

主消点操作による4次元視点制御とその評価

三輪 貴信¹⁾(正会員) 酒井 幸仁²⁾(非会員) 橋本 周司³⁾(非会員)

1) 早稲田大学大学院 先進理工学研究科

2) 福岡大学 工学部

3) 早稲田大学 理工学術院

Four-dimensional Eye-point Control by Principal Vanishing Points Operation and Its Evaluations

Takanobu Miwa¹⁾ Yukihiro Sakai²⁾ Shuji Hashimoto³⁾

1) Graduate School of Advanced Science and Engineering, Waseda University

2) Faculty of Engineering, Fukuoka University

3) Faculty of Science and Engineering, Waseda University

takmiwa @ shalab.phys.waseda.ac.jp

概要

4次元空間の主座標軸方向の無限遠点を3次元スクリーンに透視投影すると、主消点という情報になって現れる。主消点は、視点の位置や視線の方向と関連したものであり、これまでの我々の研究から、ユーザが4次元空間を移動するときの目印として働くことがわかった。3次元空間中の主消点の位置を用いて、4次元空間の視点の位置を決定できるため、主消点を4次元空間で視点を制御するためのインタフェースに用いれば、直感的に4次元空間をハンドリングできると考えられる。このような着想から我々は、主消点の選択・移動操作による4次元空間の視点制御手法を提案する。提案手法を実装したインタラクティブシステムを用いて、ユーザが3次元空間に表示された主消点を掴んで操作することで、4次元空間を任意の方向に移動し、様々な視点から4次元データを観察できることを確認した。更に、提案システムを評価するためのユーザテストを行い、本システムが従来システムよりも4次元空間での直感的な視点移動を実現できることを実証した。また、本システムを統計データの提示や物理現象の解析、アニメーションの生成等に応用できる可能性を示した。

Abstract

This paper proposes a novel 4-D eye-point control system via pick and move operation of principal vanishing points. Our previous research has shown that the principal vanishing points act as a landmark to move in 4-D space since they relate with the 4-D visual axis. Thus, it is expected that we can easily achieve intuitive 4-D interaction by utilizing them as an interface of 4-D space. We constructed an interactive system that enables users to move in an arbitrary direction in 4-D space. Furthermore, we evaluated the effectiveness of the proposed system by user experiments. Moreover, we verified the utility of the proposed system by applying it to various 4-D data.

キーワード

4次元空間, 4次元視点, 主消点, 4次元インタフェース.

Keywords

4-D space, 4-D eye-point, Principal vanishing points, 4-D interface.

1 はじめに

4次元空間の可視化の多くは、4次元データを3次元空間に投影する手法であるが、4次元空間での視点が固定されていたり [1, 2, 3], 視線変更に制限があったり [4, 5], 4次元空間を自由に動き回る仕組みを構築するには不向きであった。また、4次元空間でのインタラクションのほとんどが、4次元空間の回転移動をキーボードやジョイスティック、タッチパネルの操作に関連付けたものであり [6, 7, 8], 4次元空間で視点を変更するというアプローチからの研究は報告されていない。我々は、4次元空間を直感的に観察することを目的に、3次元空間の人間の動作を4次元空間の視点移動に対応させた、インタラクティブな可視化システムを開発した [9, 10]。更に、4次元空間における幾何要素や幾何判定の表現も一般化した [11]。これまでの可視化手法と異なり、4次元空間での自由な移動を可能にし、任意の位置と方向から4次元立体をはじめとする、様々な4次元データを提示することに成功している [12, 13, 14]。

このシステムの特徴の1つに、4次元データの3次元投影図に主消点を重ねて可視化する機能がある。主消点とは、4次元空間の主座標軸方向の無限遠点を3次元空間に透視投影した有限点である。これまでの研究から、ユーザが4次元空間でのインタラクションを行うとき、主消点が視点や視線の方向を制御する目印になっていることが確認された [15, 16]。この主消点を4次元空間で視点を制御するためのインタフェースに用いれば、4次元データの種類や見え方によらない直感的なハンドリングが期待できるだけでなく、キーボードやジョイスティック、タッチパネルを介した手法よりもスムーズに4次元空間とのインタラクションが達成できると考えられる。

本論文では、3次元空間に表示された主消点を操作することで、4次元空間での視点移動を制御する手法を提案する。提案手法を実装したインタラクティブシステムを用いて、ユーザが3次元空間に表示された主消点を掴んで動かすことで、4次元空間を任意の方向に移動し、様々な視点から4次元データを観察できることを示す。また、ユーザテストにより提案システムと従来システムを比較するとともに、4次元空間の視野が可視化に与える影響も調査し、本システムの有効性と可能性・発展性について議論する。

本論文の構成は以下のとおりである。まず、第2章において、3次元空間に現れる主消点から4次元空間の視点を制御するためのアルゴリズムについて述べる。第3章では、提案アルゴリズムを実装したインタラクティブな4次元視点制御システムについて説明する。第4章では、提案システムと従来システムの比較と、4次元空間の視野が可視化に与える影響について議論する。第5章では、本システムの応用例として、4次元データの相関関係の可視化と2次元調和振動子の位相空間の可視化、4次元空間でのアニメーションの生成を示す。最後に、第6章において、本論文の結論と今後の課題を述べる。

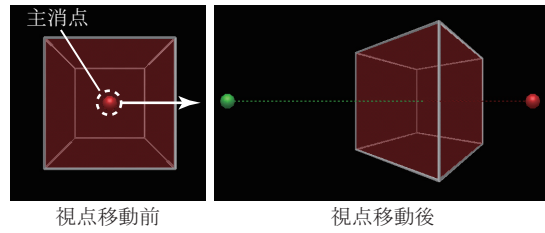


図 1: 主消点の操作から視点を変えて観察した立方体。

2 主消点操作による4次元視点制御アルゴリズム

透視投影は、視点を中心とする投影であり、視線上におかれた投影面に3次元空間の像を結ぶ。古くは絵画に奥行きを与えるための作図、近年ではコンピュータディスプレイに3次元物体を表示するための変換に用いられ、我々が経験的に外界を理解するイメージと同様な遠近感をキャンパスや2次元スクリーンに表現することができる。例えば、3次元空間で平行な構造が投影面に透視投影されると、その像は消点といわれる有限点に向かって集まるように描かれる。特に、3次元空間の主座標軸方向の無限遠点の像を主消点と呼ぶ。3次元空間で視点が移動すれば、それに応じて投影面上の主消点の数と位置に変化が生じる。主消点と視点の關係に注目すれば、投影面上の主消点の位置關係から3次元空間での視点の場所を推定できることがわかる [17]。つまり、図1に示す立方体の例のように、2次元スクリーン上で主消点の位置を動かすことにより、様々な視点から3次元立体を観察できるようになる。我々は、この關係を4次元空間に拡張し、3次元空間内の主消点の操作から4次元空間での視点制御を実現する。

2.1 4次元空間の視線と3次元空間の主消点の關係

4次元データの3次元投影図は、4次元ワールド座標系 $x_w y_w z_w w_w$ で定義されたデータを3次元スクリーン座標系 $x_s y_s z_s w_s$ のデータに変換することによって得られる [9, 10]。図2に示すように、視点 p_f から注視点 p_a の方向を視線とし、視点 p_f から距離 h の位置を中心とする3次元スクリーン $2k \times 2k \times 2k$ と距離 $f (> h)$ に位置する後方境界超平面で規定される4次元視点ピラミッドを視野として、その内側にある4次元データが3次元スクリーン上に可視化される。この変換プロセスは、4次元視野変換、4次元透視変換、4次元クリッピング処理で構成される。4次元ワールド座標系のデータから3次元スクリーン座標系のデータへの変換を、有限点だけでなく無限遠点まで含めて同次座標 V_s で一般化すると、式 (1) のよう

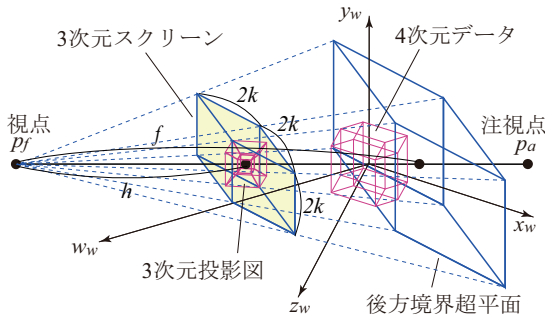


図 2: 4次元空間の可視化モデル .

