

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

三輪 貴信^{1,a)} 酒井 幸仁² 橋本 周司³

概要: 本論文では、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について述べる。4次元空間の主座標軸方向の無限遠点を透視投影すると3次元空間中に主消点という情報になって現れる。主消点は、4次元空間の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でユーザが4次元空間を移動するときの目印として働いていることが分かった。いくつかの主消点から4次元空間での視点の位置を決定できるため、主消点を4次元空間の視点移動のインタフェースとして用いれば、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。我々は、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次元立体の3次元投影図を観察するインタラクティブシステムを構築した。提案システムは、パーソナルコンピュータ、6軸センサ付きヘッドマウントディスプレイ、Kinect、小型無線マウスから構成される。ユーザテストの結果、本システムの高い操作性と4次元空間で直感的な視点移動を実現できることが示された。

Interactive 4-D Eye-point Control System to Use Pick and Move Operation of Principal Vanishing Points

MIWA TAKANOBU^{1,a)} SAKAI YUKIHITO² HASHIMOTO SHUJI³

Abstract: This paper proposes a novel interactive 4-D eye-point control system via pick and move operation of principal vanishing points. Principal vanishing points are represented by projecting infinite points in directions of 4-D principal coordinate axes onto 3-D space. Since the principal vanishing points relate with the 4-D visual axis, it acts as a landmark to move in 4-D space. 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 handle the principal vanishing points in 3-D space. Using the proposed system, users can intuitively move in an arbitrary direction in 4-D space and observe various 3-D projection drawings of 4-D data from different 4-D eye-point. The system is composed of a personal computer, a head mount display with a six-axis sensor, Kinect and a compact wireless mouse. We evaluated the proposed system to confirm usability and intuitiveness for the 4-D interaction.

1. はじめに

人間は、様々な方向から描かれた3次元物体の2次元投影図から3次元空間での視点位置や物体形状を把握するこ

とができる。同じように4次元空間の様々な視点から得られた4次元物体の3次元投影図を観察することができれば、4次元空間に関する理解を得ることができると考えられる。しかしながら、従来の4次元空間を可視化する手法では、4次元空間の視点が固定されている[1], [2], [3]。あるいは、視線変更に制限があるため[4], [5]、4次元空間を自由に動き回することは困難であった。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の操作に関連付けたものである[6], [7]。そこで、我々は4次元空間を直感的に観察

¹ 早稲田大学大学院 先進理工学研究科
Graduate School of Advanced Science and Engineering,
Waseda University

² 福岡大学 工学部
Faculty of Engineering, Fukuoka University

³ 早稲田大学 理工学術院
Faculty of Science and Engineering, Waseda University

a) takmiwa@shalab.phys.waseda.ac.jp

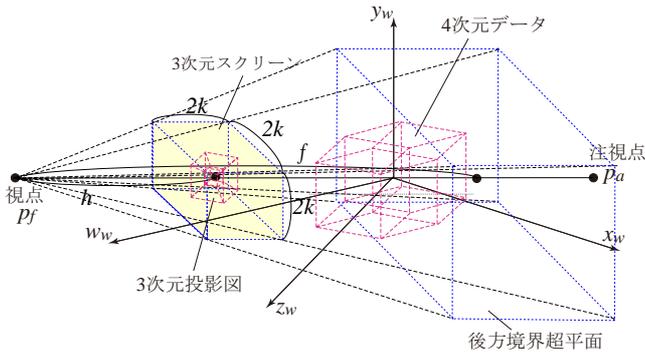


図 1 4次元空間の可視化モデル.

Fig. 1 4-D space visualization model.

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 [8], [9]. 更に, 4次元空間における幾何要素や幾何判定の関係も一般化した [10]. 4次元空間を自由に移動しながら, 4次元立体をはじめとする様々な4次元データを任意の位置と方向から3次元空間に提示することができる [11], [12], [13].

