



没入型仮想現実感システムにおける 映像刺激に起因する身体動揺のモデル化と評価

Modeling and Evaluation of Body Sway by Visual Stimulus in Immersive Virtual Reality System

渡部裕貴¹⁾, 梅澤猛²⁾, 大澤範高³⁾

1) 千葉大学大学院 融合理工学府 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33, y.watanabe@chiba-u.jp)

2) 千葉大学大学院 工学研究院 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33, ume@chiba-u.jp)

3) 千葉大学大学院 工学研究院 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33, n.osawa@faculty.chiba-u.jp)

概要：直立した状態での非透過型ヘッドマウントディスプレイによる VR 体験においては、映像刺激に誘発される身体動揺によって転倒する危険が生じる。本研究は転倒の危険が高まった際に映像刺激を加減して身体動揺を抑制し、VR 体験の安全性を高めることを目的とし、当該環境下の姿勢制御のモデル化によって身体動揺予測の精度を高めることを目標とする。本研究では 1 リンク倒立振子と比例微分(PD)制御を用いて人体をモデル化し、映像刺激が外力として作用するモデルを用いて身体動揺の予測を試みた。実際の身体動揺とモデルによる予測を比較し有効性を検証した。

キーワード：危険防止・身体動揺・映像刺激・倒立振子モデル

1. はじめに

両眼立体視を行う非透過型のゴーグル状ディスプレイ(HMD: Head Mounted Display)には外界の視覚情報を遮断し没入感を高める効果があるため、VR 体験に多く利用されている。

しかし、人間の姿勢制御は視覚に強く依存しており、外界が見えなくなる非透過型 HMD の使用中は視覚情報による姿勢の修正が困難になるため、姿勢制御が不安定になる。また、視野の広範囲が動く映像刺激は視聴者に映像とは逆方向に動く感覚を発生させ、姿勢の揺れを誘発することが知られている[1]。そのため、立位での非透過型 HMD の使用には転倒やそれに伴う負傷の危険性が伴う。一方で、立位での体験は座位に比べ身体運動の自由度が高く、臨場感や没入感を高められる利点もある。

そこで本研究では、立位での非透過型 HMD 使用時における安全性の向上を目的とし、身体動揺の再現・予測を行う手法を検討した。

2. 関連研究

斯らは、人間の直立状態での姿勢制御の再現にあたり、図 1 に示す 1 リンク倒立振子モデルを用いている[2]。このモデルは、下端を軸に回転する質量のない棒とその上端の重心で構成されている。この研究では単純なモデルでも

Yuki WATANABE, Takeshi UMEZAWA, and
Noritaka OSAWA

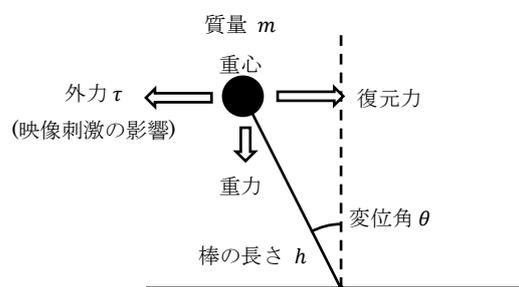


図 1 1 リンク倒立振子

姿勢制御の再現が可能であることが示されているが、視覚刺激として静止画像を用いており、映像刺激については考慮されていない。

筆者らは、1 リンク倒立振子モデルを用いて、動的な映像刺激を視聴させた際の身体動揺の再現を試みてきた[3]。単純な動的映像刺激に起因する身体動揺の再現がある程度可能であることが示されたが、過渡応答の再現精度が低い等の課題が存在した。この研究では姿勢制御を復元力のみで表現しており、人間の姿勢制御により近い神経制御を考慮したモデルを使用することで精度が向上すると考える。

3. 提案手法

人体を 1 リンク倒立振子で、神経制御を PD(Proportional-Derivative)制御で模し、動的な映像刺激による姿勢制御への影響を振子に働く外力としたモデルを利用して、非透過

