



ドリル特急 ～ブラジル行き～

Drill Express Bound for Brazil

太田光¹⁾, 田中春希¹⁾, 影山さくら¹⁾, 和田 裕介¹⁾

染谷明花音¹⁾, 高橋佑奈¹⁾, 藤原花央¹⁾

Hikaru Ohta, Haruki Tanaka, Sakura Kageyama and Yusuke Wada,
Akane Someya, Yuuna Takahashi, Kao Fujiwara

1) 青山学院大学 理工学部 情報テクノロジー学科

(〒252-5258 神奈川県相模原市中央区淵野辺 5-10-1, ohta.hikaru@x-lab.team)

概要: 本企画では、視覚・聴覚・触覚を統合したマルチモーダル感覚提示により、身体が静止しているにもかかわらず、「自分自身が回転している」感覚を誘発する体験を提供する。本企画では、頭部の周囲を回転する専用の回転デバイスを実装し、光・音・風覚・振動を回転方向や速度に応じて提示することで、自己回転感覚の生起を図る。提案する装置を用いた体験として、本企画では体験者が自ら高速で回転することで地中を掘り進め、地球の反対側へ到達する体験「ドリル特急」を実装し、体験者が高速で回転しながら移動するように感じる、新たな身体錯覚体験を提供する。

キーワード: 自己回転感覚, マルチモーダル, 身体錯覚

1. はじめに

人は「回る」ことが好きである。子どもの頃にその場で回り続けたり、回転椅子に乗って回ったり、遊園地のコーヒーカップに惹かれたりするように、回転には人を引き付ける独特の魅力がある。また、回転はダンスやフィギュアスケートのスピンのように、身体表現としても広く親しまれてきた。これらの例は、回転が高度な身体技能として見るものを魅了し、巧みに身体を操る感覚への憧れや、自らも体験してみたいという欲求を喚起する根源的な魅力があることがうかがえる。本企画ではこのような「回転」感覚を体験できるコンテンツを実現する。

実際に人間を回転させる体験を実現するには、大きなトルクを出力する機械的機構や安全対策が必要となり、身体的負荷や危険性も伴う。しかし、人は実際には身体が動いていない場合でも、周囲の視覚情報や感覚刺激によって、自分自身が移動・回転しているように感じることもある。このような自己運動感覚はベクションと呼ばれ、VR や没入型体験の分野において広く研究されている。Dichgans and Brandt は、広視野の視覚刺激によって強いベクションを誘発することを示しており、特に視界全体を流れる視覚刺激が強いベクションを生起させることを報告している[1]。さらに、Riecke et al. は、視覚だけでなく聴覚や触覚などを組み合わせたマルチモーダル感覚提示によって、自己運動感覚をさらに増強することを報告している[2]。しかし、これらを回転感覚の表現に利用した



図 1: 体験の概略図

例は少ない。回転時には視界が流れるだけでなく、相手の声の聞こえ方が変化し、さらに風圧や振動などの触覚刺激も身体に加わる。そのため、マルチモーダルな情報提示は回転感覚の生起を促す手段となりえる。

そこで本企画では、実際の身体運動を伴わずに、視覚・聴覚・触覚を組み合わせたマルチモーダル感覚提示によって、「自分自身が高速で回転している」ような感覚を体験できるシステムを提案する。回転方向や速度に応じた複数の感覚刺激を統合的に提示することで、現実では困難な高速回転体験を実現することを目的とする。図 1 に体験の概略図を示す。



図 2: システムの概略図

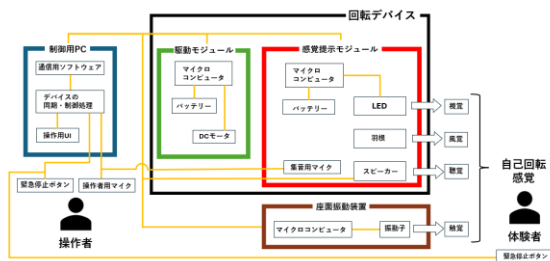


図 3: システムの構成図

2. システム構成

本企画では、体験者の頭部周囲で水平方向に回転するデバイスを用いて、視覚・聴覚・触覚を統合したマルチモーダル感覚提示によって回転感覚を生起する。体験者は椅子に着席し、円柱型の回転デバイスを被る。回転デバイスは体験者の頭部を中心に回転し、内部の LED やスピーカーを使用した感覚刺激を回転方向および速度に応じて提示することで、身体が静止している状態での自己回転感覚の生起を目指す。