にまとめられる .

$$\begin{aligned}
 V_s &= [X_s \ Y_s \ Z_s \ W_s \ v_s] \\
 &= [X_w \ Y_w \ Z_w \ W_w \ v_w] T_v(p_f, p_a) T_p(k, h, f), \\
 x_s &= \frac{X_s}{v_s}, y_s = \frac{Y_s}{v_s}, z_s = \frac{Z_s}{v_s}, w_s = \frac{W_s}{v_s}. \quad (1)
 \end{aligned}$$

式 (1) の行列 T_v を 4次元視野変換行列, 行列 T_p を 4次元透視変換行列と呼ぶ .

ここで, 4次元空間での視線と3次元空間に現れる主消点の関係について考える . 式 (1) に 4次元ワールド座標系の各主座標軸方向の無限遠点 $V_{x_w}(1, 0, 0, 0)$, $V_{y_w}(0, 1, 0, 0)$, $V_{z_w}(0, 0, 1, 0)$, $V_{w_w}(0, 0, 0, 1)$ を代入すると, 式 (2) のように主消点 vp_x, vp_y, vp_z, vp_w が 3次元空間中に得られる .

$$\begin{aligned}
 vp_x &= (x_{vp_x}, y_{vp_x}, z_{vp_x}) \\
 &= \left(\frac{h}{k \tan \beta \cos \gamma}, -\frac{h}{k} \tan \gamma, 0 \right), \\
 vp_y &= (x_{vp_y}, y_{vp_y}, z_{vp_y}) \\
 &= \left(0, \frac{h}{k \tan \gamma}, 0 \right), \\
 vp_z &= (x_{vp_z}, y_{vp_z}, z_{vp_z}) \\
 &= \left(-\frac{h \tan \beta}{k \cos \gamma}, -\frac{h}{k} \tan \gamma, -\frac{h}{k \tan \alpha \cos \beta \cos \gamma} \right), \\
 vp_w &= (x_{vp_w}, y_{vp_w}, z_{vp_w}) \\
 &= \left(-\frac{h \tan \beta}{k \cos \gamma}, -\frac{h}{k} \tan \gamma, \frac{h \tan \alpha}{k \cos \beta \cos \gamma} \right). \quad (2)
 \end{aligned}$$

式 (2) の中の α, β, γ は, 視点 p_f と注視点 p_a から求められた 4次元視野変換のための視線パラメータである . いくつかの主消点が既知であれば, 逆にこのパラメータを求めることで, 4次元空間での視点の位置を決定できることがわかる . 我々は, この対応関係に基づいて, 主消点をインタフェースとした 4次元視点移動を実現する .

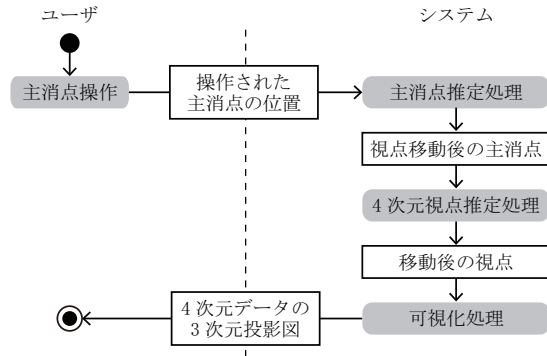


図 3: 主消点を用いた 4次元視点制御の流れ .

2.2 3次元空間の主消点を用いた 4次元空間の視点制御

図 3 に示すように, 4次元視点制御アルゴリズムは, 主消点推定処理と 4次元視点推定処理で構成され, 3次元空間での主消点の操作を, 4次元ワールド座標系の原点におかれた半径 r の 4次元球面上に沿った視点 $p_{f,b}$ の移動に変換する . ここで, 注視点 p_a を 4次元ワールド座標系の原点とする .

主消点の操作から移動後の視点を推定するためには, 常に主消点同士の幾何学的な位置関係が満たされている必要がある . 主消点推定処理は, ユーザが選択した 1つの主消点の操作に, 残りの主消点を追従させ, 自動的に適切な配置に移動させるものである . 例えば, 視点 $p_{f,b}$ の位置で, 3次元空間に 3次元投影図と主座標軸方向の主消点 $vp_{x,b}, vp_{y,b}, vp_{z,b}, vp_{w,b}$ が表示されていたとする . ここで, ユーザが主消点 $vp_{w,b}$ を vp_w へと動かせば, 他の主消点の位置は vp_w を用いて, 式 (3) のように推定することができる .

$$\begin{aligned}
 vp_x &= (x_{vp_x}, y_{vp_x}, z_{vp_x}) \\
 &= \left(-\frac{1}{x_{vp_w}} \left\{ \left(\frac{h}{k} \right)^2 + y_{vp_w}^2 \right\}, y_{vp_w}, 0 \right), \\
 vp_y &= (x_{vp_y}, y_{vp_y}, z_{vp_y}) \\
 &= \left(0, -\frac{1}{y_{vp_w}} \left(\frac{h}{k} \right)^2, 0 \right), \\
 vp_z &= (x_{vp_z}, y_{vp_z}, z_{vp_z}) \\
 &= \left(x_{vp_w}, y_{vp_w}, -\frac{1}{z_{vp_w}} \left\{ \left(\frac{h}{k} \right)^2 + x_{vp_w}^2 + y_{vp_w}^2 \right\} \right). \quad (3)
 \end{aligned}$$

同じように, 他の主消点を操作した場合や, すべての主消点が表示されていない場合でも主消点の配置を推定することができる . 主消点 vp_z, vp_w が 3次元空間を自由に移動できるのに対し, 主消点 vp_x, vp_y の移動は, それぞれ $x_s y_s$ 平面上, y_s 軸上に限られる .

4次元視点推定処理は, 主消点推定処理で得られた主消点 vp_x, vp_y, vp_z, vp_w から, これらに対応する 4次元空間の視点 p_f を推定する . 式 (2) から, 主消点既知であれば, 式 (4) に示すように, 視線パラ



図 4: 4次元視点制御システムの構成.

メータ α, β, γ を求めることができる.

$$\begin{aligned} \alpha &= \tan^{-1} \frac{z_{vpw}}{\sqrt{-z_{vpz}z_{vpw}}}, \\ \beta &= \tan^{-1} \frac{-x_{vpw}}{\sqrt{-x_{vpx}x_{vpw}}}, \\ \gamma &= \tan^{-1} \frac{-y_{vpw}}{\sqrt{-y_{vpy}y_{vpw}}}. \end{aligned} \quad (4)$$

移動後の視点 p_f は, 式 (4) を用いて式 (5) のように求められる.

$$\begin{aligned} p_f &= [x_{p_f} \ y_{p_f} \ z_{p_f} \ w_{p_f} \ 1] \\ &= [0 \ 0 \ 0 \ r \ 1] T_{xz}^{-1}(\gamma) T_{yz}^{-1}(\beta) T_{xy}^{-1}(\alpha). \end{aligned} \quad (5)$$

式 (5) の行列 T_{xz}, T_{yz}, T_{xy} は, xz 平面, yz 平面, xy 平面を軸とする 4次元回転行列である. 視点 p_f が $-\pi/2 \leq \alpha, \beta, \gamma \leq +\pi/2$ の範囲を超える位置にある場合は, 移動前後の視点を比較することで正しい視点を推定し可視化を行う.

以上の処理手順により, ユーザは, 3次元空間に表示された主消点の1つを選択し動かすことで, 4次元球面上に沿った視点移動を実現でき, 自由な4次元空間の観察が可能になる. 付録1に主消点操作による4次元立体の可視化を示す.

