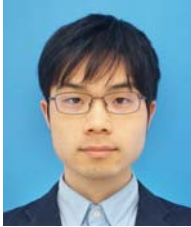


[研究助成 (C)]

高次元空間における力覚フィードバックを用いた インタラクションに関する研究

2237001



研究代表者

早稲田大学
大学院先進理工学研究科

博士後期課程

五十嵐 治 雄

[研究の目的]

近年、ビッグデータ及び人工知能の普及や測定技術の発展によって、高次元データが至るところに現れるようになった。こうしたデータは次元削減によって可視化されるが、次元削減はデータの欠落やブラックボックス化を伴う。そこで、高次元データをより直接的かつ直感的に提示し観察するためのシステムに関する研究が盛んに進められている。

高次元データを直接提示する標準的な方法が、幾何学的投影による可視化である。3次元空間の情報を2次元の写真や映像に投影するメカニズムを高次元に適用することで、高次元データを、その幾何学的特徴を維持したまま3次元や2次元の映像として可視化できる。こうした投影図に幾何学的回転を加え様々な方向から観察することで、観察者は高次元データの幾何学的特徴を把握することができる。

幾何学的投影による可視化が抱える課題の一つは、投影図を理解することの困難さである。高次元データに幾何学的回転が加わると、投影図は幾何学的投影が定める法則に従って、自然現象や他の可視化手法には見られない変形を見せる。こうした映像をユーザに理解させるために、これまでインタラクティブなインタフェース構築やVR技術の活用といったアプローチが試みられてきた。

本研究では、ユーザが高次元空間に定義されたデータ構造との接触を力覚によって知覚でき

るマルチモーダルインタラクションシステムを構築し、システムを用いた実験によって人の高次元空間認知能力を検証することを目的とする。人は3次元の物体に対して、触れたり掴んだりして物体の輪郭をなぞり、反力を力覚で知覚することで物体の形状を把握している。そこで本システムでは、左右の手に一つの4次元座標を制御させることで4次元の力覚フィードバックを実現し、4次元データに手で触れるかのようなインタラクションによって4次元形状を知覚することを可能にする。本研究の活用によって、高次元データを扱う様々な分野における研究の加速が期待される。

[研究の内容、成果]

1. システム概要

本システムの構成を図1に示す。ユーザはHMD (Meta Quest 2) を被り両手にハプティックインタフェース (Phantom Omni) のスタイラスを握って3次元VR空間に没入する。システムは4次元空間 (x, y, z, w) をシミュレートし、

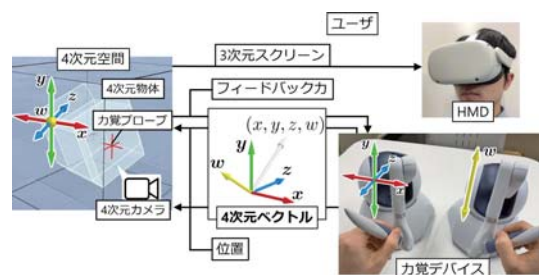


図1 システム構成

w 軸に沿った 3 次元空間 (x, y, z) への投影によって 4 次元空間を 3 次元スクリーンに描画する。ユーザが 4 次元空間の 3 次元投影を観察しながら左手のスタイラスを動かすと、4 次元空間内の力覚プローブが追従して 4 次元空間の (x, y, z) 部分空間を移動する。更に、ユーザが右手のスタイラスを上下に動かすと、プローブは投影によって隠れた w 軸方向へ移動する。プローブと 4 次元オブジェクトとの接触によって生じる 4 次元フィードバック力 (x, y, z, w) は、 x, y, z 成分と w 成分に分解されそれぞれ左右のスタイラスに反映される。このようにして、ユーザは両手のスタイラスによって 4 次元プローブを制御する。

2. 4 次元空間の表現と可視化

まず、4 次元空間をシミュレートし描画する方法について述べる。4 次元座標は、3 次元空間を 2 次元空間に投影する標準的な透視投影の手法とほとんど同じやり方で 3 次元座標に変換できる。4 次元空間に設定する視点座標系 $x_e y_e z_e w_e$ において視点 p_r から注視点 p_a の方向、距離 h の位置に 3 次元スクリーン座標系 $x_s y_s z_s w_s$ を定義すると、式 (1) により 4 次元ワールド座標系のデータ (x_w, y_w, z_w, w_w) を 3 次元スクリーン座標系のデータに変換することができる。

$$V_s = [X_s \ Y_s \ Z_s \ W_s \ v_s] \\ = [x_w \ y_w \ z_w \ w_w \ 1] T_v(p_f, p_a) T_p(k, h, f) \quad (1)$$

