する手先の運動感覚も知覚を補助することがわかった。一方、スクリーンが平面に戻った際に、物体位置の奥行きを知覚することができない。このため、作業開始時に、仮想空間内の構造を把握するためには、ターゲットのサイズを予め既知とした経験的な操作、または試行錯誤して空間に触れることが必要であった。これを解決する手法として、運動視差を利用する方法がある。この種のインターフェースにおいて、奥行き手掛かりを視覚的に与える上で、運動視差は有効であるとされている [25]。ユーザの視線方向の変化に応じて、その観測方向に相当する仮想空間を描画することで、同機能は達成できると考えられる。これまでも、頭部に設置した磁気式の 3 次元位置センサを用いて、視点に応じた映像を既知の形状を備えた模型に投影するディスプレイシステムが報告されている [18]。カメラを用いることで、ユーザへのデバイス装着を要請せずに実現できる可能性も高いと考えられる。

次に、作業方式について考察する。今回の構成では、奥行き方向の操作範囲はスクリーンの伸縮性で限定される。今回の場合、奥行き量は 10cm 程度となっている。今後、スクリーンの改善によって、手のサイズ程度にまで奥行き量を広げていくことを予定しているが、伸縮量を超える場所にある物体を把持するなどのタスクを実現できない。そこで、スクリーンの可動化を導入し、スクリーン全体の移動とその変形を両立した作業方式への拡張を図る。多くのタスクは、リーチングと把持などのように、物体に接触しないダイナミックな動作と、物体に接触する手先の細かい動作に分解することが可能であると考えられる。スクリーンの可動化は、ダイナミックな動作を行うために有効であると

考えられる。

最後にシステム評価について考察する。今回は定性的な検証を通じて開発を行ったが、理想的にはタスクパフォーマンスを最大化する最適なシステムデザインを明らかにする必要がある。このためには、人間の視力や奥行き知覚の限界値を追求する方法と、タスクパフォーマンスを基準とした最低要件を解明する方法の 2 つが考えられる。例えば、視力 1.0 を達成するためには、ユーザの視点で 1/60 度の解像度が必要となる [26]。このためには、フル HD を超える映像提示と 1mm 以下の計測精度が必要となり、高度な技術が必要となる。一方、タスクパフォーマンスを基準とする場合は、多様なタスクに依存した状況に応じて、システム仕様とパフォーマンスの相関性を明らかにする必要があると考えられる。

5 まとめ

本論文では、3 次元の仮想物体を扱うための新しい枠組み Deformable Workspace を提案した。提案技術では、現実と仮想の 2 つの空間において、知覚の整合性を保つことで、仮想物体との直感的なインタラクションを実現することを目的とした。本システムでは、透明でタンジブルな境界面として働く物理的な膜を介して、両空間が接続していることをメタファとして取り込むことで、本目的の実現を目指した。これまで、仮想物体を取り扱うインターフェースやディスプレイは、運動感覚と視覚の間での空間知覚のずれを、ヘッドマウントディスプレイや 3 次元ディスプレイによって解決することを基盤とした取り組みが主流であったが、触覚やウェアラブルデバイスによる制限が問題であった。これに対し、本システムは、人間が特殊な装置を身に着けることなく、同問題を解決する見込みが高いと考えられる。

本論文で報告したシステムは、3 つの重要な技術を基盤として開発された。基盤技術となったものは、タンジブルで変形可能な投影スクリーン、リアルタイム 3 次元センシング、アナモルフィック投影における適応的映像補正の 3 技術である。上述のように、変形するタンジブルスクリーンの導入によって、知覚の問題を解消するとともに、独自に開発した高速センシングによって、適応的な映像補正とシームレスな操作が可能となっている。また、本システムで有効に作用する新たな応用を提案した。本論文では、マルチタッチによる物体の 3 次元操作、自由曲線や曲面の 3 次元モデリング、物体の内部構造の表示機能を具体的に実証した。

参考文献

- [1] S. Bae, R. Balakrishnan, and K. Singh. Everybodylovesketch: 3D sketching for a broader audience. *UIST*, pages 59–68, 2009.