3 インタラクティブな4次元視点制御システムの構築

提案手法を実装し, 主消点を4次元空間での視点移動のインタフェースとして用いるインタラクティブな4次元視点制御システムを構築した(図4). 提案システムは, パーソナルコンピュータ(HP, Intel Core i7 3.90GHz, 8GB RAM, NVIDIA GeForce GTX 680), モーションセンサ(Xtion PRO LIVE, ASUS), 6軸センサ付きヘッドマウントディスプレイ

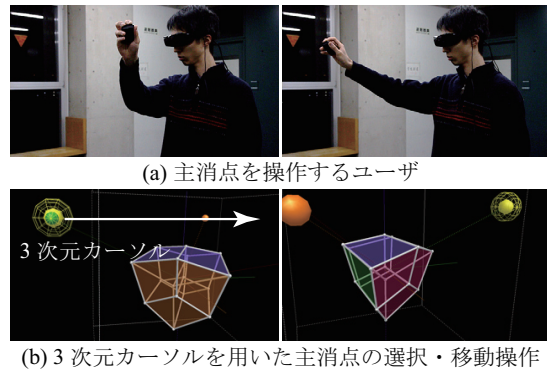


図 5: 手の動きを用いた主消点操作.

イ(Wrap 1200VR, Vuzix), 小型無線マウス(ELECOM)から構成される. ソフトウェアは, Windows 8(Microsoft)上で動作し, Visual C#, OpenGL, OpenNI, OpenCVを用いて実装した. 本システムは, 没入型のバーチャルリアリティシステムで, ユーザが装着するヘッドマウントディスプレイに4次元データの3次元投影図と3次元空間中の主消点が表示される. ヘッドマウントディスプレイの水平視野角は35度であり, PCとVGA接続され1280×720の解像度で映像を表示する. サイドバイサイド形式の立体視に対応しており, 左右のディスプレイに左目用と右目用の映像を表示することで, ユーザに4次元空間の可視化結果を立体映像として提示する. ユーザは3次元スクリーンがおかれた3次元仮想空間を自由に動き回り, 主消点を直接掴んで操作することができる. 付録のビデオにユーザが提案システムを使用して4次元立体を観察する様子を示す.

システムの動作速度は, 超立方体, 正24胞体を可視化した場合で250fps, 正600胞体を可視化した場合で30fpsであった. 正600胞体より多い幾何要素をもつ4次元データになると, リアルタイム性を損なっていくが, インタラクティブな操作を行う上では差し支えない動作速度となっていることを確認している.

3.1 ユーザの手の動きを用いた主消点の選択と移動操作

図5に, ユーザが主消点を掴んで動かし, 4次元データの3次元投影図を可視化した結果を示す. 3次元仮想空間にはユーザの手の位置を示す3次元カーソルが表示されており, モーションセンサが計測する実空間での手の動きと連動する. ユーザが手を動かして3次元カーソルを主消点に重ねた状態で, 手にもつ小型無線マウスのボタンを押すと主消点を掴むことができ, そのまま手を動かすとその方向に主消点を引っ張るように動かすことができる. これにより4次元球面上を任意の方向に移動して, 4次元データを観察することが可能である. また, 小型無線マウスのサイドボタンを操作することで4次元球面の半径 r の値を任意に変更し, 4次元データに近づいたり遠ざかること

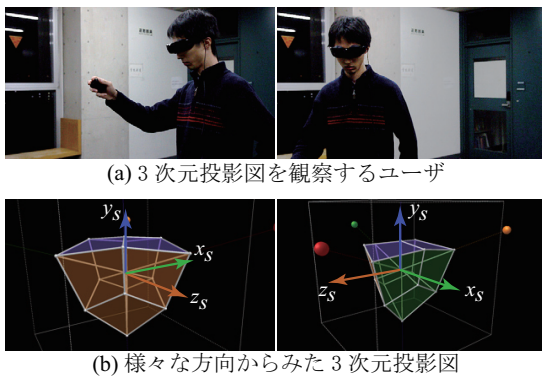


図 6: 頭部の動きを用いた 3 次元投影図の表示 .

が可能である . 4 次元透視変換のパラメータ (k, h, f) の値は , コントロールパネルから任意に変更でき , 4 次元空間を様々な視野で可視化できる .

モーションセンサが計測したユーザの位置情報は , モーションセンサに搭載される赤外線カメラを中心とする座標系のデータであるため , これを 3 次元仮想空間におかれた 3 次元スクリーン座標系のデータに変換する必要がある . 提案システムでは , システムの起動時にマーカを用いてモーションセンサと 3 次元スクリーンの幾何学的な関係を決めておくことで変換を行っている . モーションセンサの空間解像度は , モーションセンサからの距離に比例して低下していくため主消点操作に十分な空間解像度を得られなくなる . 一方で , ユーザがモーションセンサに近づきすぎるとトラッキングできる画角から外れやすくなる . 本論文では , モーションセンサの空間解像度と画角の双方を考慮して , 実空間でのモーションセンサから 3 次元スクリーンまでの距離が 1.5m , 3 次元スクリーンの大きさが 300mm×300mm×300mm になるように実験的に設定した .

3.2 ユーザの頭部の動きを用いた 3 次元投影図の自由な観察

図 6 に , ユーザが装着するヘッドマウントディスプレイに表示される 4 次元データの 3 次元投影図を示す . 提案システムでは , 実空間でのユーザの頭部の向きと姿勢および位置を検出し , その動きを 3 次元仮想空間の移動に反映する . これによりユーザは , 3 次元仮想空間を動き回って様々な方向から 4 次元データの 3 次元投影図を観察することができる . 頭部の向きと姿勢の計測には , ヘッドマウントディスプレイに内蔵される 6 軸センサを , 頭部の位置のトラッキングには , モーションセンサを用いている . 手の位置のトラッキングと同様に , モーションセンサの座標系で得られた頭部の位置情報を 3 次元スクリーン座標系の情報に変換している .

4 ユーザテストによる 4 次元視点制御システムの評価

提案システムを評価するため , ユーザテストを行った . まず , 提案システムと従来システムを比較する実験を行い , 提案システムの 4 次元空間での直感的なインタラクションへの有効性を評価するとともに , 提案システムのユーザビリティについても評価を行う . また , 4 次元空間の視野の変化が可視化や操作に与える影響を調査する .

4.1 視点移動作業による提案システムと従来システムの比較

提案システムが 4 次元空間での直感的なインタラクションに有効であるかを評価するため , 従来システムと比較するユーザテストを行った . 実験では , 主消点操作を用いて視点移動をする手法 , 視線パラメータの値を操作して視点移動をする手法 , 3 次元空間の人間の動作を 4 次元空間の視点移動に対応させる手法 [9, 10] の 3 種類を比較した . 各手法の入力方法はそれぞれ , ユーザの手の動き , キーボード , フライトコントローラパッドである . 実験は 21 名の被験者を 7 人ずつ 3 グループにわけて行った . どの被験者も 3 つのシステムに関する経験がほとんどない人物である . グループ 1 は , 男性 4 名 , 女性 3 名で構成され , 平均年齢は 22.1 歳で , 主消点操作を用いる手法を使用する . グループ 2 は , 男性 5 名 , 女性 2 名で構成され , 平均年齢は 21.9 歳で , 視線パラメータの値を操作する手法を使用する . グループ 3 は , 男性 5 名 , 女性 2 名で構成され , 平均年齢は 22.9 歳で , 3 次元空間の人間の動作を 4 次元空間の視点移動に対応させる手法を使用する .

まず , 被験者に 4 次元空間に関する基本的な知識とシステムの使い方を説明し , 視点移動操作の練習として超立方体の観察を自由に 10 分間行わせた . その後 , 4 次元球面上に与えられたスタート地点からゴール地点まで視点を移動させる作業を行わせた . ゴール地点として $(1.5, 0, 0, 0)$, $(0, 1.5, 0, 0)$, $(0, 0, 1.5, 0)$, $(0, 0, 0, 1.5)$ の 4 点を選び , それぞれにスタート地点として 4 次元球面上でランダムな視点を 8 点ずつ割り当てて , 32 問の問題を作成した . この 32 問の問題がランダムな順番で出題される . 観察対象として一辺の長さが 1 の超立方体を用い , 回答中は被験者にゴール地点で得られる超立方体の 3 次元投影図の画像を提示した . 被験者は任意のタイミングで回答ボタンを押すことができ , そのときの視点とゴール地点との距離が許容範囲内であれば正解として次の問題へ進ませ , 不正解であれば回答を継続させた . 本実験では , 許容範囲を 0.4 とした . これは , 4 次元ワールド座標系の原点からゴール地点および視点に向かう方向のなす角が 15 度以内であることに相当する . 1 問ごとに正解するまでに要した時間と正解時の視点とゴール地点との距離を記録した . これを 1 セットとして 5 分間の休憩を挟みながら 3 回繰り返した . また , 3 セットが終了した後 , 5 分間の休憩を挟み , 観察対象を正 24 胞体に変えて同様の実験を 1 セット行った .

