



仮想空間における空間知覚の研究

—二種のディスプレイの比較と触覚フィードバックによる介入効果の検証—

Study of Spatial Perception in Virtual Space

-Comparison of the Two Types of Displays and Verification of Intervention Effect by Tactile Feedback-

岡田耕太郎¹⁾, 松居和寛¹⁾, 厚海慶太^{2) 1)}, 谷口和弘^{3) 1)}, 平井宏明¹⁾, 西川敦¹⁾

Kotaro OKADA, Kazuhiro MATSUI, Keita ATSUUMI,
Kazuhiro TANIGUCHI, Hiroaki HIRAI and Atsushi NISHIKAWA

1) 大阪大学 基礎工学研究科 (〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3, okada.kotaro@hmc.me.es.osaka-u.ac.jp)

2) 広島市立大学 情報科学研究科 (〒731-3194 広島市安佐南区大塚東 3-4-1)

3) 安田女子大学 家政学部造形デザイン学科 (〒731-0153 広島県広島市安佐南区安東 6-13-1)

概要: 近年、ディスプレイを介して仮想空間を閲覧し、作業を行うシステムは数多く開発されている。その際に用いられるディスプレイとしては一般的な平面ディスプレイの他、ヘッドマウントディスプレイなどの高度な三次元映像提示機器が挙げられる。本稿では一般的な平面ディスプレイと SONY 社の空間再現ディスプレイ (SR ディスプレイ) を用いることで、それぞれのディスプレイを用いた際の空間知覚の傾向の差異について検証した。また、SR ディスプレイ条件下では単純な触覚フィードバックが空間知覚においてノイズとして作用する可能性を示唆した。

キーワード: 仮想空間、空間知覚、触覚フィードバック、空間再現ディスプレイ

1. 緒言

近年の Computer Graphics 技術の進歩に伴い、ユーザに仮想空間を提示する技術は急速に発達している。ゲーム等のエンターテインメント用途から CAD 等の工業用途に至るまで、電子的に構築された空間を、画面を介して観察し、何らかのデバイスを通してその仮想空間に影響をおよぼすようなシステムはすでに多く存在している。それらの仮想空間は基本的にディスプレイを介して視覚情報としてユーザに知覚されるが、近年ではヘッドマウントディスプレイや、CAVE[1] や TWISTER[2] などの全周囲立体映像ディスプレイなど、高度な仮想空間提示技術が研究・開発されている。

このような仮想空間提示技術は高度な空間情報を提示できる一方、その機器の利用や開発にコストがかさむのが現状である。一般的な二次元ディスプレイを用いて仮想空間を提示するのが現在最も一般的な手法だろう。しかし、二次元ディスプレイは平面的な描画性能しか有しておらず三次元空間の表現に必要な奥行き情報の提示能力に乏しい。そこで、視覚情報以外の情報で奥行き情報を提示することで空間知覚を補完する手法の研究が進められてきた。旭らの研究では視覚情報に加え、聴覚情報の提示により、音の強弱が奥行き感覚の

補強に効果的であることを検証した [3]。

しかし奥行き情報の提示に頼るだけでは、二次元ディスプレイを介した仮想空間におけるタスク実行には不十分で、仮想空間において十全なタスク実行能力を有するためには平面、奥行きを含む仮想空間に適応する必要がある。

そこで、本研究では実空間と同期した仮想空間を構築し、それをディスプレイを介して閲覧しながら所定のタスクを実行することで仮想空間における空間知覚の傾向を調査した。我々の先行研究 [4][5] では二次元ディスプレイ状況下における空間知覚の傾向と、単純な触覚フィードバックを用いた際の空間知覚への介入効果を検証した。本稿では、ディスプレイ部を高度な三次元映像提示機器を用いて先行研究と同様の実験を行うことで、ディスプレイの差異による空間知覚の傾向と触覚フィードバックによる介入効果について検証する。

2. 方法

本研究で行うすべての対象者実験は、大阪大学大学院基礎工学研究科における人を対象とした研究に関する倫理委員会の承認 (R3-17-1) を得て行った。



図1 SR ディスプレイ [6]

