



立位 VR で足底面傾斜角度が視覚と異なる際の傾斜知覚

Tilt perception when plantar and visual inclination angles differ in standing VR

船引應佑¹⁾, 柳田康幸²⁾

Osuke FUNABIKI, and Yasuyuki YANAGIDA

1) 名城大学 大学院理工学研究科 (〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口 1-501, 243426031@ccmailg.meijo-u.ac.jp)

2) 名城大学 情報工学部 (〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口 1-501, yanagida@meijo-u.ac.jp)

概要: 立位での VR 環境において, 視覚および足底面へ同時に傾斜刺激を与えた際の傾斜知覚について調査を行った. 視覚傾斜に対して角度の異なる足底面傾斜を段階的に提示し, 主観的等価点を観察した. 結果として, 視覚刺激が水平から 3° まで傾斜する場合と, 3° から水平まで戻る場合について, 視覚提示した傾斜に近い足底面傾斜で主観的に等価であると知覚されることが観察された. また, 恒常法を用いたパイロットスタディでは足底面傾斜量を過大評価する傾向がみられたが, 極限法を用いた本研究ではその傾向は見られず, 実験参加者の傾斜に対する予測可能性が知覚を変化させることが示唆された.

キーワード: 傾斜知覚, 体性感覚, 足底

1. はじめに

VR インタクション体験において, 適切な刺激提示を行うことは体験への没入感を向上させる重要な要素である. 我々は視覚および足底面への傾斜を伴う VR インタクション作品として「めい迷路ろ」を制作した[1]. 視覚的に提示される巨大迷路の傾斜が足底面にも提示される体験であるが, 視覚提示するロール/ピッチ傾斜角度が $\pm 20^{\circ}$ であるのに対し, 足底面傾斜は安全性を確保するため $\pm 5^{\circ}$ 程度で設計した. このように各刺激に不一致があったにもかかわらず, 体験者からは両者の不一致が妨げにならなかったとの報告が得られた. そこで我々は, 視覚および足底面の傾斜量の不一致に着目して傾斜知覚の調査を行った. 過去に行ったパイロットスタディ[2]では, 立位 VR 没入環境において, 視覚刺激に対して足底面刺激が異なる際の傾斜知覚を恒常法により調査した. 結果として, 視覚刺激よりも少ない傾斜量の足底面刺激でそれらを主観的に等価であると知覚することを観察した. このようにパイロットスタディでは大まかな傾向を観察できた一方で, 十分なデータ採取ができなかった. 具体的には, 恒常法による提示を行ったが, 実験所要時間および実験参加者への疲労を考慮し, 1 水準あたり 1 試行ずつしか行わなかった. そのため全実験参加者の回答の平均をとることでしか主観的等価点 (PSE), 弁別閾 (JND) の算出ができず, 個人差の指標も含まれていなかった. したがって本研究では視覚とは異なる足底面の傾斜について, 各実験参加者ご

とに PSE および JND を検出し, より詳細な議論を行う.

2. 関連研究

立位における傾斜知覚では, 下半身の関節動作の寄与が考えられる. 足首, 膝関節, 股関節が回転に対してどれだけの知覚閾値を持つか調査した研究[3]では, いずれかの関節のみに回転が加わるようにプラットフォーム上に姿勢をとり, 回転していることが分かった時点で申告するタスクを行った. 関節によって検出能力に有意な差はなく, ピッチ方向よりもロール方向の回転のほうが知覚が鋭いことが観察された. また, 前庭知覚および体性感覚の傾斜知覚の観察として, 立位と座位におけるロール傾斜の記憶とその角度の再現タスクについて調査されている[4]. この研究では, 5° 傾斜状態から 0° に戻すタスクと, 5° の傾斜を記憶して 0° の状態から再現するタスクを行った. 結果としていずれの条件でも自身が再現した傾斜角度を過大評価する傾向がみられ, 目標角度よりも小さな値で等価であると知覚されることが示されている. さらに視覚情報が傾斜知覚に与える影響について, 提示画像を回転させて提示した際の主観的視覚垂直を回答させる研究[5]では, 画像の傾斜方向に知覚が偏ることが確認された. 実験参加者は身体をロール左方向へ 15° 傾けるまたは直立の状態で, 身体に対して時計回り -30° から 45° 傾いた画像を見て, 主観的な重力方向を答えた. これにより, 傾いた画像が示す下向きの方に主観的な重力方向が近づくことが観察