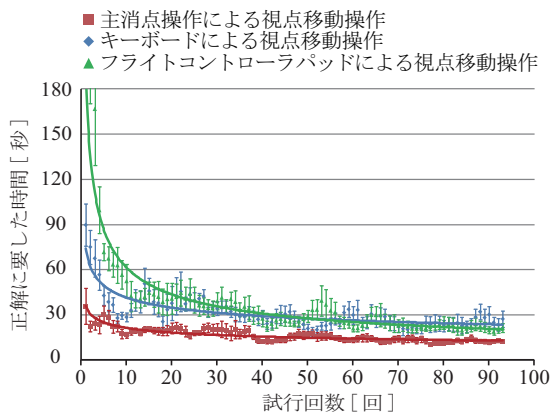


図 7: 試行回数と正解に要した時間の関係。

図 7 に、超立方体を観察対象とした 3 セット分の実験結果を示す。それぞれのグループについて、正解するまでに要した時間を 7 名で平均し、その 4 問ごとの移動平均を標準偏差付きでプロットした。提案システムを用いたグループは、他の 2 つのグループよりも短い時間で正解に辿り着いており、標準偏差も小さいことが確認された。また、3 セット目の 32 問について t -検定 (不等分散) を行い結果に有意差があるかを調べた。有意水準は $p < 0.01$ とした。グループ 1 とグループ 2 では $p = 7.9 \times 10^{-9}$ 、グループ 1 とグループ 3 では $p = 6.6 \times 10^{-7}$ となり、提案システムと従来システムの間有意差があることが確認された。正 24 胞体を使って行ったテストでは、スタート地点からゴール地点まで視点を移動するのに、グループ 1 は平均 17.7 秒、グループ 2 は平均 39.9 秒、グループ 3 は平均 25.5 秒を要するという結果が得られた。超立方体を用いた 3 セットと同様に、提案システムは他の 2 つのシステムより短い時間でタスクを完了できている。正 24 胞体を使った 32 問について t -検定 (不等分散) を行ったところ、グループ 1 とグループ 2 では $p = 5.8 \times 10^{-7}$ 、グループ 1 とグループ 3 では $p = 1.5 \times 10^{-4}$ となり、有意差が認められた。これらの結果から、本システムは、観察対象の種類によらず、4 次元空間の視点移動制御に有効であることが確認できた。

提案システムでは、モーションセンサと 6 軸センサには、それぞれ 150ms から 250ms、50ms から 100ms の遅延が確認された。バーチャルリアリティシステムでは、50ms を超えるとユーザが遅延を感じるようになり、150ms 程度が許容範囲といわれている [18]。また、空中で手を動かして主消点を操作するため、ユーザの微妙な動きやセンサのノイズの影響があり、キーボードやフライトコントローラを用いる手法に比べて視点位置の細かい調整が難しくなることが予想された。そこで視点移動制御の正確性についても評価を行った。3 セット目の 32 問について、それぞれのグループの 7 名について、正解時の視点とゴール地点との距離の平均値を求めた。グループ 1 は平均 6.5 度、グループ 2 は平均 5.4 度、グループ 3 は平均 5.5 度の誤差があり、提案システムは他の 2 つのシステム

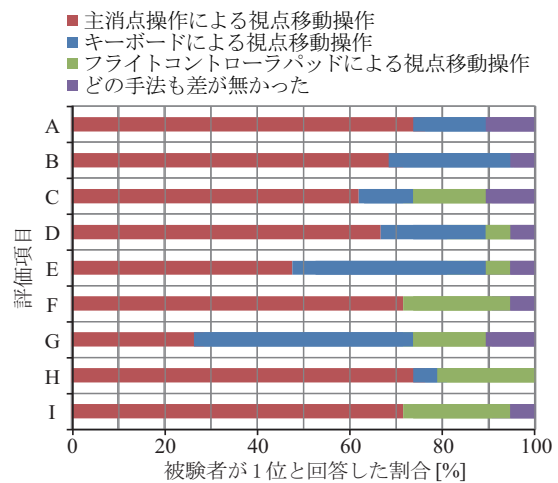


図 8: 主観評価実験による提案システムの評価。

と比較してわずかながら誤差が大きくなった。 t -検定 (1 対対応) を行くと、グループ 1 とグループ 2 では $p = 0.004$ 、グループ 1 とグループ 3 では $p = 0.003$ となり、有意水準 $p < 0.01$ で有意差が認められた。しかし、正 24 胞体を観察対象とした 32 問では、グループ 1 が平均 5.6 度、グループ 2 が平均 5.0 度、グループ 3 が平均 6.8 度の誤差であり、グループ 1 とグループ 3 で逆転が確認された。 t -検定 (1 対対応) を行くと、グループ 1 とグループ 2 では $p = 0.03$ 、グループ 1 とグループ 3 では $p = 0.05$ となり、超立方体を用いた実験と異なり、有意差が認められなかった。また、被験者からモーションセンサの遅延を感じたという意見は得られず、遅延が操作に与える影響は小さいと考えられる。これらの結果から、提案システムと従来システムでは、視点移動制御の正確さについての差は小さく、いずれのシステムでも思い通りに位置に視点を移動できると考えられる。

4.2 主観評価による提案システムと従来システムの比較

提案システムのユーザビリティを評価するために、提案システムと従来システムの順位付けによる主観評価実験を行った。実験には、第 4.1 節の評価実験を行った 21 名のうち 20 名が参加した。各被験者とも第 4.1 節の評価実験を行ってから 1~2 週間後の間に実験を行った。実験は、第 4.1 節で用いた 3 つのシステムの使い方を被験者に説明した後、それぞれのシステムを用いて超立方体と正 24 胞体の観察を 4 分ずつ自由に行わせた。順序効果の影響を小さくするために、システムを使用する順番は被験者ごとにランダムに入れ替えた。観察終了後、以下の項目ごとに 3 つのシステムを順位付けさせた。ただし、3 つのシステムに差が感じられなかった場合、被験者は「どれも同じ位だった」と回答できることとした。

A) システムの使い方がわかりやすい

- B) システムにすぐに慣れることができた
- C) 4次元空間で視点移動が理解できる
- D) 思い通りに視点を移動できる
- E) 操作に対する3次元投影図の変化が予想できる
- F) 観察対象が変わっても視点を思い通りに動かせる
- G) 正確に操作できた
- H) システムを使っていて楽しい
- I) システムをまた使ってみたい

図8に、各項目について被験者が1位と回答したシステムの割合を示す。結果から多くの被験者が提案システムに対し好印象を示しており、本システムがユーザに受け入れられやすいことが確認できた。特に視点移動操作に関して高い評価が得られた。また、被験者からも「どの手法でも入力に対する主消点の動きを考えるとわかりやすい」「主消点と比べてキーボードでは視点を動かしているというより投影図の形状が変化しているだけに感じた」「主消点を操作する手法は、4次元立体を直に観察しているように感じた」等、肯定的なコメントが多く得られた。これらの結果から、主消点が4次元空間でのインタラクションに重要な役割をもっており、これをインタフェースとした提案システムが従来システムよりも全般的に有用であることがわかる。

一方で、被験者から「主消点を操作する手法は、他の手法より細かい操作が難しい」というコメントが複数得られた。キーボードによる視点移動操作では、キーからの入力で見線パラメータの値を直接変更する。フライトコントローラパッドによる視点移動操作では、3次元空間での運動による移動量と4次元空間での視点の移動量が一致している。このように従来システムにおける入出力関係は1対1の対応であり、他の系からの影響を受けない。一方、提案システムでは、手を動かして主消点を掴むことで4次元空間の視点を操作する。これは直感的・直接的な反面、手の微妙な動きやモーションセンサのノイズ等の影響を受ける。このような要因から、ユーザに提案システムでの細かい作業を難しく感じさせたと考えられる。

