鉛直方向加速度と視覚情報の移動感覚へ与える影響

Self-Motion Sensation Affected by Vertical Acceleration and Visual Stimulation

正会員 久米 祐一郎[†], 長谷川 大^{†*}
Yuichiro Kume[†] and Dai Hasegawa^{†*}

Abstract The sensation of self-motion is elicited by vision, vestibular sensation, and somato-sensation. We psychophysically investigated the sensation of self-motion affected by vertically moving visual and accelerative stimuli, using a PC-controlled elevator and a head-mounted display. We found from the experimental results that the vertical sensation of self-motion is synergically enhanced by vertically moving visual and accelerative stimuli, when moving visual stimuli, elicitingvection, such as landscape images and images with fixation visual targets, are presented.

キーワード：加速度，前庭感覚，移動感覚，ベクシオン，格子縞，HMD

1. ま え が き

最近では，仮想環境にもモーションプラットフォームに代表されるように，移動情報を提示するために，傾きや加速度を提示して，前庭感覚や体性感覚を刺激するディスプレイが多く導入されるようになり¹⁾，特にアミューズメントシステムとして一般的になりつつある．人間は視覚，前庭感覚，体性感覚からの動的な情報を総合し，空間内の自己運動を知覚していると考えられている²⁾．視覚刺激によって誘導される自己運動感覚(ベクシオン)による臨場感の向上についても研究がなされているが²⁾，より臨場感のある移動感覚情報を提示できる仮想環境を構築するためには，これらの加速度・視覚刺激と自己運動感覚の関係を詳細に明らかにする必要がある．

加速度刺激と視覚刺激を同時に与えた場合の自己運動感覚については，横臥姿勢で体軸方向への移動と，移動する矩形波格子縞の視覚刺激を周辺視野へ与えることにより測定されている³⁾．結果として，これらの感覚の間には相互作用があり，統合されて自己運動感覚として知覚されることが明らかにされている．この実験では，重力は移動方向に対して垂直であり，重力加速度の影響が排除されているが，その一方で前庭感覚は重力に対しても反応することや⁴⁾，鉛直下向きの移動によるエレベータ錯視が生起することも知

られており^{5)~6)}，鉛直方向の移動へ，水平面内移動の結果をそのまま利用することはできないと考えられる．また，人間が移動する可能性がある判断できる客観的内容のある視覚刺激の方が，ベクシオンを生起し易いことも知られており²⁾，格子縞提示の結果は，多様で複雑な画像情報が提示される仮想環境へ応用するためには不充分とも思われる．仮想環境下の鉛直移動は，水平面内の移動以上に臨場感の向上が可能と思われるほか，乗物シミュレータやアミューズメント機器への応用等の実用的な用途も多い．

以上の背景から，本研究では鉛直移動時の感覚特性を明らかにするために，人体への加速度提示と，抽象的な格子縞と現実的な風景画像を用いた，移動する視覚情報提示による自己運動感覚の基礎特性を調べることを目的とした．

2. 実験システム

2.1 実験装置

鉛直方向の加速度を提示するために，本研究で試作したPCによって制御される昇降台を図1に示す．昇降台は中央に設けたラックアンドピニオンサーボモータにより，被験者が座ったステージを昇降させる．モータへの荷重を軽減するためにエアジャッキを併用している．また昇降台には位置，速度，加速度計測用の位置センサが取り付けられている．

視覚情報提示には，ヘッドマウントディスプレイ(HMD：SONY PC Glasstron，800×600画素，視野28°(H)×21°(V))を使用した．視覚情報を遮断する場合には，被験者は遮蔽ゴーグルを着用した．また，昇降装置の動作音によって，被験者が動作状態を感知する可能性があるため，ヘッドフォンを装着しホワイトノイズを聞かせて実験を行った．

2003年10月23日受付，2004年3月9日採録

[†] 東京工芸大学 工学部

(〒243-0297 厚木市飯山1583, TEL 046-242-9508)

* 現在，矢崎総業株式会社

[†] Tokyo Polytechnic University, Faculty of Engineering

(1583 Iiyama, Atsugi, Kanagawa 243-0297, Japan)

* Currently with Yazaki Corporation

図1 実験システム

被験者の座ったステージはPCによって制御されるサーボモータによって上下し鉛直方向の加速度を提示する。視覚刺激はヘッドマウントディスプレイで提示する。

Experimental system.