- [2] H. Nishino, D. Nariman, and K. Utsumiya. Making 3D objects through bimanual actions. *SMC*, pages 3590–3595, 1998.
- [3] S. Schkolne, M. Pruetz, and P. Schroder. Surface drawing: creating organic 3D shapes with the hand and tangible tools. *CHI*, pages 261–268, 2001.
- [4] blui: Body Language User Interface, <http://www.blui.org/>.
- [5] K. Kiyokawa, H. Takemura, and N. Yokoya. Seamless design for 3D object creation. *IEEE Multimedia*, 1(7):22–23, 2000.
- [6] G. A. Lee, G. J. Kim, and C. Park. Modeling virtual object behavior within virtual environment. *VRST*, pages 41–48, 2002.
- [7] A. Cassinelli and M. Ishikawa. Khronos projector. *SIGGRAPH, Emerging Technologies*, 2005.
- [8] H. Ishii, C. Ratti, B. Piper, Y. Wang, A. Biderman, and E. Ben-Joseph. Bringing clay and sand into digital design - continuous tangible user interfaces. *BT Technology Journal*, 22(4):287–299, 2004.
- [9] J. L. Reisman, P. L. Davidson, and J. Y. Han. A screen-space formulation for 2D and 3D direct manipulation. *UIST*, pages 69–78, 2009.
- [10] O. Hilliges, D. Kim, and S. Izadi. Creating malleable interactive surfaces using liquid displacement sensing. *TableTop*, pages 167–170, 2008.
- [11] J. Hook, S. Taylor, A. Butler, N. Villar, and S. Izadi. A reconfigurable ferromagnetic input device. *UIST*, pages 51–54, 2009.
- [12] Y. Watanabe, A. Cassinelli, T. Komuro, and M. Ishikawa. The deformable workspace: a membrane between real and virtual space. *TableTop*, pages 155–162, 2008.
- [13] 吉澤徹. 最新光三次元計測. 朝倉書店, 2006.
- [14] Y. Watanabe, T. Komuro, and M. Ishikawa. 955-fps real-time shape measurement of a moving/deforming object using high-speed vision for numerous-point analysis. *ICRA*, pages 3192–3197, 2007.
- [15] E. E. Hemayed. A survey of camera self-calibration. *AVSS*, pages 351–357, 2003.
- [16] Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *PAMI*, 22(11):1330–1334, 2000.
- [17] R. Raskar, G. Welch, M. Cutts, A. Lake, L. Stesin, and H. Fuchs. The office of the future: A unified approach to image-based modeling and spatially immersive displays. *SIGGRAPH*, pages 179–188, 1998.
- [18] 近藤大祐, 後藤敏之, 河野誠, 木島竜吾, and 高橋優三. 自由曲面への投影を用いたバーチャル解剖模型. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 10(2):201–208, 2005.
- [19] B. Watson, V. Spaulding, N. Walker, and W. Ribarsky. Evaluation of the effects of frame time variation on vr task performance. *VRAIS*, pages 38–44, 1997.
- [20] The Deformable Workspace, <http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/perception/DeformableWorkspace/>.
- [21] Z. B. Simpson. Novel infrared touch-screen technology and associated artwork. *SIGGRAPH, Emerging technologies*, 2004.
- [22] J. Rekimoto. Smartskin: An infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces. *CHI*, pages 113–120, 2002.
- [23] K. Hirota and Y. Saeki. Cross-section projector: Interactive and intuitive presentation of 3D volume data using a handheld screen. *3DUI*, pages 55–61, 2007.
- [24] T. Nagakura and J. Oishi. Deskrama. *SIGGRAPH, Emerging technologies*, 2006.
- [25] D. A. Bowman, E. Kruijff, J. J. LaViola, and I. Poupyrev. *3D User Interfaces: Theory and Practice*. Addison-Wesley Professional, 2004.
- [26] 山崎昌廣 他. 人間の許容限界事典. 朝倉書店, 2005.

(2009年12月02日受付)

[著者紹介]

渡辺 義浩 (正会員)



2007年東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了。2004–2007年日本学術振興会特別研究員。2007年同大学院リサーチフェロー。2008年同研究科特任助教、現在に至る。高速ビジョン、超並列プロセッサ、実時間画像センシング、ヒューマンインターフェース等に関する研究に従事。博士(情報理工学)。2008年度日本ロボット学会論文賞。2008年度3次元画像コンファレンス優秀論文賞。2009年度エリクソン・ヤング・サイエンティスト・アワード。

アルバロ カシネリ



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。第9回メディアアート芸術祭アート部門大賞。第13回メディアアート芸術祭エンターテイメント部門優秀賞。アルスエレクトロニカ2006名誉表彰。

小室 孝



2001年東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻博士課程修了。同年科学技術振興事業団研究員。2002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、2005年講師。高速ビジョン、画像プロセッサ等に関する研究に従事。博士(工学)。第4回LSI IPデザインアワードIP賞。2004年度計測自動制御学会技術賞・友田賞。2008年度日本ロボット学会論文賞。

石川 正俊



1979年東京大学大学院修士課程修了。同年通産省工業技術院製品科学研究所に入所。1989年東京大学工学部計数工学科助教授。現在、東京大学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、2005年度東京大学副学長。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等に関する研究に従事。博士(工学)。2001年度、2008年度日本ロボット学会論文賞。2004年度計測自動制御学会技術賞・友田賞。2005年度応用物理学会光・電子集積技術業績賞。