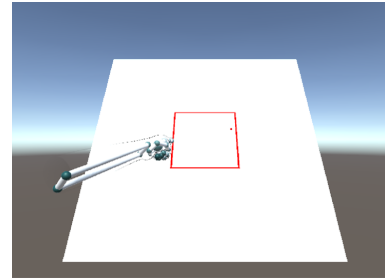


図3 実験に使用した仮想空間

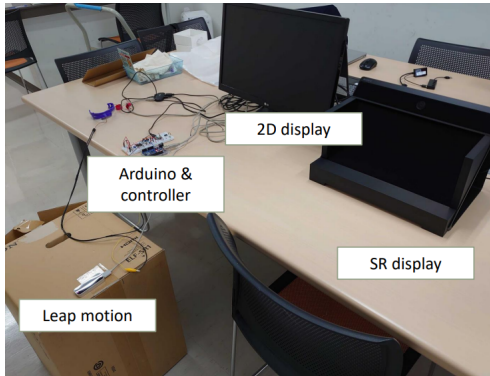


図2 実験環境

2.1 SR ディスプレイ

本研究では二次元ディスプレイと対照させる「高度な三次元映像提示機器」として SONY 社が開発した「空間再現ディスプレイ (Spatial Reality Display、以下 SR ディスプレイ)」(図1)を使用する。

SR ディスプレイとはその場に実物があるかのような立体的な空間映像を再現し、特別なメガネやヘッドセットなどを使わず裸眼で見ることができるディスプレイ [6] である。閲覧者はディスプレイ内部の長方形空間に、あたかもそこに物体があるかのような映像を見ることができる。

設置方法や閲覧者の姿勢などが二次元ディスプレイとほぼ変わることなく、高度な三次元映像を提示できるという点に着目し、本研究では SR ディスプレイを二次元ディスプレイと対照させるディスプレイとして用いる。

2.2 実験環境

図2に実験環境を示す。研究対象者は椅子に着座し、正面に設置されたディスプレイに投影される仮想空間を注視してタスクを実行する。タスクによって二次元ディスプレイと SR ディスプレイのいずれかを使用する。

本実験では実験対象者の指先位置を仮想空間内の手指モデルと同期させるため、手指の三次元位置を取得できるトラッキングセンサ (以下、センサ) である Leap Motion (Leap Motion 社) を用いて指先位置の計測を行う。

実験環境において、センサは研究対象者の左側の台上に設

置する。センサから取得した手指データに応じて正面ディスプレイに表示される仮想空間内に手のアバターを表示し、センサが置かれた台上の作業空間と仮想空間を同期させる。また、研究対象者から直接目視できない位置にセンサを設置することにより、実空間における指先位置を把握するための情報を研究対象者自身の体性感覚と正面ディスプレイの映像のみに限定させている。

本実験では奥行き感覚のフィードバックのため、指先に振動刺激を与える。触覚刺激装置として、リニア振動子を研究対象者の左手示指に固定する。仮想空間内のオブジェクトと手のモデルの位置関係に基づき、マイクロコンピュータ Arduino UNO で制御を行う。

仮想空間をゲームエンジン Unity (Unity Technology 社) を用いて構築し、上記のディスプレイ、センサ、マイコン、フィードバック装置を統合的に制御する。以上が本実験のシステムである。

2.3 実験内容

研究対象者には、ディスプレイを介して仮想空間に投影される奥行き情報を含んだ図形を指先で正確になぞるタスクを要求した。図3に示すように、仮想空間には正方形の壁面及び壁面上に描かれた正方形のマーカ、研究対象者の左手と同期された手指モデルが表示されている。

この壁面は鉛直方向中心部を軸として回転することでそれぞれ異なる奥行き情報を含んだオブジェクトとして機能する。壁面角度は基本的に 0[deg]、30[deg]、60[deg] の3条件を変化させて実験する。この3つの角度条件をまとめて標準角度条件と呼称する。

触覚フィードバックとして、壁面との接触判定を用いる。仮想空間内における左手示指の指先座標が壁面よりも奥側に侵入した際、指先に取り付けたりニア振動子を振動させることで壁面位置のフィードバックを行う。ここで、振動強度の変化は行わず一定のものとする。

触覚フィードバックによる空間知覚への介入の影響調査として、フィードバック条件の有無によるタスクの精度を比較

表 1 タスク種別

	Display	Feedback	Wall angle [deg]
Task A	2D	OFF	0, 30, 60
Task B	2D	ON	0, 30, 60
Task C	2D	OFF	0, 30, 60, 15, 45, 75
Task D	SR	OFF	0, 30, 60
Task E	SR	ON	0, 30, 60
Task F	SR	OFF	0, 30, 60, 15, 45, 75

する他、一度フィードバックあり条件下でタスクを実行した後に再度フィードバックなし条件下でタスクを実行することで、フィードバックによる介入前後のタスク精度を比較する。また、後者のパターンにおいては空間知覚への影響をより詳細に調べるため、フィードバックあり条件下では実施しなかった追加角度条件によるタスクを実行する。追加角度条件は壁面傾き角度を 15[deg]、45[deg]、75[deg] に変化させたものとする。