4.3 4次元空間の視野の変化による可視化と操作性への影響

付録のビデオに示すように、我々の4次元空間の可視化アルゴリズムでは、4次元球面の半径 r や4次元透視変換のパラメータ (k, h, f) を調節することで、4次元データを様々な視野で可視化できる [9, 10]。図9に、4次元球面の半径操作により視点 p_f の位置を変えたときの超立方体の可視化を示す。4次元透視変換のパラメータは、 $(k, h, f) = (0.5, 0.5, 100)$ である。4次元データが4次元視点ピラミッドを視野とする内部にある状態から、4次元球面の半径 r を大きくして視点 p_f を4次元データから遠ざけると、3次元スクリーン上の3次元投影図は小さく表示される。一方、半径 r を小さくして視点 p_f を4次元データに近づけると、4次元データが3次元スクリーンを含む4次元視点ピラミッドによって切り取られ、その内部が表示される。主消点は、視線の方向が同じであれば、4次元球面の半径が変化しても同じ位置に表示される。

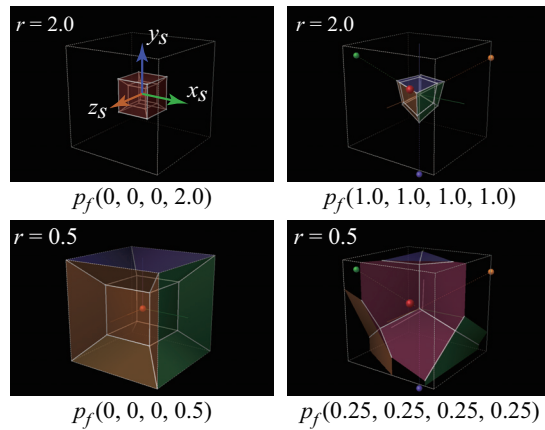


図9: 4次元球面の半径操作による超立方体の可視化。

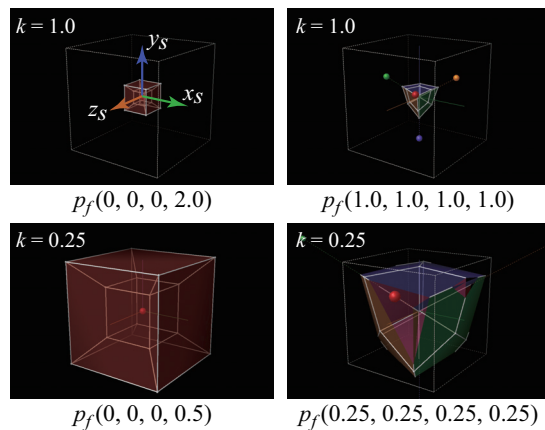


図10: 4次元視野の画角操作による超立方体の可視化。

図10に、4次元空間で広角・狭角操作により視野の広さを変えたときの超立方体の可視化を示す。4次元空間での視野の広さは、3次元スクリーンまでの大きさ k と視点 p_f から3次元スクリーンまでの距離 h の比によって決まる。例えば、図9と図10を比べると、視線の方向と4次元データまでの距離が同じでも、3次元スクリーンの大きさを変えて視野を広げると、主消点が表示される位置は3次元スクリーンの中心に近づく。逆に視野を狭めると、主消点が表示される位置は3次元スクリーンの中心から遠ざかるようになる。4次元視点ピラミッドの視野に収まらない場合、見切れた部分は切り取られるため、そこから4次元データの内部を覗くことができる。

図11に示すように、4次元球面の半径 r を大きくし、視点から3次元スクリーンまでの距離 h と後方境界超平面までの距離 f を大きくすることで、4次元データを平行投影で可視化できる。平行投影では、主消点は3次元空間のほぼ無限遠方に表示される。透視投影による可視化と異なり、4次元空間での遠近感が失われた提示結果となるが、4次元データが4次元空

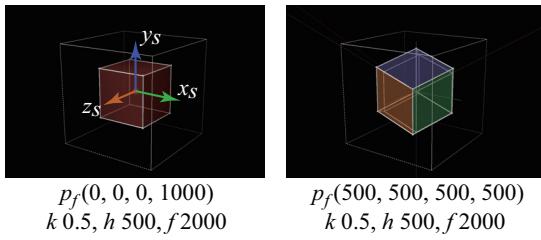


図 11: 平行投影による超立方体の可視化 .

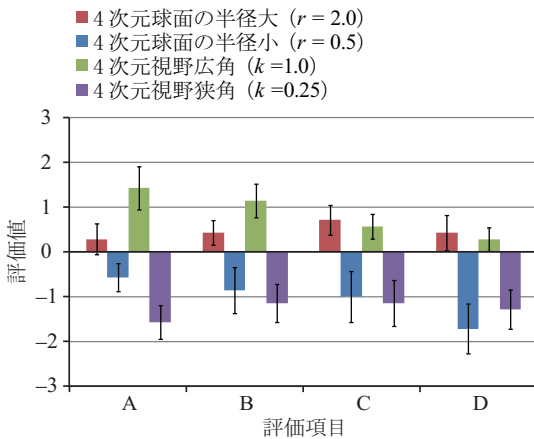


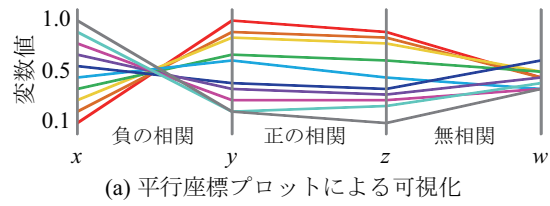
図 12: 4次元視野の変化と操作性の評価 .

間の主座標軸に平行または直交するような関係を視認できる .

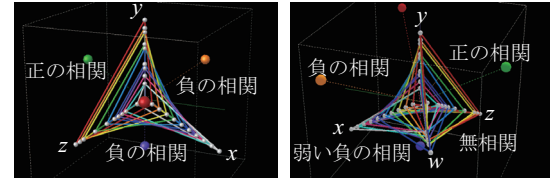
このような視野の変化が提案システムの操作性に与える影響を調べるユーザテストを行った . 実験は , 7名の被験者で行った . まず , 被験者に4次元視野変換のパラメータ $(h, k, f) = (0.5, 0.5, 100)$, 4次元球面の半径 $r = 1.5$ の条件で , 超立方体を自由に観察させた後 , 視野を変えて同様の観察を5分ずつ行わせた . 実験終了後 , 視野を変更した後でシステムの操作性や4次元空間の理解のしやすさが変化したかを以下の質問に7段階評価で答えさせて評価した . 評価値は +3 が視野を変更した前と後で操作性が向上したことを意味し , 0 が操作性に変化がなかったことを , -3 が操作性が低下したことを意味する .

- A) 主消点操作のしやすさ
- B) 視点を思い通りに移動できる
- C) 4次元空間で視点移動が理解できる
- D) 視点移動に対する3次元投影図の変化が予想できる

図 12 に示すように , まず , 4次元空間の視野の広さが主消点操作のしやすさに大きく影響していることが確認された . 図 10 と図 11 で示したように , 視野を狭くした場合や平行投影による提示の場合 , 主消点が3次元スクリーンの中心から遠い位置に表示される . 実空間でユーザの手が主消点に届く範囲には限りがあ



(a) 平行座標プロットによる可視化



(b) 提案システムによる可視化

図 13: 4次元データの変数間の相関の可視化 .

るため , これらの視野での視点制御は限定的なものになってしまう . しかしながら , 視野を広角から徐々に狭くして平行投影に近づけていけば , 3次元空間で主消点に向かって交わっていた超立方体の稜線が , 平行になったり , 直交したりする様子が観察される . このように目的をもって視野を変化させることを行えば , 4次元立体の特徴を理解する上で役立つと考えられる . また , 視点を超立方体に近づけた場合では , 3次元投影図の変化の予想が難しくなるという結果も得られた . 同様の傾向は , 視野を狭めた場合でも得られている . 共通する点として超立方体の内部が可視化されることがあり , 外側からの観察に比べて , 全体的な超立方体の構造を理解しにくいといえる . しかしながら , 被験者のコメントに「内部の観察は胞と胞がどの面分を共有するかを考えられる」というものもあり , 様々な視野での観察が超立方体のような4次元立体を理解する上では役立つといえる . 今後は , 4次元空間での画角操作についても , ユーザが任意のタイミングで操作できるように提案システムを改良していく .