ここで、 $X_s = x_s v_s$, $Y_s = y_s v_s$, $Z_s = z_s v_s$, $W_s = w_s v_s$, $-1 \leq x_s, y_s, z_s \leq 1, 0 \leq w_s \leq 1$ であり、 T_v は 4 次元視野変換行列、 T_p は 4 次元透視変換行列である。

可視化対象となる高次元データの形式として、本システムでは 4 次元凸多胞体を扱う。多胞体は、2 次元の多角形、3 次元の多面体を任意の次元に一般化した概念である。図 2 に、それぞれの次元における多胞体の例を示す。可視化に



図 2 多胞体の例

おいては、多胞体の各頂点を投影によって 3 次元空間座標に変換し、頂点情報から多胞体の辺及び面を描画する。

3. 力覚フィードバック提示

次に、触覚プローブを介した力覚フィードバックを伴う 4 次元物体との接触インタラクション手法について述べる。触覚プローブの制御に用いる 4 次元座標は、2 本のスタイラスの座標 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)$ を統合した座標 (x_1, y_1, z_1, y_2) として得られる。接触インタラクションによって生成される 4 次元フィードバック力ベクトル (x, y, z, w) は、逆変換によって 2 本のスタイラスの反力 $(x, y, z), (0, w, 0)$ に反映される。接触インタラクションの制御アルゴリズムは、従来の 3 次元インタラクションによる手法を任意の次元に拡張し、4 次元インタラクションに適用したものである。

3.1. 概要

ユーザの触覚インタフェースによって制御される入力座標は、4 次元空間内の仮想カーソルの座標に反映され、これらの座標は触覚プローブによって追跡される。カーソルの座標を p_c 、プローブの座標を p_p とする。カーソルが 4 次元空間内の多胞体の表面を通過しようとする時、プローブの挙動は多胞体表面に拘束され、フィードバック力が $p_c - p_p$ として計算され、触覚インタフェースに提示される。

3.2. 点と多胞体の衝突検出

多胞体の胞集合を F とし、各胞 $f \in F$ に対応する法線と閾値をそれぞれ n_f, t_f とする。ここで、法線は多胞体の外側を向いている。空間内の任意の点 x について、点 x が胞 f と同じ側に

ある場合,

$$d_f(x) = n_f x - t_f \quad (2)$$

は負となる。したがって、最大値

$$d(x) = \max_{f \in F} d_f(x) \quad (3)$$

は、点 x が多胞体の内側にある場合のみ負となる。図 3 に 2 次元空間において点 x と三角形 $(n_1, t_1), (n_2, t_2), (n_3, t_3)$ の位置関係を、外側にある場合と内側にある場合計算する例を示す。 O は空間の原点で、 $d_1 = d_1(x), d_2 = d_2(x), d_3 = d_3(x)$ である。

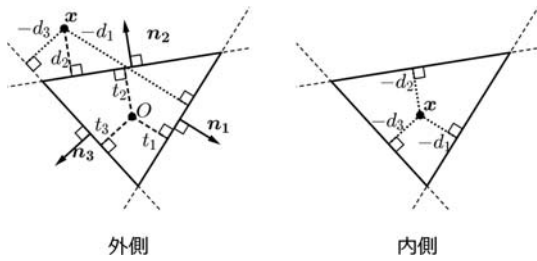


図 3 点と多胞体の衝突検出

3.3. 線分と多胞体の衝突検出

胞 f と、 $d(x) < 0 \wedge d(y) > 0$ となる 2 点 x, y に対して、胞 f を含む超平面が x と y を結ぶ線分と交差するとき、

$$s_f(x, y) = \frac{d_f(x)}{d_f(x) - d_f(y)} \quad (4)$$

は $0 < s_f(x, y) < 1$ を満たす。このとき、線分と超平面の交点は、

$$m(x, y, s_f) = s_f x + (1 - s_f) y \quad (5)$$

で与えられる。

線分全体が多胞体の外側にあるのは、ある胞 f が存在し、 $d_f(x) > 0 \wedge d_f(y) > 0$ を満たす場合である。そうでない場合、

$$H(x, y) = \{f \in F | d_f(x) < 0 \wedge d_f(y) > 0\} \quad (6)$$

とし、

$$l = \begin{cases} \max_{f \in H(y, x)} s_f(x, y), & \text{if } H(y, x) \neq \emptyset \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

$$r = \begin{cases} \min_{f \in H(x, y)} s_f(x, y), & \text{if } H(x, y) \neq \emptyset \\ 1, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