型 HMD 使用時の映像刺激に起因する身体動揺の再現を試みる。

1 リンク倒立振子モデルの運動方程式を式(1)に示す。 θ は平衡位置からの変位角、 ω は変位角の角速度、 m は重りの質量、 g は重力加速度、 h は接地点から重心までの距離、 K は受動的弾性係数、 B は粘性係数、 P は比例制御係数、 D は微分制御係数、 Δ は時間遅れ、 τ は外力の大きさ、 I は足関節周りの慣性モーメントを表す。本研究では PD 制御を用いて姿勢制御を模擬する先行研究[4]を参考に、平均的な人体のパラメータとして、 $m = 60$ [kg]、 $h = 1$ [m]、 $K = 0.8mg/h \approx 471$ [Nm/rad]、 $B = 4$ [Nms/rad]、 $P = 0.8mg/h \approx 471$ [Nm/rad]、 $D = 270$ [Nms/rad]、 $\Delta = 0.200$ [s]、 $I = 60$ [kgm²]と設定する。

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= ((mg/h - K)\theta - B\omega - P\theta_{\Delta} - D\omega_{\Delta} + \tau)/I \end{aligned} \quad (1)$$

人体の姿勢制御は左右方向と前後方向で異なる特性を持つことが知られており、先行研究[2]でも運動の前後と左右を分離して解析が行われている。本研究においても 2 方向の運動は独立しているものとして解析を行う。

4. 予備実験

4.1 概要

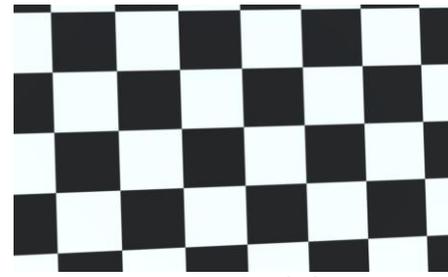
1 リンク倒立振子および PD 制御を用いたモデルの有効性を検証するため、単純な映像刺激を与えた際の身体動揺を再現できるかを調べた。

予備実験では、白黒のチェッカーボードが正弦関数に従って動く映像を生成して刺激として用いた。この映像を以降基準刺激と呼ぶ。基準刺激の振動には左右方向と前後方向の 2 種類を用いる。基準刺激の映像のスナップショットを図 2 に示す。

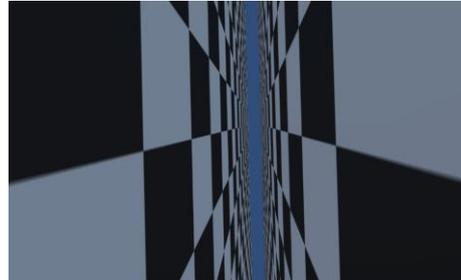
本研究では映像の加速度をもとに外力を定める。基準刺激による外力を式(2)で定義する。なお、 F_0 は外力の大きさ、 w はチェッカーボードの振動数、 t は実験開始からの時刻、 p はチェッカーボードの初期位相を表す。

$$\tau = (F_0/m) \cos(wt + p) \quad (2)$$

両眼立体視・平衡機能に障害を持たない健康な 20 代の男性 9 名を被験者として、非透過型 HMD を立位で用いて映像刺激を与えた際の身体動揺を記録する実験を行った。左右方向・前後方向の基準刺激について振動数と振幅を変化させた映像を提示し、映像刺激の強弱によるモデルの有効性の差異を調べた。振動数 0.35 Hz・振幅 10 m を基準とし、振動数を変化させる映像では 0.00 Hz から 0.50 Hz にかけて 0.05 Hz 間隔で変更した 11 種、振幅を変化させる映像では 1.0 m から 16.0 m にかけて 1.5 m 間隔で変更した 11 種の映像を提示した。1 種の刺激当たり 40 秒間計測を行い、次の刺激との間には 5 秒間の暗転を設けた。左右・