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畳し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 [14]. 我々は, この主消点を4次元空間での視点制御に用いれば, 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など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た.

本論文では, 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インタラクティブシステムを提案する. ユーザは, 3次元空間に表示された主消点を掴んで動かして4次元空間を任意の方向に移動し, 様々な視点から4次元データを観察することができる. 提案システムは, パーソナルコンピュータ, 6軸センサ付きヘッドマウントディスプレイ, Kinect, 小型無線マウスから構成される. また, ユーザテストを行うことで, 本システムの操作性と有効性について議論する.

2. 4次元空間の視線と主消点の関係

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 [8], [9]. 図1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

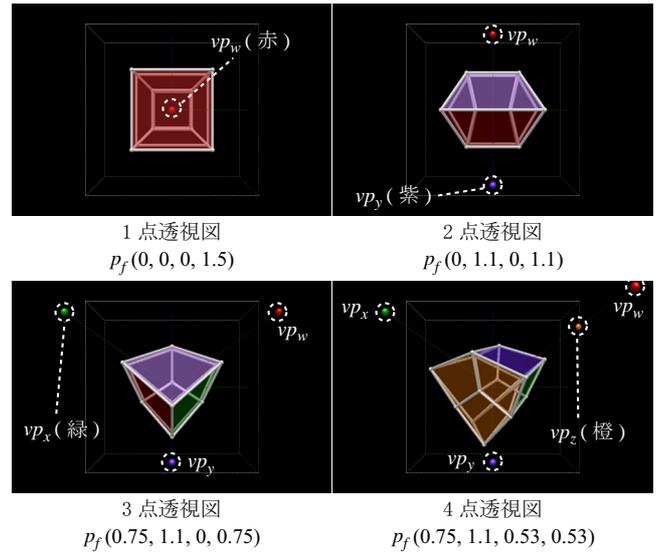


図 2 超立方体の3次元投影図と主消点の可視化.

Fig. 2 Visualization of 3-D projection drawings of the hypercube and principal vanishing points.

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次元視野変換, 4次元透視変換を同次座標表現で有限点だけでなく無限遠点まで含めて一般化すると, 式(1)のようにまとめられる.

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

上式の行列 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次元スクリーン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 $V_{x_w}(1, 0, 0, 0, 0)$, $V_{y_w}(0, 1, 0, 0, 0)$, $V_{z_w}(0, 0, 1, 0, 0)$, $V_{w_w}(0, 0, 0, 1, 0)$ 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次元スクリーン上に得られる.

$$\begin{aligned} vp_x &= [x_{vp_x} \ y_{vp_x} \ z_{vp_x}] \\ &= \frac{h}{k} \left[\frac{1}{\tan \beta \cos \gamma} \ - \tan \gamma \ 0 \right], \\ vp_y &= [x_{vp_y} \ y_{vp_y} \ z_{vp_y}] \\ &= \frac{h}{k} \left[0 \ \frac{1}{\tan \gamma} \ 0 \right], \\ vp_z &= [x_{vp_z} \ y_{vp_z} \ z_{vp_z}] \\ &= \frac{h}{k} \left[-\frac{\tan \beta}{\cos \gamma} \ - \tan \gamma \ - \frac{1}{\tan \alpha \cos \beta \cos \gamma} \right], \\ vp_w &= [x_{vp_w} \ y_{vp_w} \ z_{vp_w}] \end{aligned}$$

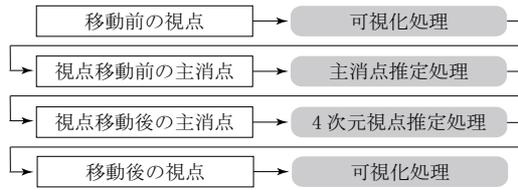


図 3 主消点を用いた視点制御の流れ .