とすると、 $l = m(x, y, l)$ と $r = m(x, y, r)$ を結ぶ線分は、 $l < r$ ならば多胞体と交差する。

図 4 に、4 つの異なる位置関係のパターンを示す。

$l > r$ の場合、線分全体が多胞体の外側に位置する (ア)。 $l < r$ の場合、線分の一部が多胞体と交差しする (イ)。 y が多胞体の内側にある場合、 $r = 1$ であり、このとき r と y は一致する (ウ)。 x と y が両方とも多胞体の内側にあるとき、 $l = 0$ かつ $r = 1$ であり、線分全体が多胞体の内側に位置する (エ)。

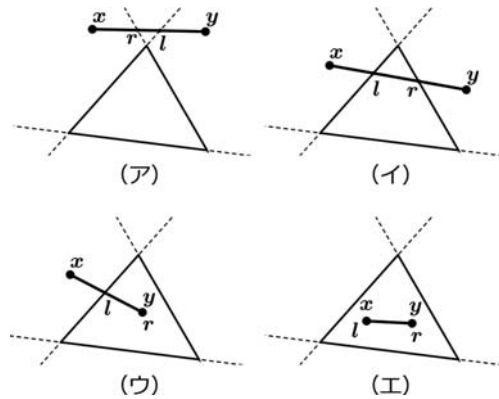


図 4 線分と多胞体の衝突検出

3.4. 拘束の解決

毎フレーム、ごとにプローブとカーソルを結ぶ線分と多胞体との間で衝突検出が行われる。衝突が発生した場合、プローブの新たな座標は衝突した胞のすぐ外側に設定される。衝突が発生しない場合は、カーソルの座標がプローブの新たな座標となる。衝突した胞の法線および閾値をそれぞれ n, t とすると、更新座標 p'_b は

$$p'_b = p_c - (n \cdot x - t + \epsilon) \cdot n \quad (7)$$

で得られる。

図 5 に、カーソルの移動によってプローブの

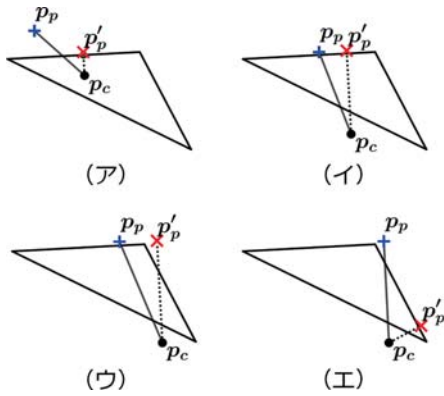


図5 拘束の解決

挙動が変化する一連の例を示す。(ア) カーソルが多胞体に入ると、プローブが胞に拘束され、フィードバック力が発生する。(イ) プローブが胞を離れない限り、フィードバック力は維持される。(ウ) プローブが胞から離れると、フィードバック力は変化する(エ)。

4. 評価

力覚フィードバックが物体の形状を適切に表現できるか、評価実験を通して検証する。

4.1. 手順

4次元空間やシステムに関する事前知識のない、21歳から24歳までの理系大学生10名の男性が本実験に参加した。被験者は4次元空間とシステムについて説明を受けた後、システムを用いて30分間、図6に示す6種類の正多胞体とのインタラクションを行い、それぞれの形状を把握した。この後、被験者はHMDを外し、

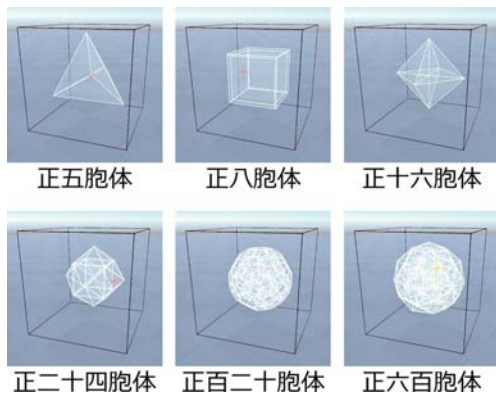


図6 6種類の正多胞体

視覚情報のない状態で、ランダムな姿勢で提示された多胞体とインタラクションし、その種類を識別した。提示は各被験者に対し30回ずつ行われ、6種類の多胞体がそれぞれ5回ずつ提示された。

4.2. 結果

各多胞体との接触によって生じるフィードバック力は力覚デバイスに正確に反映され、被験者は4次元多胞体との接触インタラクションを体験することができた。図7に実験結果を示す。すべての多胞体について、平均正解率は7割を超え、ランダムな確率を大きく上回った。

提示した多胞体	被験者の回答						正答率
	正五胞体	正八胞体	正十六胞体	正二十四胞体	正百二十胞体	正六百胞体	
正五胞体	45	2	3	0	0	0	90%
正八胞体	2	39	6	3	0	0	78%
正十六胞体	4	7	37	2	0	0	74%
正二十四胞体	0	2	4	43	1	0	86%
正百二十胞体	0	0	0	0	38	12	76%
正六百胞体	0	0	0	0	14	36	72%

