

3次元動作の拡張による直感的な4次元空間操作システムの構築

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次元空間をより直感的に体験するためのインタラクションシステムが多数提案されている [1][2][3]。しかしながら、それらは4次元映像提示の制御に最適化したインタフェースを用いており、一般のユーザにとっては理解が困難なものとなっている。そこで我々は、3次元の馴染み深いインタフェースを4次元に拡張することで、ユーザが4次元の操作を自然に学習できるシステムを構築した。

本システムでは、4次元空間とその切断面にあたる3次元空間との映像を同時に提示する。操作システムは4次元空間と幾何的に対応しており、応答を制限することで、3次元断面に対する直感的な操作が得られる。そのため、ユーザは3次元空間の操作を行いながら、その操作と4次元空間の映像との対応を観察し、4次元空間の映像操作について学習できる。また、応答制限を解除することで、4次元空間の自由な操作が可能になる。

本稿では、システムの技術的構成と、システムを用いた迷路探索実験の結果について報告する。

2 4次元空間可視化システム

本システムでは、4次元空間を3次元VR空間への投影によって提示する。4次元空間の構築と投影のアルゴリズムは、McIntoshの4D Blocks [4]に基づいている。

図1に次元を1つ下げたイメージ図を示す。2次元人（仮想2次元の住人）が3次元空間の2次元投影図を横から1次元画面に投影して観察するように、本システムでは4次元空間の3次元投影図を4次元人にとっての横方向から2次元VR画面に投影して観察することになる。

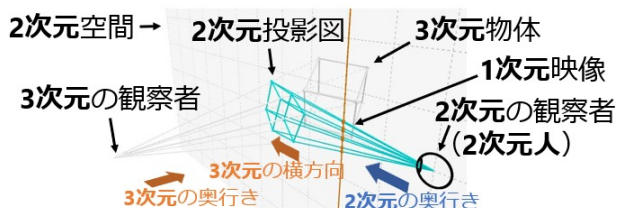
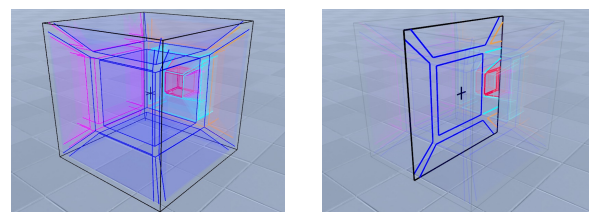


図1 2次元人による3次元物体の2次元投影図の観察。

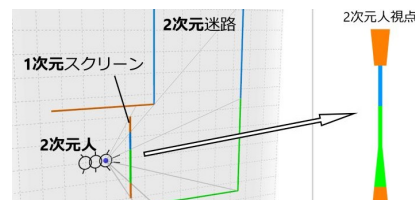
3 切断面

4次元空間を3次元超平面で切断することで、切断面としての3次元空間が得られる。3次元空間はさらに2次元

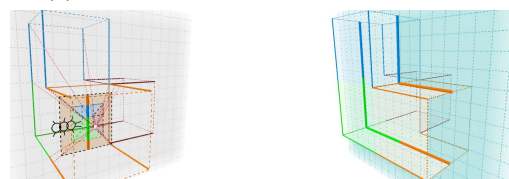


(a) 4次元空間の3次元投影. (b) 3次元断面の2次元投影.

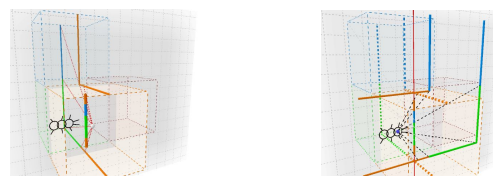
図2 4次元空間とその3次元断面の投影。



(a) 2次元人による1次元投影図の観察。



(b) 2次元投影の1次元断面. (c) 3次元空間の2次元断面.



(d) 2次元断面の1次元投影. (e) 2次元断面の復元.

図3 2次元人による2次元断面の観察。

画面に投影され、ユーザに提示される。本システムでは、投影図の中心での切断面を元の投影図と同時に描画することができる。その際、元の投影図は透明度を上げて描画される。

図2に描画例を示す。図2(a)には4次元迷路が描画されているが、図2(b)ではその切断面にあたる3次元迷路が描画されている。

図3に次元を1つ下げたイメージ図を示す。3次元との類推から、人が2次元の映像から3次元空間の様子を復元するように、2次元人は1次元投影図の観察によって想像で2次元空間を復元できると考えられる（図3(a)）。一方、3次元空間の2次元投影図を切断することで、1次元の図が現れる（図3(b)）。これは、2次元人の存在する平面と垂直な面で3次元空間を切断した2次元断面（図3(c)）を投影することで得られる1次元投影図（図3(d)）と同一で

Development of an intuitive 4D space manipulation system by extending 3D motion

[†] 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

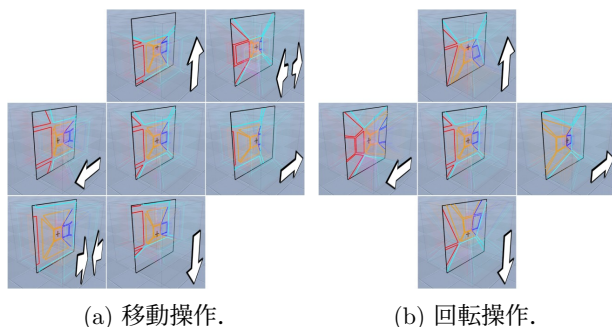


図 3 次元の操作システム.

