輻輳性眼球運動に基づく直線加速感評価のための複合現実環境の構築

Construction of a Mixed Reality Environment for Evaluating an Illusory Sense of Linear Acceleration Based on Vergence Eye Movement

池田 聖[†], 和田 佳郎^{††}, 柴田 智広[†]

Sei Ikeda[†], Yoshiro Wada^{††} and Tomohiro Shibata[†]

Abstract We describe a mixed reality (MR) environment for testing a novel index of an illusory sense of linear acceleration. The index is based on a measurement of the user's vergence eye movement, which is defined as the simultaneous and collaborative movement of both eyes. For evaluating the illusory sense of linear acceleration, we developed an MR environment consisting of a large hemisphere display and a motion chair, and we conducted eye-movement measurements. In this experiment, subjects sat on a motion chair and were instructed to look around the center of a display. We considered four conditions in a 2×2 factorial design with the factors of video motion and chair motion. The video was recorded out of doors by using a car, and the chair was either tilted or not tilted. We observed the significantly faster eye convergence when the video was played (not static) and when the chair was tilted, providing support for the usability of our MR environment.

キーワード：複合現実環境，輻輳性眼球運動，直線加速感評価，モーションチェア，傾斜制御

1. ま え が き

ドライビングシミュレータや遊園地のアトラクションなどの仮想環境では，利用者に持続的な直線加速感を与えるために，広視野角映像の提示と共にモーションチェアを傾斜させる手法が用いられている．頭部の直線加速度センサである前庭耳石器は，直線加速運動と傾斜を区別できないことから¹⁾²⁾，傾斜による重力加速度の後方成分を前方向の直線加速運動と錯覚させているのである．しかし，どのような映像刺激と傾斜刺激の組合せがもっとも効率よく直線加速感を誘発するかについての研究は進んでいない．その理由の一つは直線加速感の評価法にある．従来のアンケート³⁾やジョイスティックによる主観的な評価法では，評価値と実際の直線運動感のスケールが曖昧で，刺激を与えてから評価値が得られるまでの応答が遅いという問題がある．

その点，両眼が内側に動く輻輳性眼球運動（vergence）は，直線運動による視覚刺激や前庭刺激によって短潜時で誘発される⁴⁾，直線加速度の大きさに応じて大きくなる生体反応である⁵⁾，市販の眼球運動測定装置で定量的な実時間計測が可能である，という三つの理由から上記の問題を解決する客観指標となりうると考えられる．そこで今回，視覚と前庭感覚への両刺激による直線加速感に関する研究を実施するため，輻輳性眼球運動を計測できる大型ディスプレイとモーションチェアを組合せた複合現実環境を構築したので，その有効性について報告する．

2. 直線加速感を与える複合現実環境の構築

複合現実環境は，図1に示すように，球面状の没入型スクリーンとモーションチェアで構成される．没入型スクリーンの直径は400cmであり，スクリーン中央と被験者の眼球との距離が245cmの位置にモーションチェアを配置した．

2.1 視覚刺激情報の取得・生成

視覚刺激は，以下の3要件を考慮して取得・生成した．

- (1) 映像内の環境のスケールが認知できるものである．
- (2) 大きな直線加速感を与える映像である．
- (3) 注視点が大きく動きにくいコンテンツである．

(1) 被験者が感じる加速度の大きさは，被験者が映像から認識する環境のスケールに依存している．実験設定者の

2009年7月13日受付，2009年11月9日再受付，2009年11月26日採録

[†] 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

(〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5, TEL 0743-72-5111)

^{††} 奈良県立医科大学

(〒634-8521 奈良県橿原市四条町 840, TEL 0744-22-3051)

[†] Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

(89160-5 Takayama-cho, Ikoma-shi, Nara, 630-0192 Japan)

^{††} Nara Medical University

(840 Shijo-cho, Kashihara-shi, Nara, 634-8521 Japan)

図 1 直線加速感を与える複合現実環境
Our mixed reality environment.

意図どおりに被験者に環境のスケールを認識させる最も純粋な手法は、大きさのわかる対象が写る実動画像を使用することである。本研究では、ビデオカメラを用いて取得した実環境の動画像を被験者に提示し、実環境中での視界が再現される複合現実環境下で眼球運動を計測する。

(2) 大きな直線加速度感を誘発するためには、まず第一に提示する映像が大きな加速度で移動する内容の映像であり、次に被験者の視野を覆う広い視野と、高い解像度を有する必要がある。本研究では、多眼の全方位カメラ (Ladybug, Point Gray Research) を自動車に固定し、急発進させて撮影することで上記特長をもつ映像を取得する。使用した全方位カメラは、鉛直上方向に 1 個、水平方向に 5 個の一般的なカメラが固定されており、各カメラで 1024×768 画素のカラー画像が 15fps で取得できるものである。得られた各カメラの動画像から全方位が写るパノラマ動画像を生成し、スクリーンに映る前方部分 (水平役 1460 画素) だけを使用する。以上により、眼球運動計測装置 (Orbit, Permobil Meditech (強膜反射法)) を装着した状態で、被験者の視野は左右それぞれ 25 度、上 25 度、下 15 度、確保されている。さらに、取得した動画像は、2 倍の速度で走行する際の視覚刺激を再現するために、フレーム数を半分に間引いた。