され、身体が傾いている状態でより顕著になった。

このように、すでに傾斜した状態における矛盾した視覚刺激の提示や、足底面傾斜の再現タスクに関する研究は行われている。一方で視覚および足底面に生じた傾斜に対して、視覚の傾斜量が足底面に再現されているか、差異があるのか、ということについて検討したものはあまり見られなかった。この観点は VR 環境で傾斜提示を行う際に、どれだけ正確に提示する必要があるかという指標として意義があると考えられる。

3. 実験

3.1 実験概要

本実験では視覚と足底面に傾斜刺激を与え、その知覚に関して回答を得る。実験参加者は HMD を装着し、足底面を傾斜させるための実験装置に立位する。HMD で傾斜する面の映像を提示し、これと同時に傾斜装置も同一方向へ傾斜させる。実験において視覚刺激を標準刺激、足底面への刺激を比較刺激とする。各試行ごとに足底面の傾斜量を変化させ、視覚と比較した足底面の刺激量の大きさを回答とする。以下に実験についての詳細を述べる。

3.2 提示刺激

実験において視覚および足底面が、水平状態から右方に傾斜する様子を図 1, 2 に示す。

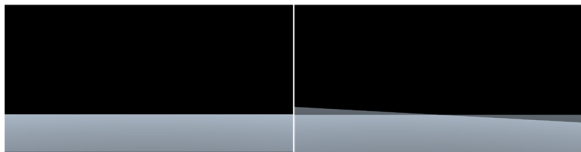


図 1: 視覚刺激の様子 左) 水平, 右) 右方傾斜

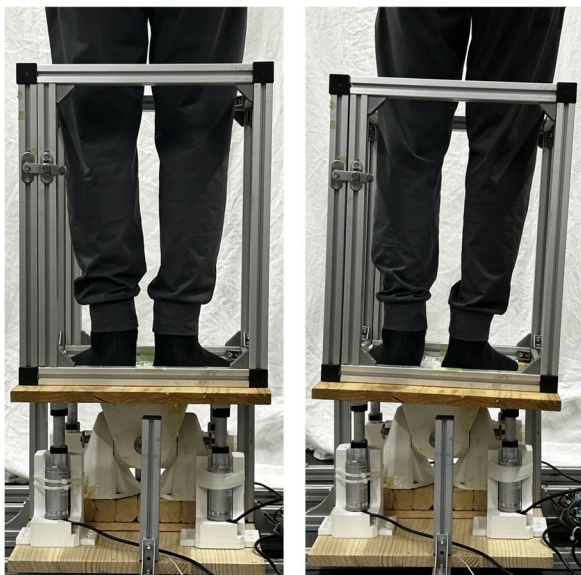


図 2: 足底面刺激の様子 左) 水平, 右) 右方傾斜

視覚刺激では基準となる水平面と、傾斜面が表示されている。水平面は実験中動かず常に水平を表示し続け、傾斜面が実験参加者の立位する点を中心として回転する。この

視覚刺激と同時に足底面にも刺激が提示される。実験においてそれぞれの刺激は 1 秒間で目標角度まで到達する。

3.3 実験 1

視覚および足底面の傾斜はいずれも水平状態から開始し、それぞれを同時に同一方向へ傾斜させた。傾斜方向は前方、後方、右方の 3 方向について行った。左方については、パイロットスタディによって左右方向傾斜の知覚に対称性が推測できたため本実験では行わない。標準刺激である視覚は各試行で 3° まで傾斜させ、比較刺激の足底面傾斜は $1^\circ, 1.5^\circ, 2^\circ, 2.5^\circ, 3^\circ, 3.5^\circ, 4^\circ, 4.5^\circ, 5^\circ$ の 9 水準を用いて提示した。測定方法には極限法を用いた。足底面刺激について、上昇系列では 1° 、下降系列では 5° を開始点として、前述した水準の通り 0.5° ずつ刺激量を変化させた。1 傾斜方向について上昇および下降系列を 1 回ずつ行ったら、次の傾斜方向へ移行した。回答方法は標準刺激である視覚傾斜に対して、比較刺激の足底面傾斜の傾斜量が「大きい」、「等しいまたはわからない」、「小さい」の 3 件法とした。例えば 4.5° の足底面傾斜を提示した際に、実験参加者が視覚提示の 3° より傾斜量が大きいことを判別できれば「大きい」という回答になる。