(a) 左右方向刺激



(b) 前後方向刺激

図 2 予備実験で使用した基準刺激

前後と振幅・振動数変化の組み合わせによる計 4 回の試行について、提示する順序は重複しないよう被験者ごとに変更し、また各試行の間には 1 時間以上の休憩を設けた。各関節の座標は毎秒 30 回記録した。

評価には実際の身体動揺とシミュレーションの間のずれの大きさを表す誤差係数を用いた。誤差係数 ε は式(3)から求めた。 θ_{real} は実際の身体動揺における θ 、 $\theta_{simulated}$ はシミュレーション結果における θ 、 c は座標データの数、 a は実際の身体動揺の振幅(θ_{real} の最大値と最小値の差)を表す。

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\sum(\theta_{real} - \theta_{simulated})^2}{c}\right)} / a \quad (3)$$

実用上は現在から数秒間など近い未来の危険予測が可能であれば十分であると考えられる。また、身体動揺にはランダムな要素も含まれているため、予測手法にかかわらず長期の身体動揺予測は精度が下がることが予想される。よって現在時刻から近い区間の予測精度は遠い区間の予測精度よりも重要性が高いと考えられるため、試行全体(40 秒間)での誤差の比較に加え、2 秒間・5 秒間の範囲に限って予測した場合についても調査し、予測誤差がどう変化するかを確認した。

映像刺激の提示には Oculus Rift CV1 を、座標データ取得には Kinect for Windows v2 の骨格検出機能を利用した。

4.2 結果

ある被験者に前後方向に振動する映像刺激を提示した際の実際の身体動揺とモデルによるシミュレーションの結果の比較を図 3 に示す。また、図 4 に筆者らの先行研究で用いた復元力モデル[3]と PD 制御モデルとの誤差係数の比較を示す。

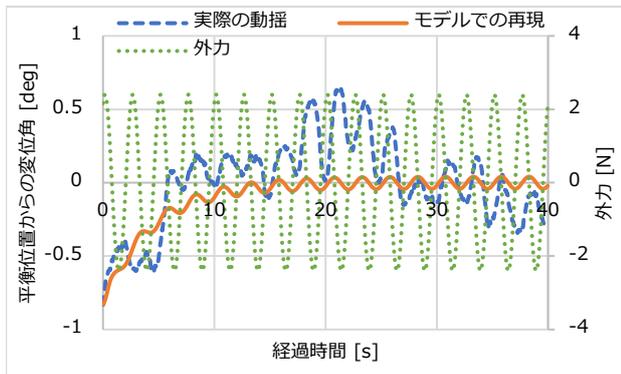


図 3 実際の動揺とモデルによる再現の比較

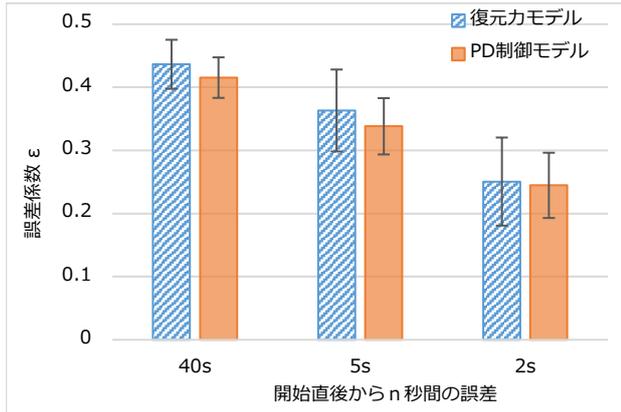


図 4 先行研究との誤差係数の比較



(a) 直線での加速・減速の繰り返しの映像



(b) 左右方向への蛇行の映像
図 5 実験で使用した映像刺激

4.3 考察

図 3 から、1 リンク倒立振子モデルから単純な映像刺激による身体動揺の概形を近似できることが示唆された。また図 4 から、筆者らの先行研究[3]に比べて誤差係数が開始直後のみに限定した場合・全体ともに低下しており、PD 制御との併用は有効であることが示唆された。