2.1 システム構成

図2にシステムの概略図、図3にシステムの構成図を示す。本システムは、「回転デバイス」「振動装置」「制御用PC」で構成する。回転デバイスは体験者の頭部周囲を水平方向に回転し、視覚・聴覚・触覚刺激を提示することで自己回転感覚を誘発する。振動装置は身体へ振動刺激を提示し、コンテンツ内でドリルによる掘削時の機械的な駆動感を強調する。制御用PCは回転デバイスおよび振動装置を統合的に制御する。また、安全装置は体験者の姿勢保持や回転部との接触防止を目的として設置し、体験中の安全性を確保する。

2.2 回転デバイス

回転デバイスは、視覚提示用の LED、聴覚提示用のスピーカー、および触覚提示用の風覚提示装置で構成する。図4に回転デバイスを上面から見た図を示す。

回転デバイスは、駆動モジュールと感覚提示モジュール

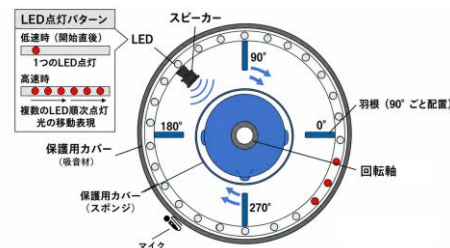


図 4: 回転デバイスの概略図 (上面図)

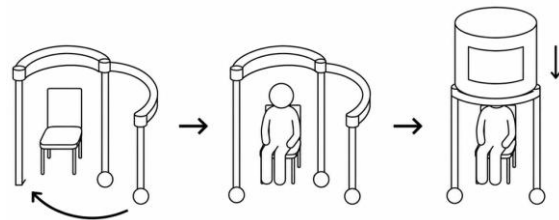


図 5: 回転デバイスサポーターのイメージ図

ルならびに、デバイスを支えるサポーターによって構成する。各モジュールには無線通信機能を搭載したマイコンを有しており、制御用PCから無線で制御できる。

駆動モジュールはマイコン、DCモーター、バッテリーを実装し、制御用PCからの指令によって回転速度を制御することで加減速を表現する。

回転デバイスの下には、その重量を支えるため、下から支えるサポーターを設置する。図5に回転デバイスサポーターのイメージを示す。

感覚提示モジュールには視覚提示のための LED、風覚提示のためのファン、スピーカーを搭載している。視覚提示には複数の LED を用いる。回転開始直後は 1 つの LED のみを点灯させ、回転速度の上昇に伴って複数の LED を順次点灯させる。これにより、光が移動しているような視覚表現を生成し、回転速度の増加を知覚しやすくする。聴覚提示には 1 基のスピーカーを用いる。回転動作に合わせて音の定位や音量変化を制御することで、音源が体験者の周囲を移動しているような聴覚刺激を提示する。これにより、視覚刺激だけでは不足しやすい空間的な移動感覚や回転方向の知覚を補完し、自己回転感覚の増強を目指す。触覚提示には羽根を用いる。風を発生させる羽根を 90 度間隔で配置し、回転方向に応じて順次刺激を提示することで、身体周囲を風刺激が移動しているような感覚を生成する。これにより、身体の周囲を回転刺激が巡る感覚を提示し、回転運動に伴う身体感覚の再現を目指す。

2.3 振動装置

内部に複数の振動子を組み込んだ座面振動装置を用いる。本装置は、特に回転デバイスを使ったコンテンツ「ドリル特急」において、地面を掘削しながら進行する身体感覚を提示するために用いる。回転デバイスによる視覚提示と同期して自分がドリルになって回転しながら進んでいく感覚を提供する。本企画における振動提示装置は、開発コンテンツにおける体験を拡張するための補助的な

要素として位置づけるが、座面からの振動感覚の提示が回転感覚へ影響を与える可能性が考えられる。そのため、制作期間の中では、回転感覚の増強や制御に座面からの提示が利用できる可能性についても検討する。

2.4 実装上の安全対策

本企画では、頭部周囲でデバイスが回転する構造を用いて、体験者に回転しているような錯覚を提示する。そのため、回転部への接触による衝突や巻き込みの危険性が存在する。特に、暗所環境および回転感覚の提示によって、体験者は周囲との位置関係を把握しづらくなる可能性があるため、体験者および操作者双方に対する安全対策を講じる。

実装上の対策として、回転デバイスに保護用カバーを設置し、体験者および操作者が直接回転部へ接触できない構造とする。さらに、頭部周囲には頭部保護カバーを配置し、体験者の頭部が回転機構へ接近することを防ぐ。また、体験中に不快感や酔いなどが生じた場合に備え、体験中には体験者が操作を停止できるボタンを所持する。これにより、体験者の状態変化に応じてシステムを停止できるようにする。加えて、長時間の連続動作による身体的負荷や機構トラブルを防止するため、2分経過で自動停止する設定を実装する。これにより、体験時間を一定範囲内に制限し、安全性の向上を図る。