3.4 実験 2

視覚および足底面の傾斜はいずれも 3° 傾斜した状態から開始し、それぞれを同時に水平方向へ傾斜させた。傾斜方向は実験 1 同様に、前方、後方、右方の 3 方向について行った。この際、前方であれば 3° 前傾した状態から開始し、水平をまたいで後ろ方向傾斜の符号を負とした。標準刺激である視覚は各試行で水平まで傾斜させ、比較刺激の足底面傾斜は $2^\circ, 1.5^\circ, 1^\circ, 0.5^\circ, 0^\circ, -0.5^\circ, -1^\circ, -1.5^\circ, -2^\circ$ の 9 水準を用いて提示した。実験 1 同様に極限法を用い、上昇系列では 2° 、下降系列では -2° を開始点として、 0.5° ずつ刺激量を変化させた。1 傾斜方向について上昇および下降系列を 1 回ずつ行ったら、次の傾斜方向へ移行した。回答方法は実験 1 同様の 3 件法とした。例えば -1.5° の足底面傾斜を提示した際に、実験参加者が視覚提示した水平までの傾斜より傾斜量が大きいことを判別できれば「大きい」という回答になる。

3.5 実験手続き

実験参加者は 15 名で男性 13 名女性 2 名、いずれも 20 代であった。実験参加者は靴を脱いで装置に立位し、HMD (Meta Quest3) および耳栓、ノイズキャンセリングヘッドホン (Sony WH-1000XM5) を装着し、傾斜中はヘッドホンからホワイトノイズを提示した。実験 1, 2 はカウンタバランスをとって提示し、実験 1 または 2 を終わったら 5 分の休憩を取ってもう一方の実験を実施した。各実験の傾斜方向は無作為な順序で行った。傾斜提示時の立位状態の指示では、足は肩幅に開き両腕は体側に沿わせて下におろすようにし、傾斜中は装置の柵にもたれないように説明を行った。また回答は傾斜停止後からおおよそ 5 秒程度で答えるように指示した。

4. 実験結果

3 件法で得た回答から PSE, JND を算出する方法について述べる。例として, ある実験参加者の実験 1 前方で表 1 のようなデータが得られたとする。

表 1: 実験において採取したデータの例

水準[deg]	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
上昇系列	小さい	小さい	等しい	等しい	大きい				
下降系列			小さい	等しい	等しい	等しい	大きい	大きい	

上昇系列の, 小さい→等しいの転換点を不確定帯の下端, つまり下限閾とし, 小さい→等しいの平均値を用いる。同様に, 等しい→大きい平均値を不確定帯の上端, つまり上限閾とした。下降系列も同様に, 大きい→等しいの転換点を上限閾, 等しい→小さいの転換点を下限閾とする。このようにして得た 2 つの下限閾, 2 つの上限閾を, それぞれ平均してバイアスを相殺することで, 最終的に用いる下限閾, 上限閾とする。PSE, JND は以下の式で算出した。

$$PSE = (\text{上限閾} + \text{下限閾}) / 2$$
$$JND = (\text{上限閾} - \text{下限閾}) / 2$$

データでは一部除外したものがあり, 上昇系列と下降系列いずれかでも該当する場合, 上昇系列と下降系列をセットで除外した。該当したものは表 2 上側のように「等しいまたはわからない」に知覚が転換したのちに「小さい, 大きい」となり下限閾または上限閾が算出できないものである (実験 1: 前方 4 件, 後方 3 件, 右方 2 件, 実験 2: 後方 2 件)。また表 2 下側のように上限閾または下限閾に到達しなかったものも除外した (実験 1: 後方 2 件, 実験 2: 前方 2 件, 右方 2 件)。除外したデータを含む実験参加者に関して, 他のデータが正常であればデータ処理に含めた。

表 2: 実験において除外したデータの例

水準[deg]	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
上昇系列	小さい	小さい	小さい	等しい	等しい	等しい	小さい	大きい	

水準[deg]	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
上昇系列	小さい	小さい	小さい	等しい	等しい	等しい	等しい	等しい	等しい