The stage a subject sitting on was driven by a servo-motor in vertical direction. Visual stimulation was presented with a head-mount display

2.2 提示刺激

提示加速度は、本来一定のものを一定時間与えることが望ましいが、今回試作した装置の制約上、困難であった。そのため本研究では、以下のように提示加速度を定義した。昇降台の移動時間を一定の3.5sとした。そのとき昇降台は、静止状態から加速、一定速度、減速、停止の運動を行う。昇降台が上昇するときの静止状態から、停止までの加速度の実測値の一例を図2に示す。このときの正および負の加速度成分の絶対値の時間平均を提示加速度とした。昇降台が上昇するとき、提示加速度を正、下降するときを負と定義している。

人間が感じる並進加速度の閾値は、約 10cm/s^2 前後との先行報告があるため^{8)~9)}、本研究では提示加速度としてその近傍の10, 9, 8, 7, 6, 5, 4cm/s^2 を用いた。上下の移動方向を含めて、これらの提示加速度をランダム提示し、これに対して被験者には上下、いずれかの方向に移動したように感じたかを強制選択回答させた。被験者が乗る移動ステージを、ラックアンドピニオン機構で駆動しているため、ギアのカタによる微弱な振動により、被験者が動作を知覚できるため、本研究では、自己運動感覚特性の測定のために、移動方向弁別能の測定を行った。移動方向弁別能とは、人間が移動する方向を感覚により判断できる能力のことである。

視覚情報を提示するときは、昇降台の動きに合わせて画像を一定の速度で上下方向に移動させた。提示する画像は、空間周波数が 0.32cycles/deg の水平矩形波格子縞（デューティ比1:1）と図3に示す風景画像の2種、移動速度は 7.2deg/s 、一定とした。視覚情報は、ステージが動作を始めると、上または下に一定速度で移動を開始し、ステージが停止すると同時に停止する。

図2 加速度の提示
位置センサによる実測加速度例。

Presented acceleration.

An example of acceleration measured by a position sensor.

図3 視覚刺激として用いた風景写真
画面内の枠はディスプレイに表示される大きさを示す。
Landscape photograph used for visual stimulation.
The frame in the picture indicates the size for displaying.

風景画像は運動視差を無視できる遠景を撮影した写真を用いた。ディスプレイに提示される部分を図3の中のフレームで示す。本研究では、視覚情報の移動方向と昇降台の移動方向が逆のとき、すなわち実世界の移動に対応しているときを「正方向」、その反対に昇降台と視覚情報が同一方向に動くときを「逆方向」と呼ぶことにした。

実験に用いた被験者は5名（20才台4名、40才台1名、いずれも男子）であった。

3. 閉眼時の加速度による自己運動感覚

鉛直方向の加速度と視覚情報提示の自己運動感覚へ与える影響を調べる基準値とするために、視覚情報を遮蔽して、加速度のみを提示して実験を行った。

7つの提示加速度と上または下の移動方向、計14種の刺

図4 閉眼時の鉛直方向の移動方向弁別能
図中の実線は全被験者の平均値の1次回帰直線。

Discrimination of movement direction vertical without visual stimulation.
Solid line indicates first regression of the mean value for all subjects.