3. 体験内容

本企画では、体験者自身が「人間ドリル」となって日本の地殻から地球の反対側へと地中を掘り進むという設定のもと、「自己回転感覚」を味わう体験を提供する。

3.1 体験の流れ

体験開始前に、体験者は椅子に座り、周囲の回転デバイスサポーターを固定する。頭部カバーを装着し、足が浮いた状態で胸の前で両腕を交差する体勢を取る。また、頭部周囲を回転デバイスで覆うことで外界の情報を遮断する。「いってらっしゃい」の音声を合図に回転デバイスが動作を開始する。

体験中は、振動、風、回転する光の映像を組み合わせることで、静止しているにもかかわらず高速回転している感覚を誘発する。また、途中でスタッフによる安全確認を実施し、その音声を回転位置に合わせて提示することで、状態確認と聴覚的な回転感の演出を両立する。さらに、日本の地殻からマントルへ進む過程を表現するため、地層の変化に応じて振動パターンを変化させ、「人間ドリル」として掘り進む感覚を強調する。

最終的に地球の反対側へ到達すると、掘削音と回転感が徐々に収まり、デバイスを停止する。環境音の変化を提示し、体験を終了する。

3.2 安全性への配慮

本企画では、2.4 節に示す実装上の安全対策に加え、実施時の対策によって安全性に配慮する。本企画では、自己



図 6: 予備実験の概要図

回転感覚を誘発する内容であることから、回転感覚による酔いが発生する可能性がある点を伝え、同意をいただいたうえで参加いただく。体験中はスタッフが定期的に声掛けを実施することで体験者の体調を確認し、異常が見られた場合や本人からの申告があった場合には速やかに体験を中断する。

4. 予備実験

本企画では、自己回転感覚をより強く誘発するためのシステム条件を検討するため、聴覚刺激および体験者の体勢に関する 2 種類の予備実験を実施した。これらの実験を通して、自己回転感覚の誘発に適した条件を調査し、その結果に基づいて回転デバイスの設計を検討した。

予備実験における、HMD による刺激提示の基本構成を図 6 に示す。(a)は実験参加者の視点であり暗闇の中で光源が水平方向に移動する視覚刺激を与えている。(b)は実験環境の俯瞰図であり、実験参加者の周囲を光源および音源が同期して回転する仕組みを表している。この環境をベースとして、以下の 2 項目を検証した。

4.1 聴覚刺激

聴覚空間に関する研究では、左右の音量差やその時間変化が音源運動知覚に寄与することが知られている[3]。このことから、聴覚刺激が自己回転感覚に与える影響を検証した。実験参加者 8 名（男性 7 名：女性 1 名）を対象に

- 無刺激条件
- 固定刺激条件
- 移動刺激条件
- 強調刺激条件

の 4 条件を設定した。「無刺激条件」は視覚刺激のみの条件、「固定刺激条件」は音源の位置を固定した条件、「移動刺激条件」は光源の移動に合わせて音源位置が移動する条件、「強調刺激条件」は音源位置の移動に対応して、音量の減衰・増幅を再現した条件である。どの条件も、実験参加者が楽な姿勢で行い、音源を用いた条件は、聴覚刺激として 750Hz の連続音を 10 秒間提示した。移動刺激条件および強調刺激条件では、音源を光源の回転に同期して移動させた上で、左右方向と前後方向の音圧バランスを変更した。具体的には、移動刺激条件では前後方向に対する左右方向の音圧比を 1:1 で提示し、強調刺激条件では前後方向に対する左右方向の音圧比を 2:1 以上で提示することで前後方向の成分を減衰させ、前後定位の手が