5. 複雑な映像刺激における実験

5.1 概要

実環境に近い複雑な映像刺激を提示した場合においても提案手法による身体動揺の予測が可能であるかを調べる。市街地のモデル[5]の中を走行するジェットコースターに搭乗する状況を模した映像を作成し、被験者に視聴させた際の身体動揺とシミュレーションで再現した身体動揺の比較を行うことでモデルの有効性を検証した。両眼立体視・平衡機能に障害を持たない健康な 20 代の男性 7 名・女性 1 名を被験者とした。映像は以下の 6 種のシーンを含むように構成し、各映像がどのような身体動揺を発生させるか、モデルによって再現可能であるかを調べた。

- (A) 直線上での加速・減速の繰り返し
映像のスナップショットを図 5(a) に示す。この区間では水平な直線上で加速と減速を周期的に繰り返す。この映像は予備実験における前後方向基準刺激に相当する。0.35Hz の基準刺激になるべく近

くなるよう速度を調整し、同様の身体動揺が発生するかを確認する。

- (B) 上り坂での等速移動
水平でない状況での等速移動によって身体動揺が発生するかを確認する。
- (C) 左右方向への蛇行
映像のスナップショットを図 5(b) に示す。この映像は予備実験における左右方向基準刺激に相当する。0.35Hz の映像刺激になるべく近くなるよう調整し、同様の身体動揺が発生するかを確認する。
- (D) 右方向への螺旋・左方向への螺旋
回転速度を(C)左右方向への蛇行での最高回転速度に近くなるように設計した螺旋を用いて、周期的な速度変化を伴う映像と等速回転する映像との間の身体動揺の差異を調べる。
- (E) 上下方向への蛇行
視界が上下方向に振動することで前後方向に身体動揺が発生するかを確認する。
- (F) ロール方向の回転
視界を左右に傾けることで左右方向に身体動揺が発生するかを確認する。

本実験では予備実験と同一のモデルを使用した。また、各軸の外力 τ_x, τ_z は視点の加速度をもとに式(4)の通りに定義した。ここで、 v はカートを原点とした各軸上の移動

距離、 r は各軸上の回転角度を表す。

$$\begin{aligned}\tau_x &= \dot{v}_x + \dot{r}_y \\ \tau_z &= \dot{v}_z + \dot{r}_x\end{aligned}\quad (4)$$

5.2 結果

ある被験者が(A)加速・減速の繰り返しおよび(C)左右方向への蛇行の映像を視聴している際の身体動揺およびモデルによるシミュレーション結果の比較を図 6 に示す。

5.3 映像刺激と身体動揺に関する考察

(A)直線での加速・減速の繰り返しの映像や(C)左右方向への蛇行の映像では、予備実験と同種の周期的な身体動揺が発生していた。映像の速度や振動数は予備実験での基準刺激に近くなるよう設計していたが、身体動揺の振幅は予備実験に比べて 2~3 倍程度と大きくなっていった。このことから、現実的な映像は抽象的な映像に比べて身体動揺に対する影響が大きくなる可能性が考えられ、今後検証を行う必要がある。

(B)上り坂での定速移動の映像では、8 名中 4 名の被験者について、身体が平常時よりも前方に傾いていた。また、上下方向への蛇行の映像よりも強い力を受けたように感じたと実験後に回答した被験者が存在した。映像自体は等速運動であるため、加速度によって力が働くとしたモデルでは外力は発生しない。前方への傾きは水平線の傾きを検出して体を鉛直に戻そうとしたことが原因と推測される。

(D)左右方向への螺旋では、螺旋の中心方向に身体が傾

く動きが見られたが、傾きの大きさは(C)左右方向への蛇行の視聴時に比べて小さくなる傾向が見られた。等速回転する螺旋の映像に比べて、回転速度の変化を伴う蛇行の映像では動揺が大きくなったことから、映像の加速度は映像の速度以上に身体動揺に影響を与えることが示唆された。

(E)上下方向への蛇行では、主に前後方向に身体動揺が発生した。動揺の原因としては、ピッチ方向の映像回転に加えて水平線が動くことによる影響も考えられるため、どちらの影響が大きいかは今後調査が必要である。