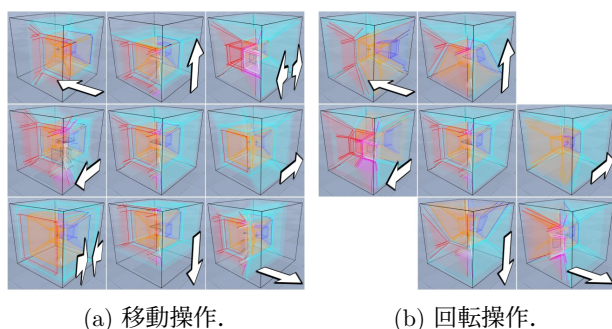


図 5 4次元の操作システム.

ある。そのため、2次元人はこの図を観察することで2次元断面を復元できる(図3(e))。ただし、復元した2次元断面の奥行き方向は3次元人の奥行き方向から2次元人の奥行き方向に置き換わっている。

4 操作

図4に本システムの3次元操作の例を示す。ビデオゲーム等で一般的な、左手の操作レバーで移動、右手の操作レバーで回転を行うシステムに対応し、モーションコントローラのボタンを押しながらコントローラを動かすことで、その方向に移動や回転を行うことができる。なお、4次元への拡張を可能にするため、前後移動はコントローラの回転に対応させている。

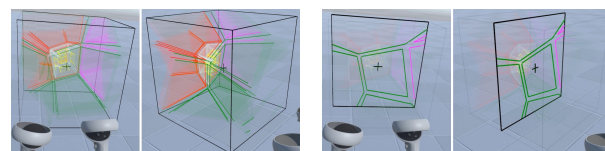
図5に4次元に拡張した操作の例を示す。4次元空間では、3次元の操作に加え、断面に垂直な方向(ユーザにとっての奥行き方向、以下第4方向と称する)にコントローラを動かすことで移動や回転を行うことができる。ユーザはボタン入力によって第4方向の操作の有無を切り替えることができる。

5 迷路探索実験

4次元空間に関する予備知識の無いユーザに対して本システムを用いた訓練を行い、学習効果を検証した。

迷路は5つの超立方体の部屋が一本道になるよう接続することで構成されている。ユーザは迷路の一端にあるスタート地点から操作を開始し、反対の端にあるゴールへの到達を目指す。

被験者は、4次元空間に関する専門知識のない18歳から22歳の大学生とした。10名の被験者について、先に3次元迷路を探索するグループ(Aグループ)と先に4次元迷路を探索するグループ(Bグループ)との5名ずつに分けた。最初に移動と操作に関する基本的な説明を行った。



(a) 元の投影図. (b) 断面表示.

図 6 断面表示による第4方向のずれの観察.

Aグループはまず3次元断面を表示した状態でゴールが可能な3次元構造の迷路を探索し、操作方法を学習した後、断面表示や応答制限を解除して4次元構造を持った迷路を探索した。Bグループは最初から制限を行わず4次元迷路を探索し、ある程度経過した後3次元の迷路の探索を行い、再び4次元に戻って探索を行った。時間はそれぞれの被験者の理解度に応じて決定し、状況に応じて断面表示の切り替え操作などについて追加の説明を行った。

Aグループは平均3分程度の操作で3次元迷路のゴールに到達できるようになり、4次元迷路も最初からある程度探索を行うことができた。Bグループで同程度に操作に慣れるには平均5分程度を要した。また、いずれのグループも、第4方向の観察や操作に関し、進みたい向きとずれていることが分からない、第4方向に操作を行えばいいということが分からないなど、困難を抱えていた。これはBグループの3次元迷路体験後もあまり解消されなかった。一方、断面表示の切り替えについて説明すると、一部の被験者は断面表示によって第4方向のずれを観察することで、探索効率が向上した(図6)。被験者は最終的に、最短5分程度、最長1時間程度で4次元迷路のゴールに到達できるようになった。

6 まとめ

既存の3次元空間操作システムを拡張した自然な4次元空間操作システムについて述べた。3次元の操作をそのまま4次元の操作に転用できるようにしたことで、4次元空間のインタラクションシステムの学習効率が向上した。

今後は、個人差等を含めた学習能力を定量的に検証すると共に、本システムで獲得した能力が他の4次元空間表現の理解に応用できるかどうかを検証する。

参考文献

- [1] Keigo Matsumoto, Nami Ogawa, Hiroyuki Inou, Shizuo Kaji, Yutaka Ishii, and Michitaka Hirose. Polyvision: 4d space manipulation through multiple projections. In *SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies*, SA '19, pp. 36–37, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [2] phi16. Inter-action on the math, 2020. Retrieved December 2022. https://vrchat.com/home/world/wrld_c937bde4-b585-4e6b-9623-d16525780287.
- [3] Haruo Igarashi and Hideyuki Sawada. Touching 4d objects with 3d tactile feedback. In *2021 14th International Conference on Human System Interaction (HSI)*, pp. 1–7, 2021.
- [4] John McIntosh. The four dimensional blocks, 2014. Retrieved December 2022. <https://www.urticator.net/blocks/>.