Fig. 3 4-D eye-point control process using principal vanishing points.

$$= \frac{h}{k} \left[-\frac{\tan \beta}{\cos \gamma} - \tan \gamma \frac{\tan \alpha}{\cos \beta \cos \gamma} \right]. \quad (2)$$

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に関するパラメータである. いくつかの主消点既知であれば, 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分かる. 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2に, 様々な視点から中心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. いずれも注視点は原点にある. 視線の方向に応じて, 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.

4次元空間での視野の広さは, 4次元透視変換のパラメータ k と h の比によって決まる. 一般に視線の方向が同じでも, 3次元スクリーンの大きさを変えて視野を狭めると, 3次元スクリーンの中心と主消点を結ぶ方向は変化しないが, 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. 平行投影の場合では, 主消点が3次元スクリーンの無限遠方に現れるようになるため, 視野内で視認することは難しくなる.

3. 主消点による4次元視点制御

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次元スクリーン上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 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次元スクリーンに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.

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

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次元スクリーン上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, 視線に関するパラメータ α, β, γ を求めることができる.

$$\begin{aligned} \alpha &= \tan^{-1} \frac{z_{vp_w}}{\sqrt{-z_{vp_z} z_{vp_w}}}, \\ \beta &= \tan^{-1} \frac{-x_{vp_w}}{\sqrt{-x_{vp_x} x_{vp_w}}}, \\ \gamma &= \tan^{-1} \frac{-y_{vp_w}}{\sqrt{-y_{vp_y} y_{vp_w}}}. \end{aligned} \quad (4)$$

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.

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

行列 T_{xz}, T_{yz}, T_{xy} は, xz 平面, yz 平面, xy 平面を軸とする回転行列である. 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ことが可能である.

以上の処理手順により, ユーザは, 3次元スクリーンに表示された主消点の1つを選択し3次元スクリーン上を動かすことで, 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.

4. 主消点操作による4次元視点制御システム

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システ



図 4 インタラクティブシステムの構成 .
Fig. 4 Setup of the interactive system.

ムを構築した．図 4 に，システムの構成とユーザによる使用例を示す．提案システムは，パーソナルコンピュータ (DELL, Intel Core2 Quad 2.66GHz, 3GB RAM, NVIDIA GeForce 9800GT), Kinect (Microsoft), 6 軸センサ付きヘッドマウントディスプレイ (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 XP (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，ユーザはヘッドマウントディスプレイに表示される 3 次元空間の中を自由に動き回り，主消点を直接掴んで操作することができる．ここでは，4 次元球面の半径 $r = 1.5$ としたが，ユーザが手にもつ小型無線マウスのホイールを操作することで任意に変更することができる．4 次元ワールド座標系の w_z 軸上に初期の視点 $p_f = (0, 0, 0, r) = (0, 0, 0, 1.5)$ を，原点に注視点 $p_a = (0, 0, 0, 0)$ をおいた．また，4 次元透視変換に関するパラメータ $(k, h, f) = (0.5, 0.5, 100)$ とした．これらは，システムの起動時に設定し，基本的に値を固定した状態とする．

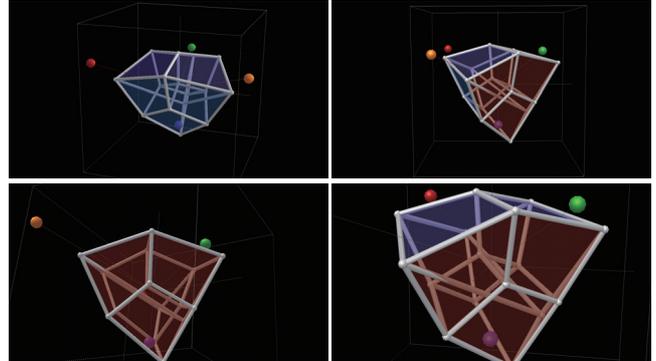
4.1 ユーザへの可視化結果の提示

提案システムでは，4 次元空間の可視化結果は，ユーザが装着した 6 軸センサ付きヘッドマウントディスプレイに提示される．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，4 次元データの 3 次元投影図と主消点を立体映像としてユーザに提示できる．

