

触覚フィードバックを伴う4次元空間可視化システム

五十嵐 治雄[†]澤田 秀之[‡]早稲田大学大学院先進理工学研究科[†]早稲田大学理工学術院[‡]

1 はじめに

近年、4次元空間を観察、体験する様々なシステムが開発されている [1][2]。それらのシステムのほとんどは4次元空間の表現に視覚的情報しか用いていないが、実際には人は聴覚や触覚も用いて3次元空間を認識している。そこで、我々は4次元空間の情報を視覚と触覚の双方で知覚できるシステムを構築した。

本システムでは、4次元空間で知覚される触覚は3次元の皮膚への刺激により与えられるというアイデアのもと、モーションコントローラを握った手を4次元生物の皮膚に見立てる。4次元空間の映像はVR空間内の3Dスクリーンに投影され、そこに手を重ねることが4次元物体に触れることに対応する。刺激の強弱は視点から4次元物体の表面までの距離をもとに計算され、30個の振動モータを搭載した触覚グローブによって刺激が与えられる (図1)。

本稿では、本システムの技術的詳細とその実装結果について報告する。

2 4次元描画システム

描画システムはMcIntoshの4D Blocks[3]を基に構築した。

本システムでは、4次元の物体は4次元多胞体として定義する。3次元空間内の多面体が頂点、辺、面からなるように、4次元多胞体は頂点、辺、面、胞からなり、胞が多胞体の表面にあたる。

4次元ワールド座標系 $x_w y_w z_w w_w$ で定義された4次元物体は、3次元スクリーン座標系 $x_s y_s z_s$ に投影される [4]。触覚システムとの整合性を考慮して、投影は直交投影とした。

多胞体の面と辺を実際の描画に用いる。3DCGにおけるワイヤーフレームモデルのように、面や辺は4次元空間では表裏がなく、胞の輪郭として描画される。また、胞が見分けやすくなるよう、胞の中央部を着色した。

3 触覚提示システム

触覚提示システムのコンセプトを説明するために、ここでは3次元物体を2次元スクリーンに投影した場合について考える。図2, 3に例を示す。3次元物体が投影された2

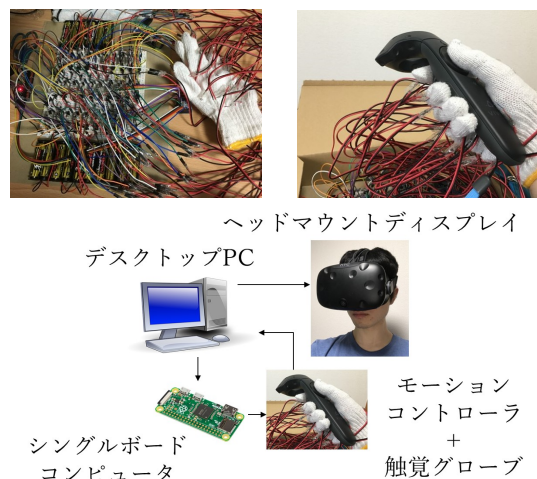


図1 触覚グローブとシステムの構成。

次元スクリーンに手で触れると、触れた部分が物体の表面に投影される。投影された手とスクリーンとの距離を計測し、例えば手の左側から測った距離が右側から測った距離より短いとすると、それは物体表面が右に傾いていることを意味する。このように、接触時の圧力の強さは距離の相対的な関係により計算できる。

この手法を4次元物体の3次元投影に拡張する。しかし、オブジェクトに触れるのはユーザ自身の手ではなく4次元生物の「4次元の手」であり、その「3次元の手の平」がユーザの手に対応付けられることになる。2Dスクリーンと違い、VR環境の3Dスクリーンに「触れる」ことはできないので、手をスクリーンに重ねることが触れることに対応する。手がスクリーンに入ると、2次元の場合と同じように刺激が計算され、振動パターンにより提示される。

4 触覚提示の様子

動作確認のために、各箇所の刺激の強さを表示する機能を実装した。刺激の位置と強さは立方体の位置と大きさで表され、そのうち水色の立方体で表された30か所の刺激が振動モータの振動量に反映される。

図4に示すように、胞が正面を向いた超立方体に触れると、均一な刺激が現れる。胞が少し左を向いていると、刺激は右が強く、左が弱くなる (図5(a))。傾きが大きくなるにつれて刺激の勾配も大きくなり、最終的に左端の刺激はなくなる (図5(b))。面、辺、頂点をそれぞれ正面になるように動かすと、それらの位置は刺激が最も強くなり、勾配の向きが変わる場所として特定できる (図6)。

図7に描かれた物体はいずれも8つの四角錐からなる

[†] 4D Space Visualization System with Tactile Feedback
[†] Haruo Igarashi, Major in Pure and Applied Physics,
 Graduate School of Science and Engineering, Waseda
 University

[‡] Yukihiro Sawada, Faculty of Science and Engineering,
 Waseda University

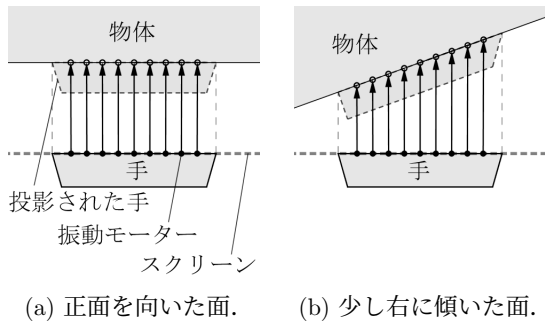


図2 触覚計算の様子（上から見た図）.