激をランダムに提示して、被験者には移動を感じた方向（上昇または下降）を強制選択回答させた。各被験者に対し、各刺激を20回提示した結果を、実際に昇降台が移動した方向の正答率として図4に示す。グラフ中の直線は全被験者の平均値の1次回帰直線である。1名の被験者の傾向が若干異なっているが、これは40歳代であった。

この閉眼時の平均値を以下の実験の比較基準として用いることとした。

4. 実験1：格子縞と風景画像の比較

ベクションは、格子縞のような抽象的な画像よりも、具体的な画像の方が生起し易いこと、また観察者が移動することを想定できる画像の方が、より生起し易いことが指摘されている²⁾⁷⁾。そのため、視覚刺激として格子縞と風景画像を用いて実験を行い、その結果を比較した。実験方法は前述したものと同様であり、加速度に加えて、視覚情報は昇降台の移動と同方向と逆方向をランダムに提示した。被験者が移動を感じた上または下向きの移動方向を強制選択させた。

格子縞と風景画像を提示したときの、実際に昇降台が移動した方向の正答率の結果を図5に示す。各プロットは被験者1名につき20回、5名、計100回の試行の平均値であり、直線は前述した閉眼時の平均値である。正方向の移動について格子縞提示の場合の正答率は閉眼時よりも下回っている。しかし風景画像の正答率は閉眼よりも高くなった。逆方向の場合は風景画像の場合には、閉眼時よりも正答率は下回ったが、格子縞の場合は上回る結果となった。

結果として格子縞と風景画像では、正方向と逆方向の関係が逆転した。風景画像を用いた場合、正方向移動の場合、

図5 水平格子縞と風景画像を視覚に提示したときの鉛直方向移動方向弁別能

実線は閉眼時の移動方向弁別能の平均値。

Movement direction discrimination by use of horizontal rectangular stripes and landscape images.
The solid line indicates mean movement discrimination without visual stimulation.

視覚刺激によって誘導される自己運動感覚と、加速度感覚による移動感覚が統合され、強め合って移動方向弁別能が向上し、逆方向の場合には、移動方向弁別能が低下したと推定される。また上昇時の移動方向正答率の向上が著しかった。

格子縞の場合には結果は風景画像の場合とまったく異なっており、格子縞の移動方向に移動感覚が引きずられる現象が観察された。これは、提示刺激が抽象的な幾何学図形であったため、被験者が自己の空間座標を固定することが難しく、視覚刺激の移動方向に引きずられたことが原因と推定される。

5. 実験2：固定視標の有無の比較

実験1では、視覚刺激として格子縞と風景画像を用いたが、結果はまったく逆となった。この原因として、格子縞については抽象的な視覚情報のため、被験者が自己の空間座標を固定し難く、ベクションが生起せず、格子縞の運動に被験者が引き込まれてしまったことが原因と推定された。一方、移動する視覚刺激が背景として知覚される場合、ベクションが生起し易いことも知られている¹⁰⁾。そのため実験2では、37×37画素の大きさの画像中央部に固定された半透明の視標を設けて、格子縞を提示して同様の実験を行った。

結果を図6に示す。固定視標を設けた場合は、風景画像を用いた場合と同様に、正方向では移動方向弁別が向上し、反対に逆方向では抑制される現象が観察された。

図6 視覚刺激に矩形格子縞を用いたときの固定透過視標の有無による鉛直移動方向弁別能。

実線は閉眼時の移動方向弁別能の平均値。

Movement direction discrimination by use of horizontal rectangular stripes with and without a fixed transparent visual target.

The solid line indicates mean movement discrimination without visual stimulation.

6. 考 察

本研究の結果から、実際に我々が実世界で見るような風景画像を用いた場合、および透過固定指標を提示して移動する格子縞を背景として提示した場合に、鉛直方向に移動する視覚刺激によって誘導される自己運動感覚と加速度から得る感覚が強め合い、反対に視覚刺激と加速度の方向が実世界と矛盾する場合には、その感覚が打ち消しあうことが明らかになった。この相乗効果が観察された条件は、ベクションが生じ易いと言われている条件と一致する。このことを利用すれば、視覚刺激を適当に与えることによって、小さな加速度提示で大きな自己運動感覚を生起する仮想環境を構築することも可能と思われる。