図 5 に，ユーザが中心投影による超立方体の 3 次元投影図を様々な方向から観察した様子を示す．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，その動きを仮想空間での 4 次元データの 3 次元投影



(a) 頭部を動かして超立方体の 3 次元投影図を観察するユーザ



(b) 様々な方向からみた 3 次元投影図

図 5 ユーザの頭部の動きを用いた中心投影による超立方体の 3 次元投影図の観察．

Fig. 5 Observation of 3-D projection drawings of the hypercube by the perspective projection using the user's head motion tracking.

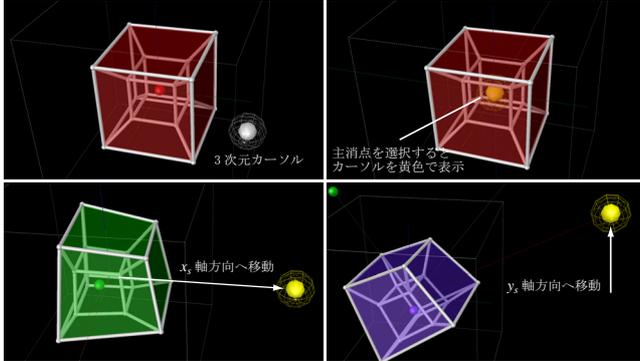
図を観察する方向に反映する．頭部の向きと姿勢の計測には，ヘッドマウントディスプレイに内蔵された 6 軸センサを，頭部の位置のトラッキングには，Kinect を用いている．ユーザの位置情報は，Kinect に搭載される赤外線カメラを中心とする座標系のデータであるため，これを仮想空間におかれた 3 次元スクリーン座標系のデータに変換する必要がある．今回は，3 次元スクリーンの大きさが実空間では 200mm×200mm×200mm になるように設定し，システムの起動時にマーカーを用いて Kinect と 3 次元スクリーンの幾何学的な関係を決めておくことで変換を行った．このようにユーザの頭部の情報を組み合わせることで，4 次元データの 3 次元投影図を様々な方向から観察することを可能にしている．

4.2 ユーザの手の動きを用いた主消点の操作

図 6 に示すように，仮想空間には 3 次元カーソルが表示されており，実空間での手の動きに連動して移動する．ユーザは手で小型無線マウスをもち，Kinect でトラッキングした実空間での手の動きを仮想空間に反映することで主消点を操作する．提案システムでは，Kinect を中心とする座標系で得られた手の位置情報を仮想空間におかれた 3 次元スクリーン座標系の情報に変換している．ユーザが手を動かしてカーソルを主消点に重ねた状態で小型無線マウスのボタンを押せば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．



(a) 手を動かして主消点を操作するユーザ



(b) 3次元カーソルを用いた主消点の選択・移動操作

図 6 ユーザの手の動きを用いた主消点の選択・移動操作 .