(3) 撮影対象は、高低差の小さい直線状の道路で、被験者の視線を誘導するための消失点が写る場所を選んだ。しかし、撮影時の車の振動によりカメラの姿勢が変化したため、消失点がスクリーン上の 1 点に固定されない問題があった。これに対しては、得られた動画像全フレームの消失点位置を人手により与え、カメラの回転量を算出し、動画像の再生時の微小な回転をキャンセルした。

2.2 前庭感覚刺激情報の取得・生成

本実験では、図 2 に示すように、被験者はスクリーン正面に設置した傾斜可能な椅子に座り、モーションチェア (Joy-chair, 川田工業) を傾斜制御することで前庭感覚刺激を与える。制御角 θ は、動画を取得した際に同時に計測した自動車の加速度から算出した。重力加速度を g 、映像刺激の前方加速度を a としたときに制御角 θ は、 $\theta = k \cdot \sin^{-1}(\frac{a}{g})$

図 2 モーションチェアと眼球運動測定装置
Motion chair and eyetracker.

で表される。ただし、モーションチェアの制御角の変化が大きすぎる場合は、使用したモーションチェアの回転軸が足元にあり頭部と離れているため、頭部位置に並進加速が生じる、半規管が刺激され回転を感じる³⁾、という問題がある。これに対しては、急激な回転を抑制するよう係数 k を小さな値 (0.2) に設定することで対処した。なお、提示できる前方加速度の上限は、用いたモーションチェアの傾斜角の制限 $\theta \leq 13.5^\circ$ から $a \leq 0.23$ [G] である。また、上記傾斜角が正確に頭部の姿勢に反映されるために、ベルトにて体部を固定し、フェイスマスクを介して頭部を椅子に固定し、頸椎固定カラーを用いて頸部が動かないようにした。

3. 輻輳性眼球運動の試験計測

実験では、構築した複合現実環境内で評価指標である輻輳性眼球運動が観測されることを確認する。事前に実験の目的と内容を十分に説明し、同意が得られた健康成人 5 名 (男性、22-27 歳、平均 23.6 歳) を対象とした。

3.1 実験条件

視覚刺激には、前章で述べた動画 (Movie) とその初期フレームである静止画 (Picture) の 2 種類を設定した。椅子の動きには、後方向の傾き (Tilting) と静止 (Stationary) の 2 種類を設定した。両者の組合せから以下の 4 種類の条件を設定し、実験はダミー刺激 (2 条件) を加えた 6 条件を各 6 回ずつ、計 36 回繰り返した。各刺激は 1 回約 8 秒であり、刺激の直前まで視点を固定するためのマークが表示されている。同一刺激を連続して与えると adaptation が起きて反応が減少する可能性がある*ため、刺激条件はランダムな順序で提示し、36 回を 1 セットとし、各セット間は充分な時間をあけて計 8 セット実施した。

- O: Picture + Stationary (control condition)
- A: Movie + Stationary
- B: Picture + Tilting
- C: Movie + Tilting

椅子の前後方向の直線加速度を直線加速度センサ (CXTA01, Crossbow)、前後方向の回転角速度をジャイ

* adaptation の有無に関しては今後の検討課題である。

ロセンサ (CRS03-04, Silicon Sensing System) にて測定し、データ収集解析システム (PowerLab system, ADInstruments) にて眼球運動、刺激の開始信号と共に 1kHz で記録した。データ解析は Matlab (Mathworks) を用いておこない、刺激開始 200ms 前から 400ms 後の間に衝動性眼球運動 (Saccade) や瞬目があるデータは削除した。データの差の検定には、Tukey-Kramer 法により多重比較を行った。

3.2 結果

刺激開始 200ms 前から 400ms 後のデータを刺激条件ごとにまとめて重ね書きしたのが図 3 である (被験者 OK の例)。左から条件 O, 条件 A, 条件 B, 条件 C, 上段から輻輳性眼球運動 (左眼球運動-右眼球運動) の位置波形 (輻輳時正), 椅子の前後方向の直線加速度 (前方向为正), 回転角速度から計算で求めた椅子の傾き (前方向为正), 動画撮影時に計測した加速度から算出した車の速度を表す。各データの太線は平均を表す。条件 B, 条件 C では椅子は刺激開始と同時に後方向へ直線的にゆっくりと傾斜し, 400ms 後には約 1.5 度の傾きとなった (図 3, 3 段目)。椅子の直線加速度波形は刺激開始 50ms 前から 150ms 後にかけて前方向への慣性力を記録している箇所 (図 3, 2 段目) は, 2.2 節で述べた急激な回転により生じる並進加速である。