図 3 に実験 1, 図 4 に実験 2 の結果を示し, それぞれの値と標準偏差について表 3, 4 に示す。各図の左側は主観的等価点 (PSE) についてのグラフであり, 実験参加者ごとの PSE の平均値を示しており, エラーバーは標準偏差を示す。横軸は方向について左から順に前方, 後方, 右方である。また縦軸は角度であり, 提示した水準の範囲で表示している。図の右側は弁別閾 (JND) についてのグラフであり, 実験参加者ごとの JND の平均値を示しており, エラーバーは標準偏差を示す。また縦軸は角度を示す。

PSE について, 実験 1, 2 (2 水準) と前後右 (3 水準) についての 2 元配置分散分析を行った。分散分析を行うにあたって, 正規性をシャピロウィルク検定, 等分散性をルビー

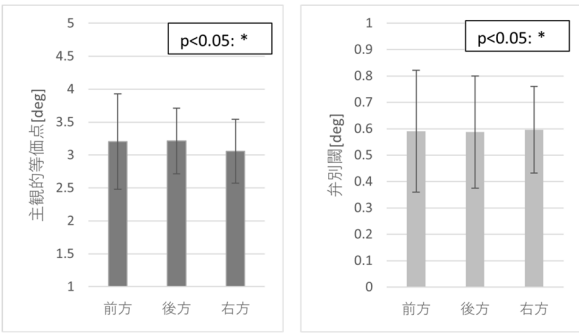


図 3: 実験 1 の PSE および JND

表 3: 実験 1 の PSE および JND の値と標準偏差

	前方	後方	右方		前方	後方	右方
PSE	3.20	3.21	3.06	JND	0.59	0.59	0.60
標準偏差	0.72	0.50	0.48	標準偏差	0.23	0.21	0.16

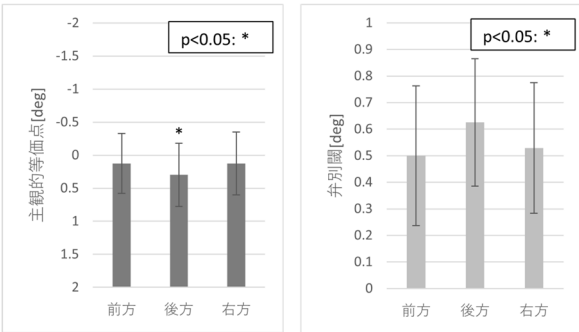


図 4: 実験 2 の PSE および JND

表 4: 実験 2 の PSE および JND の値と標準偏差

	前方	後方	右方		前方	後方	右方
PSE	0.13	0.30	0.13	JND	0.50	0.63	0.53
標準偏差	0.45	0.48	0.48	標準偏差	0.26	0.24	0.25

ン検定により確認した。分散分析の結果として, それぞれの要因の主効果および交互作用について有意差は見られなかった。JND も同様に 2 元配置分散分析を行った結果, それぞれの要因の主効果および交互作用について有意差は見られなかった。また PSE について, 標準刺激の値と差があるかを観察するために 1 標本の t 検定を行った。実験 1 では 3°, 実験 2 では 0° との比較を行い, 結果として実験 2 後方のみ標準刺激の値と有意な差がみられた。

5. 考察

PSE について実験 2 後方を除き, 統計的に標準刺激と有意に差のない値で主観的に等価であると知覚していることが観察された。一方で図 5 および表 5 に示すように, パイロットスタディではいずれの条件でも標準刺激に対して小さな足底面角度で主観的に等価と判断する様子が観察されており, 0.1°–0.5° 程度足底面刺激を過大評価する様子が観察された。このように本研究ではパイロットスタディとは異なる結果が得られたと考えられる。

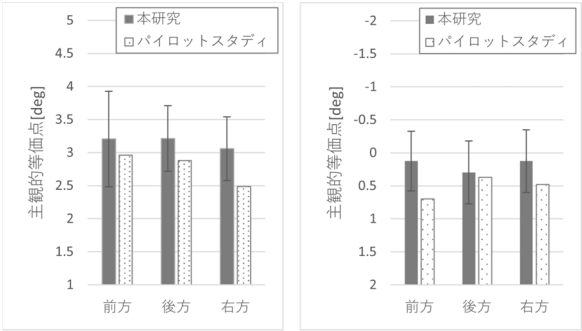


図5:パイロットスタディと本研究のPSEの比較
左) 実験1, 右) 実験2

表5:パイロットスタディと本研究のPSEの値の比較

実験1	前方	後方	右方	実験2	前方	後方	右方
本研究	3.20	3.21	3.06	0.13	0.30	0.13	
パイロットスタディ	2.96	2.88	2.53	0.70	0.37	0.48	