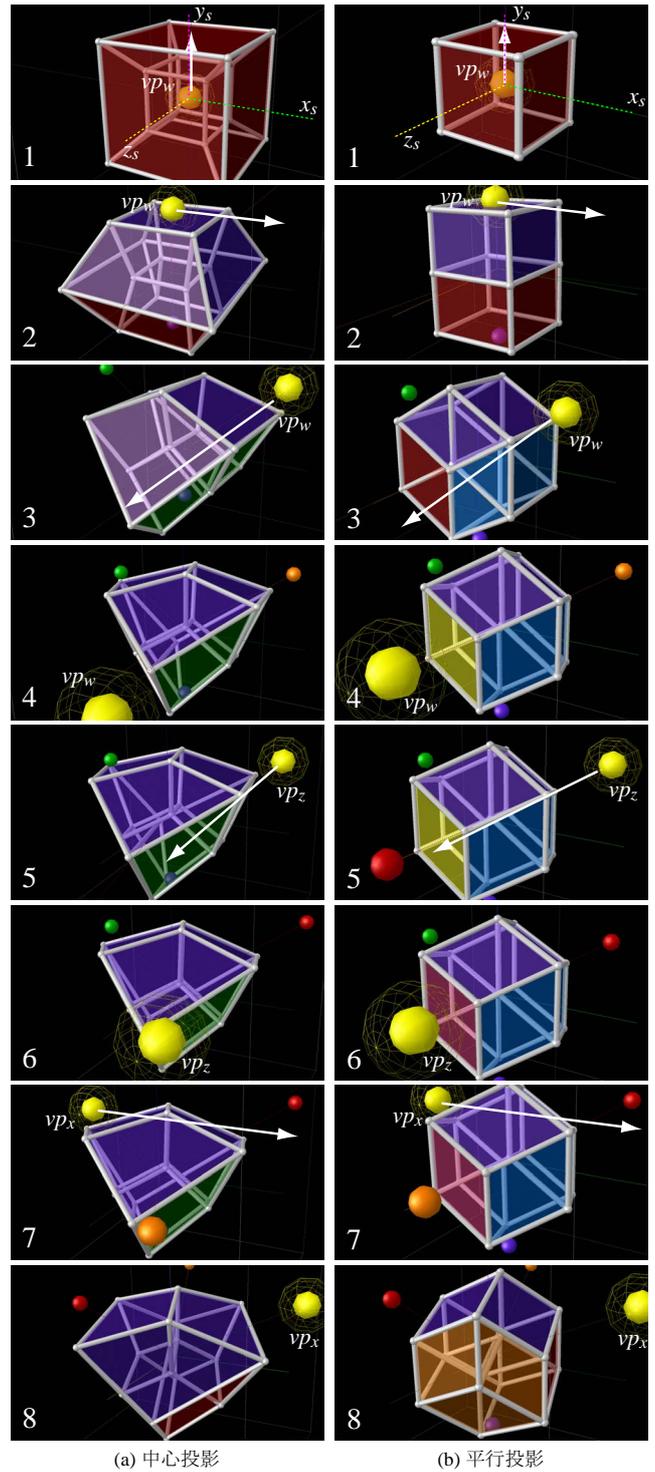
Fig. 6 Pick and move operation of the principal vanishing points using the user's hand motion tracking.

ユーザが主消点を操作するとき、手が届く範囲には制限があるため、主消点が3次元スクリーンの中心から大きく離れれば操作しにくくなると考えられる。特に4次元空間の視野を狭めたときや平行投影による可視化では、この点が操作性に大きな影響を与えるといえる。そこで、4次元空間の視野によらず、3次元スクリーンに表示する主消点を常に一定の4次元透視変換のパラメータで得られるものにするようにした。すなわち、事前実験の結果から4次元透視変換のパラメータ $(k, h, f) = (0.8, 0.5, 100)$ で得られる主消点を用いることにした。

5. 提案システムによる4次元空間の可視化

提案システムを用いて主消点を操作し、超立方体の可視化実験を行った(図7)。これらは、4次元ワールド座標系の原点におかれた超立方体を、異なる視点からみて3次元スクリーンに投影した様子である。図7(a),(b)はそれぞれ中心投影と平行投影による超立方体の可視化結果である。中心投影は4次元球面の半径 $r = 1.5$ 、4次元透視変換のパラメータ $(h, k, f) = (0.5, 0.5, 100)$ で、平行投影は $r = 1000$ として視点を超立方体から遠ざけ、4次元透視変換のパラメータ $(h, k, f) = (0.5, 500, 2000)$ として可視化した。それぞれで主消点がほぼ同じ動きをするよう操作した。3次元スクリーンの各軸は、図7の1番目の結果画像に示す通りで、3次元空間を俯瞰する形で操作した。

初期の視点は、4次元空間で w_w 軸上におかれており、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(図7の1)。ユーザがそれを掴んで引っ張って動



(a) 中心投影

(b) 平行投影

図 7 提案システムを用いた超立方体の可視化 .