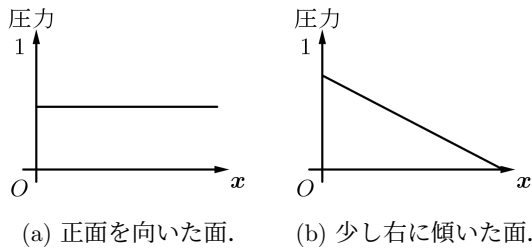


図3 計算結果.

立方体に見えるが、図 (a) は立方体錐（凸）、(b) は超立方体（平ら）、(c) は超立方体から立方体錐をくり抜いた図形（凹）となっており、ユーザはこれらを振動刺激の違いで区別できる。

5 まとめ

触覚を伴う4次元空間表示システムについて述べた。触覚は傾きや凹凸などの視覚での認識が困難な情報を補う。今後は、このシステムの4次元認知能力への寄与を、実験によって検証する。

参考文献

- [1] Alan Chu, Chi-Wing Fu, Andrew J. Hanson, and Pheng-Ann Heng. G14d: A gpu-based architecture for interactive 4d visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 15, pp. 1587–1594, October 2009.
- [2] Takanobu Miwa, Yukihiro Sakai, and Shuji Hashimoto. Learning 4-d spatial representations through perceptual experience with hypercubes. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, Vol. 10, No. 2, pp. 250–266, June 2018.
- [3] John McIntosh. The four dimensional blocks, 2014. Retrieved December 2020. <https://www.urticator.net/blocks/>.
- [4] Yukihiro Sakai and Shuji Hashimoto. Interactive four-dimensional space visualization using five-dimensional homogeneous processing for intuitive understanding. *Information and Media Technologies*, Vol. 2, No. 2, pp. 574–591, 2007.

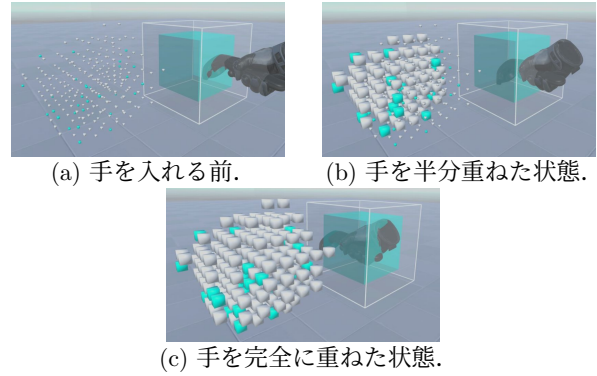


図4 正面を向いた超立方体に触れる様子.

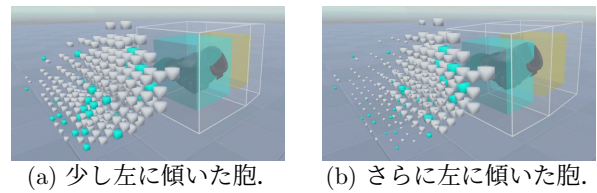


図5 左に傾いた超立方体に触れる様子.

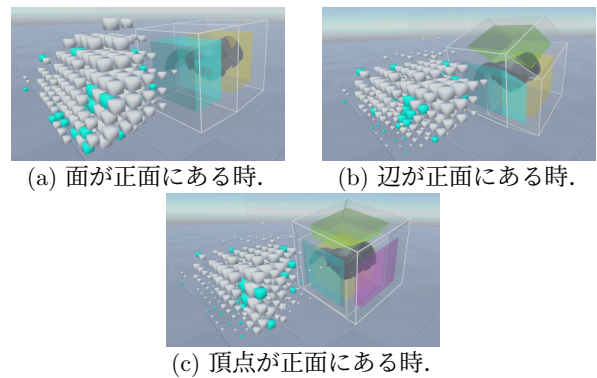


図6 超立方体の面、辺、頂点に触れた様子。刺激の分布は周囲の形状に沿って、平面 (a)、三角柱 (b)、四面体 (c) の形になる。

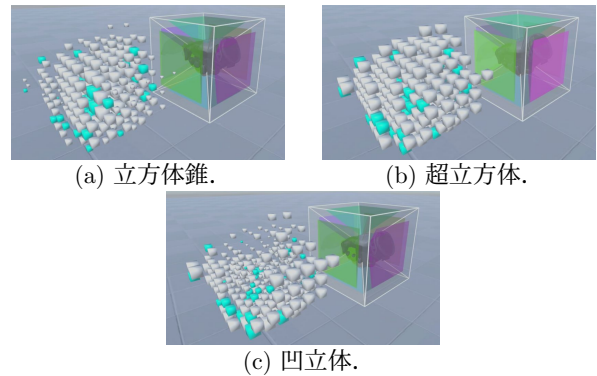


図7 凹凸の異なる立体に触れる様子。凸な胞に触れると中央の刺激は強く、凹な胞に触れると中央の刺激は弱くなる。