図7 実験結果

正八胞体と正十六胞体の組と、正百二十胞体と正六百胞体の組については、互いに間違っ逆を答える回答が多かった。これらの組はそれぞれ双対の関係にあり、形状の複雑度が似通っており、それが混同の原因と考えられる。

被験者間では成績にある程度差異が見られた。10名中3名が全問正解だった一方、最も成績の低い被験者の正解率は53.3%であった。こうした差異は、類似の実験と同様、4次元空間に対する理解度の違いが影響する他、各被験者の触覚情報の感受性の違いなども関係すると考えられる。一方、全員がランダム以上の正解率を達成していた。

実験後のインタビューによれば、多くの被験者は、デバイスを操作して触れている胞が別の

ものに移ったときに感じるフィードバック力の方向の変化に注目し、その頻度から大まかな形状を判定していた。

また、被験者は、フィードバック力の方向が1点を指す箇所を多胞体の頂点と判断して、頂点の配置や数を調べた。ほとんどの被験者は、練習でもタスク中でも、正五胞体にある5つの頂点を確認できたと答えた。一部の被験者は正十六胞体の8つの頂点を確認したと答えたが、正八胞体やそれより複雑なオブジェクトの頂点を確認できたと答えた被験者はいなかった。

体験全体の感想について、実際にオブジェクトに触れている感覚があったかという質問には被験者の全員が肯定的な回答をした。一方、4次元空間の物体に触れていると感じたかについては、10名中2名が肯定的な回答をした。否定的な回答をした被験者の一部は、単に右手を動かすことで左手に力が加わるシステムと捉えていた。

4.3. 考察

実験結果の高い正解率は、被験者が接触インタラクションを通して4次元多胞体の形状を正しく認識できたことを示唆している。特に、一部の被験者が面や辺を辿ったと答えたことは重要である。辺や面はランダム回転によって xyz 空間にも w 軸上にもない斜め方向を向いているため、それらを辿るには左右の手でフィードバック力を感じながら力覚デバイスを同時に動かす必要がある。こうした操作を被験者がおこなったことは、彼らが4次元空間の探索を正しく身に付けることができたことを示唆している。こうした事実から、提案システムは4次元空間のオブジェクトとのハプティックインタラクションを想定通り実現していると結論付けられる。

一方で、正八胞体のような明確な構造を持つオブジェクトについても、タスクのランダムに回転されていた環境ではその全ての頂点を辿ることのできた被験者はいなかった。また、多胞体の胞の構造に関するコメントは被験者から挙

がらなかった。正多胞体は正多面体型の胞によって構成されており、正四面体以外の胞は対応する正多胞体を特定できる。一方で、胞は3次元構造をとるため、4次元空間をプローブの1点で探索しながらその構造を把握することは難しかったと考えられる。これらの限界の改善には、力覚デバイスの提示精度向上や接触点の増加が効果的と考えられる。

5. 結論

本研究では、力覚提示を用いて接触感覚を表現する4次元空間マルチモーダルインタラクションシステムを構築した。本システムでは、2台の力覚フィードバックデバイスと、高次元に拡張した衝突判定アルゴリズムによって、高次元物体との力フィードバックを伴う接触インタラクションを実現した。

評価実験では、短い実験時間にもかかわらず4次元物体との接触感覚を感じたという回答が見られ、本システムが人の4次元空間認知能力獲得に貢献する可能性が示唆された。一方、獲得された認知能力の形態に関するより詳細な分析には至らなかった。今後の研究では、システムの力覚提示精度を向上させるとともに、より多様な手法で4次元空間を表現するシステムを構築することで、人の高次元空間認知能力をより詳細に調査することを目指す。

[成果の発表、論文など]

- [1] H. Igarashi and H. Sawada, "4D Exploring System for Intuitive Understanding of 4D Space by Extending Familiar 3D Interfaces," Proc. of International Conference on Artificial Reality and Telexistence, Eurographics Symposium on Virtual Environments, pp. 115-119, 2023.
- [2] 五十嵐治雄, 澤田秀之: 力覚による接触感覚提示を伴う4次元空間インタラクションシステムの構築, 情報処理学会 第86回全国大会, Vol. 4, pp. 5-6, 2024.
- [3] Haruo Igarashi, Daiki Kido, Yutaka Ishii, Yasuhiro Niwa, Atsushi Okamoto, and Masao Kimura. Visualization of four-dimensional X-ray ab-

sorption fine structure data using a virtual reality system. Journal of Synchrotron Radiation, Vol. 32,

No. 1, pp. 162-170, Jan 2025.