Fig. 7 Visualization of the hypercube via the proposed system.

かすことで視点移動を開始した。図7(a)に示すように、主消点 vp_w を y_s 軸方向に動かすと、視点 p_f は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点透視図へと変化する(図7の2)。そのまま、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、2点透視図から3点透視図へと変化する(図7の3)。更に、主消点 vp_w を z_s 軸方向に動かすことで、視点 p_f が $z_w w_w$

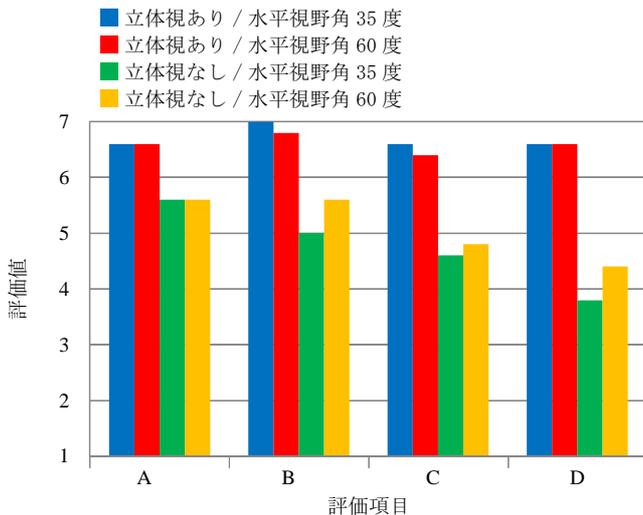


図 8 提案システムの操作性の評価。

Fig. 8 Result of the user test for the system usability.

平面と平行に移動して、4点透視図が得られる(図7の4)。ここで、主消点 vp_w を離し、主消点 vp_z を掴み z_s 軸方向へと引っ張って動かすと(図7の5)、視点は主消点 vp_w を z_s 軸方向へ移動したときと同じように $z_w w_w$ 平面と平行に移動する(図7の6)。その後、主消点 vp_x を掴んで動かすと(図7の7)、視点は $x_w w_w$ 平面に平行して移動する(図7の8)。 vp_x 、 vp_z の操作では、それぞれ視点が x_s 軸、 y_s 軸をまたぐように移動したところで $-\pi/2 \leq \alpha, \beta \leq \pi/2$ を超える範囲へと視点が移動するが、提案手法では移動前後の視点を比較しているため正しい可視化結果が得られている。図7(b)の平行投影の場合も同じ主消点操作で超立方体を観察することができる。

このように提案システムは、ユーザが3次元空間に表示された主消点を掴んで選択し引っ張って動かすことで、4次元球面上を任意の方向に移動して4次元データの3次元投影図を可視化することができる。

6. ユーザテストによるシステム評価

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を実現できているかを評価するため、ユーザテストを行った。実験は5名の被験者に対して行った。どの被験者も従来システムによる4次元空間でのインタラクション[8], [9], [14]を経験したことがあり、4次元空間に関する基本的な知識を有した人物である。被験者には、本システムの操作の仕方を簡単に説明した後、本システムの操作性と4次元視点移動の理解のしやすさに関する評価実験を行った。