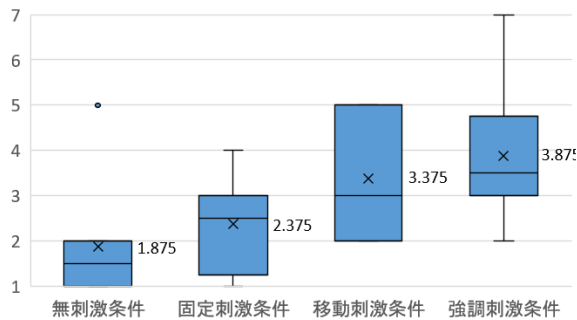


図 7: 体験中の音に関する実験の結果

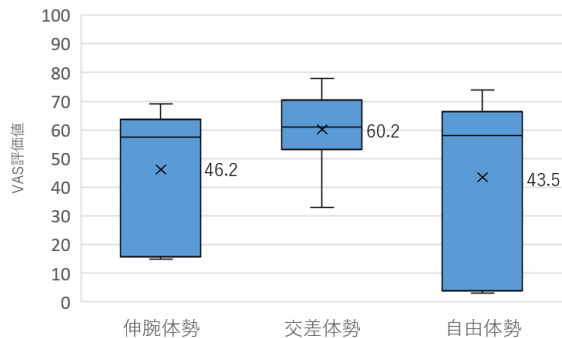


図 8: 体験者の体勢に関する実験の結果

かりを弱め、左右方向の動的変化を相対的に強調した。

実験後、「まるで自分が回転しているように感じたか」という質問に対して 1 を「全くそう思わない」、7 を「非常にそう思う」とする 7 段階リッカート尺度で評価した。図 7 に実験結果を示す。

アンケート結果の平均値は順に 1.88, 2.38, 3.38, 3.88 となり、音源の移動を強調した聴覚刺激が最も高い値を示した。この結果から、単に音を付加するだけではなく、視覚刺激と同期した音源の空間移動を強調することが自己回転感覚の増強に有効であることが示されたため、本システムでは空間移動を強調した聴覚刺激を採用する。本予備実験の結果は、聴覚刺激ならびに聴覚刺激の特徴が自己回転感覚に影響する可能性や、マルチモーダルな感覚提示が回転感の誘発に有効である可能性を示している。一方で、最も効果が高かった条件においても、評価の平均値は中間の 4 に満たず、視聴覚刺激のみによる自己回転感覚の誘発効果は限定的である可能性が考えられる。このため、今後の開発期間の中では、回転誘発に適した視聴覚刺激の設計を検討していくほか、体験者の身体に対して牽引力を提示する等、回転感覚をさらに増強する手法について検討していく。

4.2 体験者の体勢

前述の牽引力を安定的かつ安全に提示するためには、体験中の姿勢をあらかじめ統一しておく必要がある。さらに、体勢自体が自己回転感覚の知覚に影響を与える可

表 1: 製作スケジュール

7 月上旬	安全装置, 振動装置製作
7 月下旬	システム統合テスト デバイス耐久試験
8 月上旬	試験結果を踏まえたシステム改良 体験テスト
8 月下旬	フィードバックを踏まえたシステム改良
9 月 6~9 日	体験展示審査会

能性も考えられる。そこで、本企画に最も適した姿勢を決定するため実験参加者 6 名（男性：6 名）を対象に、

- 伸腕体勢
- 交差体勢
- 自由体勢

の 3 条件を設定し、実験した。「伸腕体勢」は両腕を広げて T 字になるような体勢、「交差体勢」は両腕を胸の前で交差させた体勢、「自由体勢」は実験参加者にとって楽な姿勢である。4.1 節の結果を基にして、強調刺激条件と同じ条件で実験した。体験後の自己回転感覚について、画面上に提示した目盛りのない連続的なスライダー（101 段階）を用いた VAS 法を使用して評価した。スライダーの左端を「全く回転していると感じなかった」、右端を「非常に強く回転していると感じた」と定義した。図 8 に実験結果を示す。

その結果、回転感の平均値は伸腕体勢で 46.2 (SD=24.1)、交差体勢で 60.2 (SD=15.0)、自由体勢で 43.5 (SD=31.7) となり、交差体勢が最も高い値を示した。また、標準偏差も最も小さく、より安定して回転感を誘発する傾向を確認したため、本企画では交差体勢を採用した。

以上の予備実験の結果を踏まえ、本企画では、体験時には両腕を胸の前で交差させる体勢を取るとともに、聴覚には空間的な移動感を強調した音響を提示する。

5. スケジュール

表 1 にシステムの製作スケジュールを示す。

参考文献

- [1] Dichgans, J., Brandt, T.: Visual-Vestibular Interaction: Effects on Self-Motion Perception and Postural Control, Handbook of Sensory Physiology, Vol.8, pp.1–26, 1978. https://doi.org/10.1007/978-3-642-46354-9_25Riecke,
- [2] Riecke, B.E., et al.:Beyond the Eye: Multisensory Contributions to the Sensation of Illusory Self-Motion (Vection), Multisensory Research, Vol.36, No.8, pp.827–864, 2023.<https://doi.org/10.1163/22134808-bja10112>
- [3] Pöntynen, Henri, and Nelli H. Salminen. “Resolving front-back ambiguity with head rotation: The role of Level Dynamics.” *Hearing Research*, vol. 377, pp 196-207, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2019.03.020>