5 提案システムの応用

4次元空間の可視化には , 4次元立体のような幾何学的な情報を理解するためだけでなく , 統計データの提示や物理現象の解析等 , 様々な4次元データの取り扱いを容易にすることが期待できる . ここでは , 応用例として , 4次元データの変数間の相関関係の可視化と , 2次元運動の位相空間の可視化について述べる . また , 3次元展開図から4次元立体を組み立てるアニメーションを示し , 提案システムのメディアアートへの応用の可能性に触れる .

5.1 4次元データの相関関係の可視化

平行座標プロット [19] で , 図 13 (a) のように表されるデータを考える . 本システムを用いて , 各データ

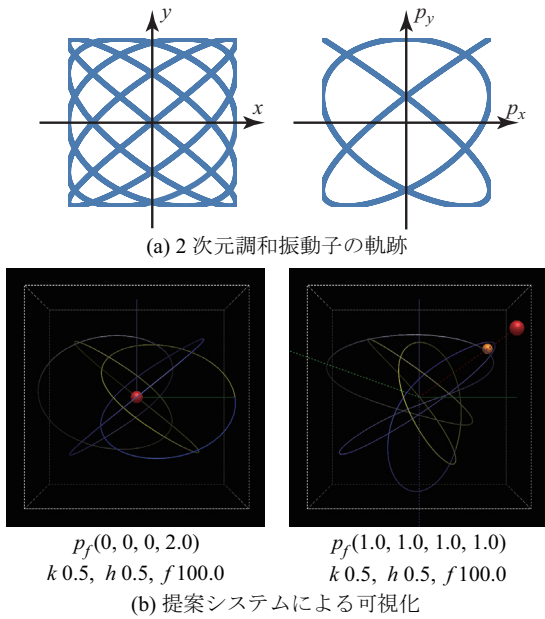


図 14: 2次元運動の位相空間の可視化。

の変数値を4次元ワールド座標系の主座標軸に対応させて線分をつなぐと、図 13 (b) のように様々な大きさで四面体を形成するような可視化結果が得られた。変数間の相関は線分が描く模様となって現れ、変数 y と z のように線分が平行なら正の相関を、変数 x と z のように線分が網目模様を描けば負の相関を意味する。また、その模様の均一さは相関の強さを表し、変数 x と w では相関が低いといえる。平行座標プロットでは、2軸以上離れた変数間の相関を扱うには軸の入れ替えが必要だったが、提案システムではすべての変数間の相関を一度に見通すことができる。また、主消点を操作することで特定の変数間の関係を強調したり、4次元空間をスライスして特定の変数値をもつデータのみを表示するというインタラクションが可能である。

5.2 2次元運動の位相空間の可視化

2次元平面上を運動する質点は、質点の位置 x, y と運動量 p_x, p_y で張られる4次元空間の軌道運動として表すことができる。このような空間は位相空間と呼ばれ、質点の描く軌道を観察することで運動の特徴を理解することができる。高次元の位相空間は、ポアンカレ写像等を用いて次元を下げて可視化されることが多いが、本システムを用いれば次元を縮退せずに可視化できる。例えば、2次元平面上で図 14 (a) のように軌跡を描く2次元調和振動子を、図 14 (b) に示す位相空間での軌道運動として観察できる。ただし、質点の位置 x, y と運動量 p_x, p_y をそれぞれ4次元ワールド座標系の x_w 軸, y_w 軸, z_w 軸, w_w 軸に対応させた。質点の運動は4次元空間で1本の閉曲線として可視化され、質点が位相空間で等エネルギー線

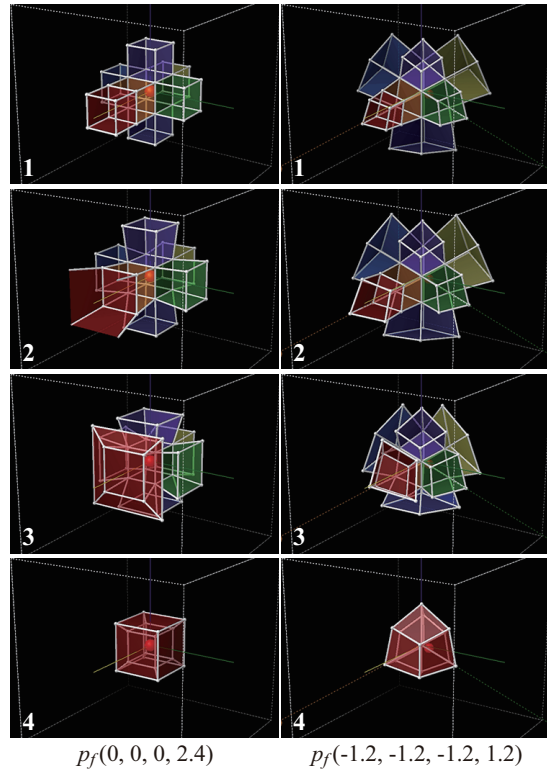


図 15: 3次元展開図からの超立方体の組立て。

上を運動する周期運動であることが示されている。また、実空間で質点が描く軌跡と異なり、4次元空間で軌道が交差しないことから、この運動では質点が同じ運動状態をとらないことが視覚的に提示されている。このように提案システムでは、質点の位置と運動量の関係を一度に表示することが可能であり、運動の特徴を理解しやすくなることが期待できる。今後は、カオス運動や3次元運動の位相空間を4次元空間に写像して提示する等、更なる検討を行う。

5.3 4次元空間での動きの可視化

3次元立体から2次元展開図を得るように、4次元立体を面分から切り開いていくと3次元展開図を作ることができる。逆に、3次元展開図を面分で折り曲げて組み立てていくと4次元立体に戻ることができる。例えば、超立方体の3次元展開図は8つの立方体を十字架型に組み合わせた形をしているが、3次元展開図を2つの立方体が共有する面分で90度ずつ折り曲げることで超立方体が組み立てられる。図 15 は、3次元投影図から超立方体が組み立てられる様子を、4次元空間の異なる視点からアニメーション表示した結果である。 $w_w = -0.5$ 超平面におかれた超立方体の3次元展開図は、超立方体の中心が4次元ワールド座標系の原点になるように組み立てられていく。付録のビデオに超立方体の組み立てを4次元空間で視点を交

えながら観察した様子を示す。このような 4 次元空間の動きの提示は、提案システムが単に 4 次元データを理解するためだけでなく、4 次元折り紙 [20] のような創作活動にも応用できる可能性を表している。

6 結論

本論文では、主消点の操作による 4 次元空間の視点制御手法を提案した。提案手法を実装した没入型のインタラクティブシステムを用いて、ユーザは 3 次元スクリーンに表示された主消点を操作することで、4 次元球面上を任意の方向に移動し、様々な視点と視野で 4 次元空間を可視化できる。ユーザテストの結果、提案システムが従来のキーボードやジョイスティック等の入力機器を介した従来システムよりも直感的で単純な操作によって 4 次元空間とのインタラクションが実現できることを実証した。本システムは、4 次元球面上の視点移動を扱っているが、今後、注視点の制御も考慮したアルゴリズムを構築し、4 次元迷路の攻略等の 4 次元空間をウォークスルーするようなコンテンツを用いて、高次元の空間把握に関する実験を行う。また、4 次元立体の変形操作や、統計データ等の情報可視化への応用を検討していく。