(F)ロール方向の回転では、平常時に比べて多少動揺が発生した例が存在するものの、映像刺激の回転方向によって明確に変化する身体動揺は観察できなかった。

5.4 シミュレーションの精度に関する考察

図 6 (b) では実際の動揺を比較的再現できているが、図 6 (a) では実際の動揺とのずれが大きくなっている。外力の計算において、移動と回転では姿勢制御に与える影響の比重が異なる可能性が考えられるため、今後より適切な外力の設定を検討していく。また、PD 制御について人体の反応遅れを反映するモデルを使用しているが、遅れのために不安定になり人体として不自然な振動が発生することがある。振動は遅れを小さくすることで改善するが、その設定が妥当であるかは今後検討を要する。

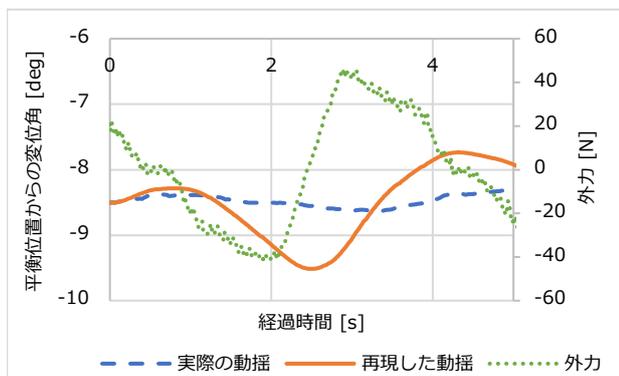
6. 今後の課題

映像に起因する身体動揺の大きさには個人差がある。制御パラメータを個人に合わせて変更し、モデルに個人差を反映することで予測精度を向上させることができると予想され、設定手法について今後検討を行う。

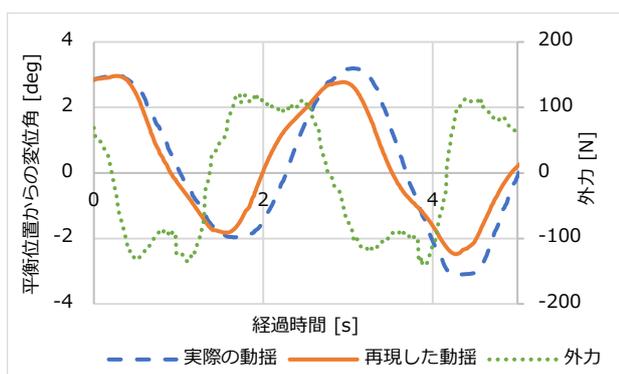
また、現時点では事前に記録したデータを用いて身体動揺の再現を行っているが、リアルタイムに再現を行うことで実際に転倒予測を可能にすることを目指す。

参考文献

- [1] 日本バーチャルリアリティ学会 (2011) 「バーチャルリアリティ学」、日本バーチャルリアリティ学会。
- [2] 斯琴 ほか (2006) 「立位姿勢時の身体動揺制御および視覚の影響について」、体力科学, 55(5), pp. 469-476, 日本体力医学会。
- [3] 渡部裕貴 ほか (2017) 「没入型仮想現実システムにおける映像刺激による転倒防止のための身体動揺の予測」、情報処理学会第 79 回全国大会講演論文集, 2017(1), pp. 227-228.
- [4] 野村泰伸 (2011) 「ヒト静止立位姿勢の神経制御モデル」、日本神経回路学会誌, 18(2), pp. 85-98.
- [5] 株式会社ゼンリン (2014) 「Unity 向け 3D 都市モデルデータ「ZENRIN City Asset Series」 | ゼンリン」, <https://www.zenrin.co.jp/contents/product/service/3d/asset/>, 2018/07/18 アクセス



(a) 加速・減速の繰り返しの映像 (前後方向)



(b) 左右方向への蛇行の映像 (左右方向)

図 6 実際の動揺とモデルによる再現の比較