以上のタスクを、二次元ディスプレイと SR ディスプレイ二種のディスプレイを用いてそれぞれ実験する。これらのタスク種別を表 1 の通りとする。

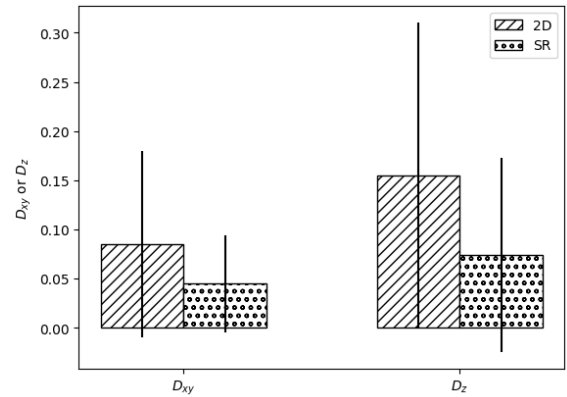
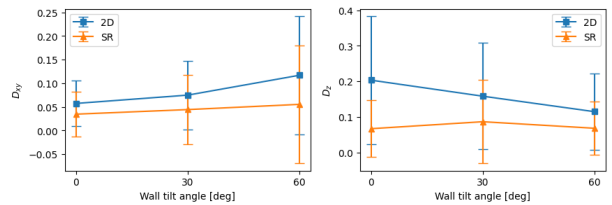
研究対象者は健常な成人男女 6 名、平均年齢は 23.3 歳、標準偏差は 1.86 歳であった。利き手は全員右手である。

実験時のなぞり動作開始位置は正方形左辺中央とし、各タスク実行前に指先位置と開始位置の距離を画面に表示し、それを 0 に近づけることで位置合わせを行った。研究対象者にはそれぞれのタスクについて、左手示指でマーカを 50 秒で 5 周なぞるよう要求した。また、Unity 側でタスク開始と同時に秒数をカウントする音声を再生することでなぞり速度を一定に保つよう調整した。

2.4 解析手法

なぞり動作の評価には図形からはみ出た距離を算出することにより、正確性を定量的に評価することができる [7]。

まず、赤外線センサからの計測データは赤外線センサ位置を原点としたデータになっているため、マーカ中央部を原点とし、正方形マーカが含まれる平面を xy 平面、正方形マーカ中心部を通り xy 平面に垂直な軸を z 軸として座標変換を行う。また、座標単位は Unity 内の独自単位になっているため、座標変換時に正方形マーカの一片の長さを基準として正規化を行う。こうして変形した計測データについて、式 (1)~(4) に基づき正方形マーカのなぞり精度誤差指標 $D_{xy}(n)$ と奥行き知覚の誤差指標 $D_z(n)$ を算出する。ここで n はステップ数、 x_n, y_n, z_n は各ステップにおける座標データであ

図 4 ディスプレイごとの D_{xy} 及び D_z (平均と標準偏差)図 5 角度条件ごとの D_{xy} 及び D_z (平均と標準偏差)

り、 $D_{xy}(n), D_z(n)$ もステップ毎に算出される (以下、特に必要ない限り $D_{xy}(n), D_z(n)$ を D_{xy}, D_z と表記する)。つまり、各タスクにおけるそれぞれの誤差指標の平均値、 $\overline{D_{xy}}$ は平面知覚能力の指標値、 $\overline{D_z}$ は奥行き知覚能力の指標値であるといえる。

$$D_{xy}(n) = \left| \sqrt{x_n^2 + y_n^2} - r_{\theta_n} \right| \quad (1)$$

$$D_z(n) = |z_n| \quad (2)$$

$$\theta_n = \cos^{-1} \frac{x_n}{\sqrt{x_n^2 + y_n^2}} \quad (3)$$

$$r_{\theta_n} = \begin{cases} \left| \frac{1}{2 \cos \theta_n} \right| & (0 \leq \theta_n < \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4} \leq \theta_n \leq \pi) \\ \frac{1}{2 \sin \theta_n} & (\frac{\pi}{4} \leq \theta_n < \frac{3\pi}{4}) \end{cases} \quad (4)$$

3. 結果と考察

3.1 2D ディスプレイと SR ディスプレイの大きな性能差について

すべてのタスク試行について、ディスプレイ条件ごとに D_{xy} 及び D_z をまとめたグラフを図 4 に示す。ディスプレイ条件の群間について、Welch の t 検定 (有意水準 0.05) を用いて有意差を調べたところ、共に $p < 0.05$ となり有意差が示されている。このグラフから、SR ディスプレイを用いると、 D_{xy}, D_z 共に二次元ディスプレイに比べて平均的に 2 倍程度性能が向上することが読み取れる。