謝辞

本研究の一部は、早稲田大学ヒューマノイド研究所、グローバル COE プログラム「グローバルロボットアカデミア」、科学技術振興機構 CREST 研究「人を引き込む身体的メディア場の生成・制御技術」の研究助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] Alexander K. Dewdney: COMPUTER RECREATIONS: A Program for Rotating Hypercubes Induces Four-Dimensional Dementia, *Scientific American*, pp. 8–13 (April 1986).
- [2] Barbara Hausmann, Hans-Peter Seidel: Visualization of Regular Polytopes in Three and Four Dimensions, *Computer Graphics Forum*, Vol. 13, No. 3, pp. 305–316 (September 1994).
- [3] Andrew J. Hanson: Computer Graphics beyond the Third Dimension, *Course Notes for SIGGRAPH'98*, Course 46, (July 1998).
- [4] 宮崎 興二, 石原 慶一: 4 次元グラフィクス, ISBN 4-254-10075-2, 朝倉書店 (1989 年 9 月).
- [5] Steven R. Hollasch: Four-Space Visualization of 4D Objects, M.S. Dissertation, Arizona State University (August 1991).
- [6] Michael D'Zmura, Philippe Colantoni, Gregory D. Seyranian: Virtual Environments with Four or More Spatial Dimensions, *Presence*, Vol. 9, No. 6, pp. 616–631 (December 2000).
- [7] Julieta C. Aguilera: Virtual Reality and the Unfolding of Higher Dimensions, *Proceedings of SPIE, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XIII*, Vol. 6055, pp. 605–612 (January 2006).
- [8] Xiaoqi Yan, Chi-Wing Fu, Andrew J. Hanson: Multitouching the Fourth Dimension, *IEEE Computer*, Vol. 45, No. 9, pp. 80–88 (September 2012).
- [9] Yukihito Sakai, Shuji Hashimoto: Interactive Four-Dimensional Space Visualization Using Five-Dimensional Homogeneous Processing for Intuitive Understanding, *The Journal of the Institute of Image Information and Television Engineers*, Vol. 60, No. 10, (108)1630–(125)1647 (October 2006).
- [10] 酒井 幸仁, 橋本 周司, 4 次元視野制御を導入した 4 次元空間の可視化, *形の科学会誌*, Vol. 21, No. 3, pp. 274–284 (2007 年 3 月).
- [11] Yukihito Sakai, Shuji Hashimoto: Four-dimensional Geometric Element Definitions and Interferences via Five-dimensional Homogeneous Processing, *Journal of Visualization*, Vol. 14, No. 2, pp. 129–139 (June 2011).
- [12] Yukihito Sakai, Shuji Hashimoto: Four-dimensional Space-time Visualization for Understanding Three-dimensional Motion, *The Journal of the Institute of Image Electronics Engineers of Japan*, Vol. 36, No. 4, pp. 371–381 (July 2007).
- [13] Yukihito Sakai, Shuji Hashimoto: Four-dimensional Mathematical Data Visualization via “Embodied Four-dimensional Space Display System”, *Forma*, Vol. 26, No. 1, pp. 11–18 (May 2011).
- [14] 三輪 貴信, 酒井 幸仁, 橋本 周司: インタラクティブな 4 次元スライス操作によるマルチパースペクティブ画像生成, *情報処理学会 第 74 回全国大会 (平成 24 年) 講演論文集*, pp. 4-169–4-170 (2012 年 3 月).
- [15] 三輪 貴信, 酒井 幸仁, 橋本 周司: 主消点操作による 4 次元視点制御, *NICOGRAPH 2012 Autumn*, pp. 103–110 (2012 年 11 月).
- [16] 三輪 貴信, 酒井 幸仁, 橋本 周司: 主消点の選択・移動操作を用いたインタラクティブな 4 次元視点制御システム, *情報処理学会 インタラクション 2013*, pp. 329–336 (2013 年 2 月).
- [17] 近藤 邦雄, 木村 文彦, 田嶋 太郎: 手描き透視図の視点推定とその応用, *情報処理学会論文誌*, Vol. 29, No. 7, pp. 686–693 (1988 年 7 月).
- [18] Robert S. Allison, Laurence R. Harris, Michael Jenkin, Urszula Jasiobedzka, James E. Zacher:

Tolerance of Temporal Delay in Virtual Environments, Proceedings of IEEE Virtual Reality 2001, pp. 247–254 (March 2001).

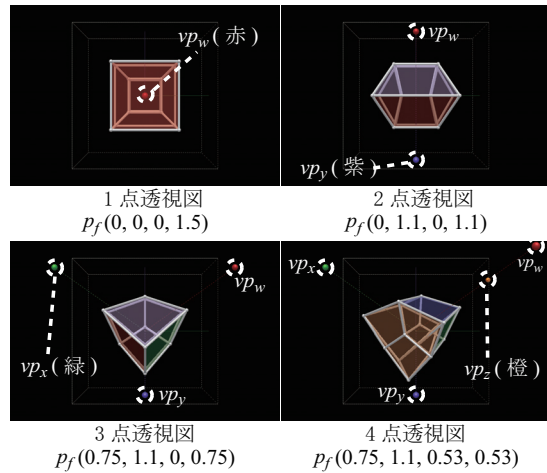
- [19] Alfred Inselberg, Bernard Dimsdale: Parallel Coordinates: A Tool for Visualizing Multi-dimensional Geometry, Proceedings of the First IEEE Conference on Visualization '90, pp. 361–378, (October 1990).
- [20] Akira Inoue, Ryouko Itoharu, Kuniaki Yajima, Keimei Kaino: CG Image Generation of Four-Dimensional Origami, The Journal of the Society for Art and Science, Vol. 4, No. 4, pp. 151–158 (December 2005).

付 録

1 主消点操作による 4 次元立体の可視化

付図 1 に、様々な視点から透視投影によって得られた超立方体の 3 次元投影図と主消点の表示結果を示す。いずれの図も 4 次元ワールド座標系の原点に注視点 $p_a = (0, 0, 0, 0)$ をおき、4 次元透視変換のパラメータを $(k, h, f) = (0.5, 0.5, 100)$ とした。超立方体の 8 つの胞はすべて異なる色で塗り分けられており、対心点関係にある胞が同系色になっている。また、3 次元投影図の内部にある稜線を確認しやすくするために、面分に格子状のスティプルパターンを与えて半透明感を作り出している。色やスティプルパターンは、可視化結果の視認性に考慮して実験的に決定した。図中の白の破線で閉じた立方体領域の内部が 3 次元スクリーンであり、その中心から右、上、手前に引かれた軸が 3 次元スクリーン座標系の x_s 軸、 y_s 軸、 z_s 軸に対応している。半径 $r = 1.5$ の 4 次元球面上の視点の位置に応じて、4 次元ワールド座標系と 3 次元スクリーン座標系との関係が変化し、様々な 3 次元投影図が提示されるとともに、主消点の位置と数も変化する。これらの 3 次元投影図は、主消点の数に応じて 1 点透視図、2 点透視図、3 点透視図、4 点透視図に分類される。提案手法では、4 次元視点ピラミッドを視野とする内部の 4 次元データが 3 次元スクリーンに投影されるが、主消点は 4 次元空間の主座標軸方向の無限遠点の投影像であるため、4 次元視点ピラミッドの視野とは関係なく、3 次元スクリーンをおく 3 次元空間全体に現れる。付図 1 に示すように、4 次元ワールド座標系の各主座標軸に平行な超立方体の稜線は、3 次元投影図中においては、それらの稜線を延長すると主消点に向かって交わる。このように主消点と 3 次元投影図の関係から 4 次元空間での平行性・直交性の特徴をみつけられる。

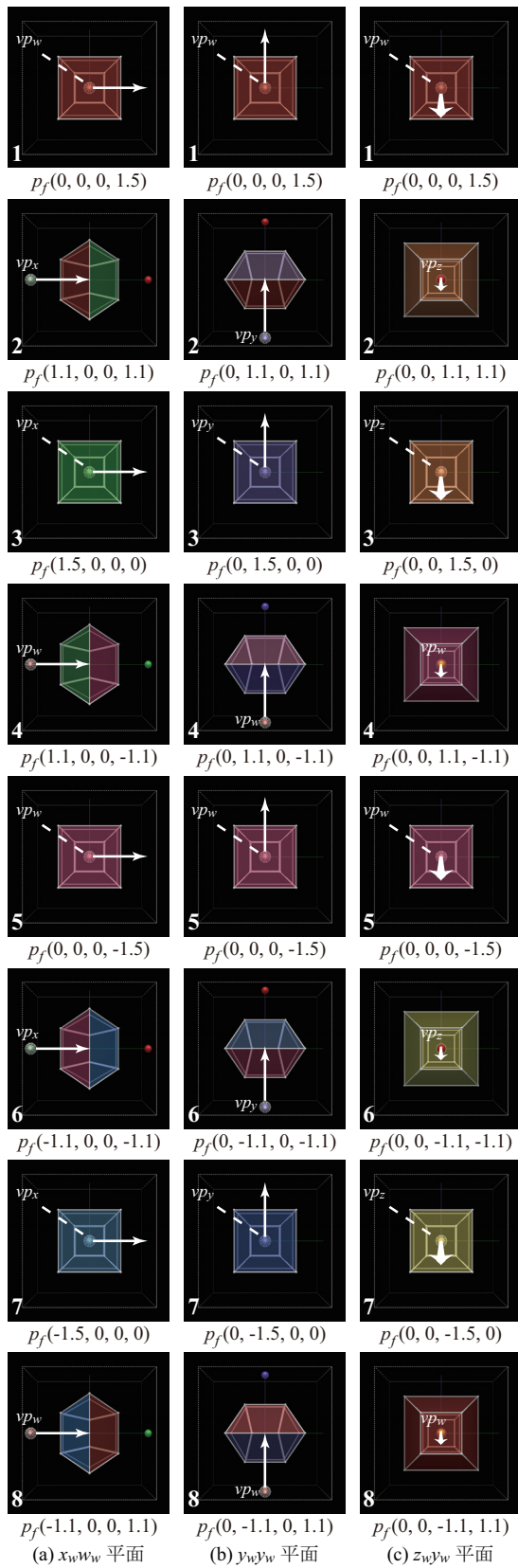
付図 2 (a) は、主消点 vp_w と vp_x を x_s 軸方向に動かして、視点 p_f を w_w 軸上の初期位置から $x_w w_w$ 平面内で 4 次元球面に沿って一周させたときの可視化結果である。同様に、付図 2 (b) は、主消点 vp_w と vp_y を y_s 軸方向に動かして $y_w w_w$ 平面内で、付図 2 (c) は、主消点 vp_w と vp_z を z_s 軸方向に動かして