6.1 提案システムの操作性の評価

本システムの操作性に関するユーザテストを行った。本システムでは、4次元空間の可視化結果の提示の仕方や、仮想空間での視野の広さが操作性に影響することが考えられ

る。そこで被験者に対し、1)可視化結果を立体視ありで表示し、仮想空間の水平視野角をヘッドマウントディスプレイと同じ35度にした場合、2)可視化結果を立体視ありで表示し、仮想空間の水平視野角をヘッドマウントディスプレイより広い60度にした場合、3)可視化結果を2D映像として表示し、仮想空間の水平視野角を35度にした場合、4)可視化結果を2次元映像として表示し、仮想空間の水平視野角を60度にした場合の4つの条件で超立方体を観察させ、実験終了後に以下の質問に7段階評価で答えさせた。評価値は7が最も肯定的、1が最も否定的であり、スコアが高いほどシステムの操作性が優れているといえる。

- A) システムに簡単に慣れることができた
- B) 3次元カーソルを思い通り動かすことができた
- C) 主消点を掴んで動かすことができた
- D) 3次元投影図や主消点が立体的にみえた

図8に示すように、すべての被験者が、可視化結果を立体視ありで表示したときにシステムの操作性に高い評価を示した。実験では、どの被験者も実験開始直後から主消点を掴んで動かすことに成功しており、システムの操作性が良好であるといえる。可視化結果を2次元表示したときは、3次元カーソルと主消点が重なっているかが分かりにくくなるだけでなく、奥行き感の錯覚が起こることもあったと考えられ、立体視を用いてユーザに明確な奥行き感を提示することが操作性と3次元投影図の理解を助けることが確認された。仮想空間での視野の広さに関する評価では、水平視野角が35度、60度のどちらの場合も大きな差はなく、操作性に与える影響が小さいことが確認された。本システムは良好な操作性を有し、ユーザが主消点を直感的に掴んで移動でき、3次元投影図を立体的に観察できたといえる。

システムの操作性に肯定的な評価が得られた一方で、被験者からはシステムの装着感について以下のようなコメントも得られた。

- ・ 空中で長時間腕を動かすのは思ったよりも疲れる
- ・ ヘッドマウントディスプレイが重く、ディスプレイケーブルが煩わしいことがある
- ・ 画面が目近く、目が疲れる

これらのうち、腕を空中で動かしたことによる疲労感については5名の被験者のうち4名が指摘し、ヘッドマウントディスプレイの重さについては3名が指摘した。腕の疲労感は小型無線マウスをもたせたことが原因とも考えられたが、この点を被験者に質問すると4名ともマウスの重さは気にならなかったと回答した。単純な疲労だと考えられる。また、本システムで用いたヘッドマウントディスプレイの重量は108gとかなり軽量な部類に属するものではあるが、装着したときのデバイスの重心が前よりにあることが重さを感じやすくさせた一因と考えられる。今後、シス

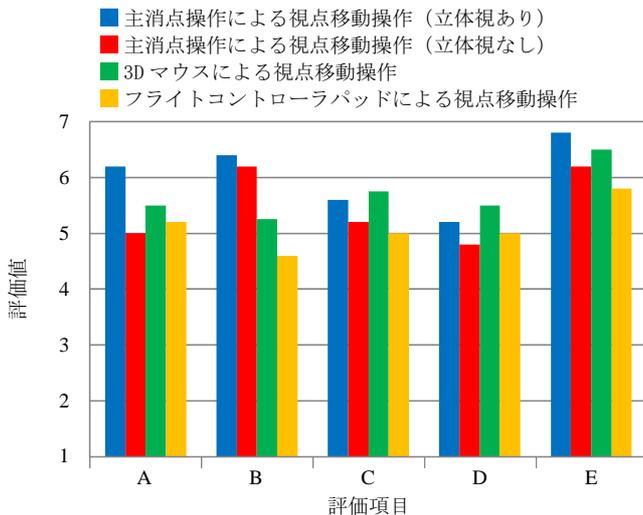


図 9 4次元視点制御の評価。

Fig. 9 Evaluation of the 4-D eye-point control.