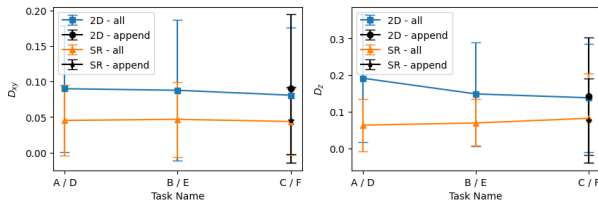


図6 タスク種別ごとの D_{xy} 及び D_z (平均と標準偏差)

3.2 各角度条件間の関係について

実験結果について、ディスプレイ条件ごとに、各角度条件でまとめた D_{xy} 及び D_z を図5に示す。二次元ディスプレイ条件下において、傾き角度が増加するにつれ D_{xy} は増加し、 D_z が減少することは先行研究 [4] で示したとおりである。しかし、SR ディスプレイ条件下においては、特に D_z に関して傾向が異なり、壁面傾き角度が 30[deg] の条件において D_z が最も小さくなる、つまり奥行き知覚能力が最も小さくなるという結果となっている。この原因として SR ディスプレイを見る角度が挙げられる。図2を見ればわかるように、本実験環境では 2D ディスプレイより SR ディスプレイのほうがやや低い位置に設置されている。そのため、SR ディスプレイを見る際、やや見下ろすような角度で見ることとなる。SR ディスプレイでは投影物体を三次元的に見ることができるため、30[deg] の際、目線に対して壁面が垂直に提示されてしまい、二次元ディスプレイにおける壁面傾き角度 0[deg] の時と同様、奥行き知覚が困難になってしまったと考えられる。

3.3 触覚提示の介入効果について

続いて、ディスプレイ条件ごとに各タスク種別でまとめた $\overline{D_{xy}}$ 及び $\overline{D_z}$ を図6に示す。図からは SR ディスプレイ条件下においては、触覚フィードバックのようなフィードバックを用いると平面知覚能力・奥行き知覚能力ともに精度が低下することが示されている。これは、SR ディスプレイそのものの空間表現能力の高さに起因すると考えられる。SR ディスプレイは空間を三次元的に再現するため、空間知覚という観点からすると非常に直感的な出力媒体である。そもそも、二次元ディスプレイ条件下において本実験で用いたような単機能・低情報量なフィードバックが効果を発揮したのは、三次元の作業空間の情報量が二次元ディスプレイを介することによって削減されてしまい、二次元ディスプレイのみでは空間知覚に不十分だったからだと考えられる。しかし、三次元の作業空間をそのまま三次元として出力する SR ディスプレイであれば、むしろ単機能・低情報量な本実験系のフィード

バックは空間知覚において混乱を招くエラーとして機能するのではないだろうか。本実験系の触覚フィードバックは $\overline{D_z}$ のみに作用するため、図6から $\overline{D_{xy}}$ では性能低下を招いていないことが確認できることも、本考察を裏付けている。

4. 結言

本稿では、実空間と連動した仮想空間内での作業を、二次元ディスプレイと SR ディスプレイのそれぞれを介して行うことで各ディスプレイを介した際の空間知覚の特性の差異について検証した。また、高度な三次元映像提示機器を用いた際には本実験系で用いたようなフィードバックは誤差として作用する可能性があることを示唆した。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP20K14693 の助成を受けた。

参考文献

- [1] C. Cruz-Neira, D. Sandin, et al. : Surround-screen Projection-based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE; Proc. of ACM SIGGRAPH '93, 135-142, 1993.
- [2] S. Tachi: TWISTER: Immersive Omnidirectional Autostereoscopic 3D Booth for Mutual Telexistence; Proc. of ASIAGRAPH, 1-6, 2007.
- [3] 旭, 伊藤, ほか : タブレット端末における視覚情報と聴覚情報の奥行き知覚増幅法; 芸術科学学会論文誌, Vol. 13, No. 1, 34-44, 2014.
- [4] 岡田, 松居, ほか : ディスプレイを介した仮想空間における空間知覚の研究—触覚フィードバックによる空間知覚への介入効果の検証—, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2023.
- [5] 奥野, 松居, ほか : 二次元視覚情報下でのヒトの奥行き知覚能力の分析と触覚フィードバックの意義; 第 39 回日本ロボット学会学術講演会抄録集, 2021.
- [6] Sony, "Spatial Reality Display Developer Guide", 空間再現ディスプレイ デベロッパーサイト, <https://www.sony.net/Products/Developer-Spatial-Reality-display/jp/develop/Overview.html>, (最終閲覧日: 2023-07-14) .
- [7] 池田, 中島, ほか : 描画特徴と運筆動作の発達の傾向, 日本発達系作業療法学会誌, Vol. 4, No. 1, 39-47, 2016.