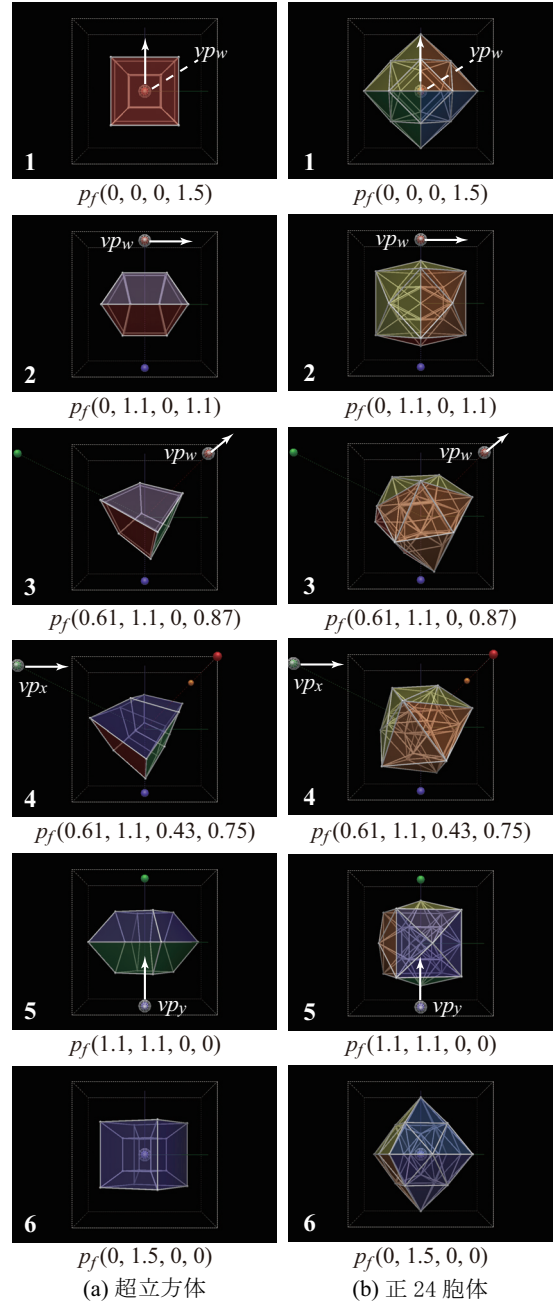
付図 1: 超立方体の 3 次元投影図と主消点の可視化。

$z_w w_w$ 平面内で視点 p_f を 4 次元球面に沿って一周させたときの可視化結果である。付図 2 の 1 と 5, 2 と 6, 3 と 7, 4 と 8 は、それぞれ異なる視点からの可視化結果であるが、3 次元空間中には同一の主消点が見えている。これは、2 つの視点が互いに対心点関係にあることを示している。このような関係を理解すると、ある視点から回り込んで反対側の視点に移動したことを判断するのに役立つといえる。

付図 3 に、主消点操作による 4 次元空間での視点移動と 3 次元投影図の対応関係を示す。これらの透視投影による 3 次元投影図は、4 次元ワールド座標系の原点におかれた超立方体および正 24 胞体を、異なる視点からみて 3 次元スクリーンに投影した様子表現している。正 24 胞体の胞は、超立方体と同様に異なる色で塗り分けられ、面分に格子状のスティプルパターンを与えて、3 次元投影図の内部にある稜線を確認できるようにしている。4 次元球面の半径を $r = 1.5$ とし、4 次元ワールド座標系の w_w 軸上に初期の視点 $p_f = (0, 0, 0, r) = (0, 0, 0, 1.5)$ があるとき、3 次元スクリーンには w_w 軸方向の主消点 vp_w のみが表示されている (付図 3 の 1)。ユーザが主消点 vp_w を y_s 軸方向に動かすと、視点 p_f が 4 次元球面に沿って $y_w w_w$ 平面内を移動し、1 点透視図から 2 点透視図に変化する (付図 3 の 2)。そこから主消点 vp_w を x_s 軸方向に動かすと、視点 p_f は $x_w w_w$ 平面と平行に移動し、3 点透視図が得られる (付図 3 の 3)。更に、主消点 vp_w を z_s 軸方向に動かすと、視点 p_f が $z_w w_w$ 平面と平行に移動して、4 点透視図へと変化する (付図 3 の 4)。その後、ユーザがこれまでと異なる主消点 vp_x を選択し、 x_s 軸方向に動かすと、視点は 4 次元球面上を $x_w z_w w_w$ 超平面と平行に移動し、主消点 vp_x が y_s 軸上に移動したところで、視点 p_f が $x_w y_w$ 平面上に達して 2 点透視図が得られる (付図 3 の 5)。動かす主消点を vp_y に切り替え、 y_s 軸方向に動かすと、視点は最後に y_w 軸上に到達して 1 点透視図へと変化する (付図 3 の 6)。このように提案手法は、主消点の選択と移動操作によって、4 次元球面上を任意の方向に移動して 4 次元空間を観察することができる。

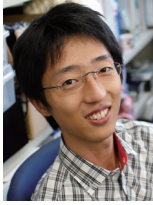


付図 2: 主消点操作を用いて 4 次元球面を一周したときの超立方体の可視化 .



付図 3: 主消点操作による 4 次元空間での視点移動と 3 次元投影図の対応関係 .

三輪 貴信



2010年早稲田大学理工学部応用物理学科卒業。2012年早稲田大学大学院先進理工学研究科物理学及応用物理学科専攻修士課程修了。2012年早稲田大学大学院先進理工学研究科博士後期課程入学。4次元グラフィックス，4次元インタラクション，ヒューマンインタフェース，情報可視化に興味をもつ。情報処理学会，芸術科学会会員。

酒井 幸仁



1999年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。2001年早稲田大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程修了。2004年株式会社東芝退職。2007年早稲田大学大学院理工学研究科物理学及応用物理学専攻博士後期課程単位取得満期退学。2008年博士(工学)。早稲田大学理工学術院客員研究助手，早稲田大学理工学術院助手，東洋大学総合情報学部助教を経て，2012年より福岡大学工学部図学教室准教授。4次元グラフィックス，4次元インタラクションに関する研究に従事。

橋本 周司



1970年早稲田大学理工学部応用物理学科卒業。東邦大学講師，助教授，早稲田大学助教授を経て，1993年より早稲田大学理工学部応用物理学科教授。確率過程の応用，画像処理，ロボティクス，音楽情報処理等の研究を通して，人間共存ロボット，メタアルゴリズム，感性情報処理，ヒューマンインタフェースに興味をもつ。工学博士。国際コンピュータ音楽協会副会長，IEEE 東京支部理事，画像電子学会理事，電子通信情報学会ヒューマンコミュニケーショングループ委員長等を歴任。現在，日本顔学会副会長，日本 AS-i 協会会長。