移動する格子縞のみを提示した場合には、このような現象は観察されず、逆に格子縞の運動方向に観察者の座標系が引き込まれる現象が確認された。このことは仮想環境に視覚と加速度情報を提示する場合に、視覚情報の性質によって、自己運動感覚の特性が変わる可能性があることを示唆している。CGで単純化されたオブジェクトを表示することも多い仮想環境では、視覚に提示される物によって自己運動感覚が変わってしまうことも考えられるほか、仮想環境を提示するシステムの評価にも、提示する画像を選ぶ必要があると考えられる。また本研究では、風景画像と格子縞のみで実験を行ったが、移動感覚を与える視覚情報手がかりとしては運動視差もあり、さらに提示する視覚情報の性質と加速度による自己運動感覚の性質を調べる必要がある。またベクションは、提示される画像の視野が広く周辺視野を刺激する場合、生じ易いとも言われている¹¹⁾。

本研究では、視野の狭いHMDを用いたため、視野の影響についてはHMD以外の表示方法や実験方法を検討する必要がある。

移動方向正答率は閉眼の場合と比較したとき、上昇と下降の場合に差が見られた。この原因については、重力の影響も考えられるがさらに詳細に検討が必要と思われる。

7. む す び

本研究では鉛直方向の加速度と視覚刺激による自己運動感覚特性について検討を行った。結果としてベクションが生じ易い条件のときに、視覚と加速度により自己運動感覚が強め合い、抽象的な格子縞のみを視覚提示したときには、その移動方向に移動感覚が引きずられることが明らかになった。

視覚と加速度による自己運動感覚は多くの条件に依存していることから、特性を詳細に明らかにするために、今後提示画像の種類、視野や3次元手がかり等より広い条件について実験・検討する予定である。

〔文 献〕

- 1) G.C. Burdea: "Force and Touch Feedback for Virtual Reality", John Wiley & Sons, New York (1996)
- 2) 近江政雄: "自己運動感覚", 館澤監修; 人工現実感の基礎, 培風館, pp.73-87 (2000)
- 3) T.R. Carpenter-Smith, R.G. Futamura, D.E. Parker: "Inertial Acceleration as a Measure of Linear Vection: An Alternative to Magnitude Estimation", Perception & Psychophysics, 57, pp.35-42 (1995)
- 4) E.G. Walsh: "The Perception of Rhythmically Repeated Linear Motion in the Vertical Plane", Quart. Jour. of Exp. Psychol., 49, pp.58-65 (1964)
- 5) M.M. Cohen: "Elevator Illusion; Influences of Otolith Organ Activity and Neck Proprioception", Perception & Psychophysics, pp.401-406 (1973)
- 6) 井須尚紀, 関邦博監修: "平衡感覚", 人間の許容限界ハンドブック, 朝倉書店, pp.178-188 (1990)
- 7) G. Melvill Jones, L.R. Young: "Subjective Detection of Vertical Acceleration: A Velocity-Dependent Response?", Acta Otolaryngol., 85, pp.45-53 (1978)
- 8) A.J. Gundry: "Thresholds of Perception for Periodic Linear Motion", Aviat. Space Environ. Med., 49, pp.679-686 (1978)
- 9) I.P. Howard, L. Childerson: "The Contribution of Motion the Visual Frame and Visual Polarity to Sensations of Body Tilt", Perception, 22, pp.753-762 (1994)
- 10) M. Ohmi, I.P. Howard, J.P. Landolt: "Circular Vection as a Function of Foreground-Background Relationships", Perception, 17, pp.5-12 (1987)
- 11) T. Brandt, J. Dichgans, E. Koenig: "Differential Effects of Central Versus P Peripheral Vision on Egocentric and Exocentric Motion Perception", Exp. Brain Res., 16, pp.476-491 (1973)

久米 拓郎 1985年、早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。(株) 東芝、早稲田大学理工学部助手、シカゴ大学医学部研究員、SRI国際ナショナル主任研究員等を経て、現在、東京工芸大学教授・教務部長。バーチャルリアリティ、視覚障害者補助技術等の研究に従事。工学博士。正会員。

長谷川 大 2000年、東京工芸大学工学部光工学科卒業。2002年、同大学大学院理工学研究科光工学専攻修士課程修了。在学中、仮想環境下における移動感覚の提示方法に関する研究に従事。現在、矢崎総業(株)勤務。