テムの装着感やユーザが感じる負担を軽減できるようなシステム構成を検討してゆきたい。

6.2 提案システムを用いた4次元視点制御の評価

提案システムが、4次元空間での視点移動を直感的に制御することができているか評価を行った。実験では、仮想空間の水平視野角を35度に設定し、可視化結果を立体視した場合と2次元映像として表示した場合の2種類に加えて、3Dマウスを用いて主消点を操作するシステム[14]、フライトコントローラパッドを用いて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システム[8]、[9]の計4種類を用意した。追加した2つのシステムについて、前者は、3Dマウスの並進3軸を3次元スクリーンの x_s 軸方向、 y_s 軸方向、 z_s 軸方向に主消点を動かすための操作に対応させ、操作する主消点を3Dマウスの右ボタンを押して切り替えながら操作する。後者は、フライトコントローラパッドのハンドル操作で4次元空間の進行方向の転換を行い、ハンドル上のボタン操作で4次元空間の進行方向に沿って移動する。どちらの従来システムも、可視化結果は通常の液晶ディスプレイに表示され、被験者はそれをみながら手元におかれた入力デバイスを操作することで4次元空間で視点移動を制御する。

被験者に対し各システムを用いて超立方体を観察させ、実験終了後に以下の質問に7段階評価で答えさせた。評価値は7が最も肯定的、1が最も否定的であり、スコアが高いほど4次元空間での視点移動が良好であるといえる。

- A) 4次元空間での視点移動を理解できた
- B) 視点を思い通りの位置に移動できた
- C) 視点を移動したときの3次元投影図の変形を予想できた
- D) 4次元立体の形状を理解できた

E) システムを使っていて楽しい

図9に示すように、どの被験者も主消点の選択と移動を用いた提案システムに高い評価を示している。特に思い通りの位置に視点を移動できる点で、他のシステムと比較して高い評価が得られた。同じ視点制御アルゴリズムに基づくシステムでも、主消点を直接掴んで選択・移動できる本システムの方が、3Dマウスを用いるシステムよりも直感的に主消点を操作できることが、4次元視点移動を理解しやすくしていると考えられる。被験者からも本システムに対し、

- ・ 掴みによる選択・移動を用いるシステムが一番直感的で操作がわかりやすかった
- ・ 主消点を手で掴んでいるため、どの主消点を操作しているか迷わない
- ・ 主消点の操作と結果の対応が分かりやすい
- ・ フライトコントローラパッドを用いる手法は元の位置に視点を戻すのが難しかったが、主消点を操作するシステムは簡単だった

などの肯定的なコメントが得られた。本システムが、直感的な4次元空間での視点移動を実現できたといえる。

一方で被験者からは、以下に示すようなシステムの課題に関するコメントも得られた。

- ・ より広視野角のヘッドマウントディスプレイを用いれば、もっと操作しやすくなりそう
- ・ 4次元立体を観察するだけでなく、4次元空間でパズルを解くといったようなゲーム性のあるコンテンツが欲しい

今後は、4次元空間で積み木を組み上げるような単なる4次元データの観察に留まらないアプリケーションを検討するとともに、幾何学的な情報ばかりでなく様々な4次元データを取り扱えるように検討を行なっていく。

7. まとめ

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次元空間での視点を制御するインタラクティブな4次元可視化システムについて述べた。提案システムでは、ユーザの手の動きを仮想空間に反映することで、主消点を直感的に掴んで選択・移動でき、4次元空間を任意の方向に移動し、様々な視点から4次元立体を観察できる。ユーザテストの結果、本システムの高い操作性と4次元空間で直感的な視点移動を実現できることが示された。

今後は、提案アルゴリズムを改良し、注視点の変更操作や4次元立体の変形操作を可能にする。また、統計データのような情報可視化への応用と、4次元空間の認知に関する実験を試みる。

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] Yukihiro 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).
- [9] 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).
- [10] Yukihiro 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).
- [11] Yukihiro 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).
- [12] Yukihiro 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).
- [13] 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).
- [14] 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).