パイロットスタディでは足底面傾斜量を過大評価する傾向がみられたが、本研究では足底面傾斜量の過大評価は顕著ではなかった。この結果の要因としては測定方法が異なった点が考えられる。パイロットスタディでは恒常法を用いていたことに対し、本研究では極限法を用いた。極限法では徐々に刺激量を変化させるため、ある程度の刺激量の予測が可能で一方、恒常法はランダムに水準を提示するため与えられる傾斜角度の予測はできない。この予測不可能性が傾斜による転倒への危機察知を生じさせ、足底面傾斜量を過大に評価させたのではないかと考える。一方で本研究の極限法では予測可能性があるため危機感が薄れ、より標準刺激に近い PSE の値を得たのではないかと推測される。

また、実験 2 後方では PSE が標準刺激よりも有意に低く、弁別閾も最も大きい値であった。これは、VR 体験において後方傾斜状態から水平状態まで戻すときに、実際の水平には到達しない、やや小さな傾斜量でも水平を再現できる可能性があると考えられる。また、足底面傾斜の過大評価は実験 2 の後方のみに見られた。原因の一つとして、既に傾いた状態から傾斜することによって、足底面傾斜を過大評価する傾向が考えられるが、実験 2 の前方および右方の条件では PSE は標準刺激と有意な差はなかった。実験参加者のコメントとして、実験 2 では傾斜が与えられる以前に、身体は傾斜する方向にバランスをとっているため、そこからさらに傾斜が与えられるとより傾斜量が多く知覚されると感じた、という回答もあった。これらについて

より良い考察を行うために、頭部や重心動揺などの物理的指標のさらなる観察が必要であると考えます。

6. まとめ、今後の課題

本研究では視覚に対して異なる足底面刺激を与えた際の傾斜知覚の調査を行った。結果として、視覚刺激が水平から 3° まで傾斜する場合と、3° から水平まで戻る場合について、足底面傾斜の提示に差異があることを知覚できることが観察された。実験 2 後方の、後ろに 3° 傾いた状態から水平まで戻る条件を除き、PSE は視覚刺激と近い値となった。また、恒常法を用いたパイロットスタディでは足底面傾斜量を過大評価する傾向がみられたが、極限法を用いた本研究ではその傾向は見られず、実験参加者の傾斜に対する予測可能性が知覚を変化させることが示唆された。

今後の課題には、実験参加者から得たフィードバックとして、VR 環境で表示している水平面と傾斜面が判別しにくい点が挙げられる。2つの面は同一のテクスチャであることが原因と考えられ、傾斜面にはチェック柄など傾斜がわかりやすくなる表示をすることで、より明確な視覚刺激になることが期待される。また提示する角度については、パイロットスタディを参考とした水準を設けたが、極限法による提示では上限閾または下限閾に達しなかった回答が複数見られた。このことは提示する水準の外に閾値があることを示唆し、極限法の回答バイアスを考慮してより広い角度範囲の水準を設ける改善点がある。

参考文献

[1] Funabiki, O., Morita, N. & Yasuyuki, Y : MeiMeiRoRo, ACM SIGGRAPH Asia 2024 XR, Article 11, 1–2, 2024.

[2] 船引應佑, 柳田康幸: 視覚刺激に対して角度の異なる足底面傾斜が傾斜知覚に与える影響, 電子情報通信学会技術研究報告, **124**(192), 10–14, 2024.

[3] Teasdale, N. et al : Contribution of ankle, knee, and hip joints to the perception threshold for support surface rotation, *Perception & Psychophysics* **61**(4), 615–624, 1999.

[4] 加我君孝, 瀬藤光利, 落合敦, 都筑俊寛, 石川文之進: 前庭知覚と傾斜知覚, *認知神経科学* **7**(1), 16–22, 2005.

[5] 根岸一平, 金子寛彦, 水科晴樹: 重力方向知覚における視覚刺激の傾きと種類および身体の傾きの影響, *光学* **38**(5), 266–273, 2009.