被験者 OK (図 3) の場合, 条件 O では輻輳性眼球運動に変化は見られなかったが, 動画 (条件 A) を提示すると刺激開始から約 100ms 遅れて非常に小さな輻輳性眼球運動が誘発された。また, 椅子を後方へ傾ける (条件 B, C) と前段落で述べた並進加速に起因する小さな開散性眼球運動*の後に大きな輻輳性眼球運動が認められた。

刺激開始 200ms 後**における輻輳性眼球運動の位置成分を VGp200, 速度を VGv200 と定義し, 条件ごとに被験者全員の結果をまとめたのが図 4 である。VGp200 に対する多重比較の結果, O,A,B,C の間に有意な差はなかった ($p < 0.05$)。一方, VGv200 に対する多重比較の結果は, O と B,C の間, A と B,C の間に有意な差があり, また B と C の間にも有意な差があった ($p < 0.01$)。すなわち, 動画のみによる刺激では, 輻輳性眼球運動があるとは言えなかったが, 椅子を傾ける条件では, 輻輳性眼球運動の速度が大きく, しかも動画を組合せるとさらに速度が大きくなることが示唆された。

4. むすび

直線加速度感を増強するモーションチェアの傾斜制御法の開発を目指し, 輻輳性眼球運動 (vergence) の計測が可能な複合現実環境を構築した。今回構築した複合現実環境により, 輻輳性眼球運動が誘発されたことは予想通りの結果であった。このことは, モーションチェアによる傾斜刺激が直線運動と錯覚されることを裏付ける現象が観測できたと

言え, これにより構築した環境の有効性が確認できた。さらに今回の結果を踏まえて, より速い輻輳性眼球運動, すなわち直線加速度感を誘発する複合現実環境を作り出すために以下の事項について検討する。(1) まず, 大きな optic flow 刺激となるよう全面, 特に近景に豊富な視覚情報を含む実写映像を作成し, 視覚刺激のみでも十分な輻輳性眼球運動の誘発が可能な視覚刺激を生成する。(2) 次に, 2.2 節および 2.3 節で述べた, モーションチェア回転直後に生じる並進加速度の影響を小さくするため, 回転直後から 100 msec 程度の短期間, 躍度最小軌道などを利用し, 加速度を 0 から滑らかに上昇させる制御方法を検討する。これらの問題を解決した上で, より速い輻輳性眼球運動を誘発する映像刺激と傾斜刺激の組合せを今後検討していく。

最後に, 本研究は, 立石科学技術振興財団研究助成 (No.1081011) および奈良先端科学技術大学院大学融合領域推進プロジェクトである「ヒトのからだ」プロジェクトの支援を受けた。

〔文 献〕

- 1) Y. Wada, Y. Kodaka and K. Kawano: "Vertical ocular responses to constant linear acceleration generated by fore-aft head translation in monkeys", Neuroscience Research, **57**, 2, pp. 240-247 (2007)
- 2) Y. Wada, Y. Kodaka and K. Kawano: "Vertical eye position responses to steady-state sinusoidal fore-aft head translation in monkeys", Experimental brain research, **185**, 1, pp. 75-86 (2008)
- 3) E. L. Groen and W. Bles: "How to use body tilt for the simulation of linear self motion", Journal of Vestibular Research, **14**, 5, pp. 375-385 (2004)
- 4) Y. Kodaka, Y. Wada and K. Kawano: "Vergence responses to forward motion in monkeys: visual modulation at ultra-short latencies", Experimental brain research, **148**, 4, pp. 541-544 (2003)
- 5) Y. Wada, H. Goltz and G. Paige: "Human naso-occipital vestibulo-ocular reflex: Influences of frequency, viewing distance, gaze eccentricity and visual cortex", Proc. Neural Control of Movement Satellite Meeting, pp. B-3 (1999)

い け だ せい
池田 聖 2001 年, 広島大学理学部物理学科卒業。2006 年, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。現在, 同大情報科学研究科助教, コンピュータビジョン, 複合現実感の研究に従事。

わ だ よしろう
和田 佳郎 1986 年, 奈良県立医科大学卒業。1991 年, 同大学大学院博士課程修了。同年, 名古屋大学助手。1999 年, 奈良県立医科大学理学講師。前庭研究, 宇宙航空医学研究に従事。

しばた ともひろ
柴田 智広 1996 年, 東京大学大学院工学系研究科修了。日本学術振興会研究員, 科学技術振興事業団研究員を経て, 2002 年, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科情報生命科学専攻助教授 (現准教授)。

* 輻輳性眼球運動とは逆に両眼が外側に開く眼球運動

** 図 3 最下段に示すように自動車が一定の加速度で移動していること, および図 3 の 2 段目に示すように椅子の後ろ向きの並進加速度が少なく解析しやすい部分であったため, 刺激開始 200ms 後を選択した。

図 3 各刺激条件における眼球運動
Eye movements in each condition.

図 4 被験者全員の結果
Result of all the subjects.