

装着型LEDアレイを用いた ベクション誘発手法の提案と評価

大村 一樹^{1,a)} 大西 鮎美^{2,b)} 寺田 努^{2,c)} 塚本 昌彦^{2,d)}

概要：視覚情報によって誘発される自己運動感覚であるベクションの利用方法に注目が集まっているが、ベクションの誘発装置は個人ごとに利用したいシーンが異なる場合が多い。また、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を用いると、現実世界が見えにくいといった問題が起こりうる。そこで本研究では、LEDを用いてベクションを誘発する装着型デバイスを提案、実装した。評価実験から提案デバイスによるベクションの誘発および重ね合わせの効果を HMD を用いた場合と比較した。実験結果から、提案手法においてベクションが誘発されることを確認した。また、特定のベクションの重ね合わせで、ベクションを打ち消すことができた。

キーワード：ベクション, 視覚誘導性運動感覚, 頭部装着型ディスプレイ, LED

1. はじめに

停車中の電車に乗っているときに、向かい側の電車が左に動き出したのを見ると、まるで自分の乗っている電車が右に動き出したかのように感じる。このように、一様に動く視覚刺激を観察することで、自分は静止しているにもかかわらず、あたかも運動しているように感じることを視覚誘導性自己運動感覚 (ベクション) という。ベクションによる錯覚現象はゲームや映画、映像アトラクションなどに没入感を与えるといわれている [1]。近年ではベクションを用いて歩行方向を誘導する研究が行われるなど [2]、ベクションの日常生活への利用が期待されている。

ベクションの利用に関する既存手法は、外部環境に誘発装置を設置するものが多く、これらはその環境にいる集団全体にベクションを与えて集団の行動や意識を変化させるものである。集団の行動や意識を変化させるベクションの例として、高速道路の渋滞を防ぐ走光型視線誘導システム [3] や、床に配置した特殊なレンズを用いてベクションを誘発し、公共施設の混雑を解決するシステム [2] がある。しかし、これらのベクションの利用方法では、その環境の

中にいる全員がベクションを感じるため、個人が異なる目的をもっている場合、ベクションの誘発が個人の活動に悪影響を及ぼす可能性がある。また、ベクションの感じやすさには個人差があるが、個人差に対応してベクションの強度を調節することも難しい。

個人ごとにベクションを与えたい場合、頭部装着型ディスプレイ (HMD: Head Mounted Display) を用いれば、個人ごとにベクションをかけたいシーンが異なることや感じやすさに個人差があることに対応できる [4,5]。しかし、シースルー型の HMD は視野角が限られており十分なベクションを誘発できない。また、没入型の HMD は視界が完全に遮られており、ユーザはカメラで撮影された映像を通して現実世界を認識するため、デバイスを装着し活動することを不快に感じる可能性がある。

そこで本研究では、装着型デバイスにより現実世界を直接見せつつベクションを誘発する手法を提案する。提案手法では、ユーザの視界を遮ってしまうディスプレイではなく、LED を立体的に配置して流れるように点滅させるデバイスを装着させることでベクションを効果的に誘発する。これにより、HMD を用いたベクション誘発手法の課題であった、十分にベクションを誘発できないことや、現実世界を間接的に見なければいけないことを解決し、効果的なベクションの利用が期待できる。また、装着型デバイスとして実装することで、周囲の環境に手を加えることなく任意の環境でベクションの利用が可能である。本研究では、

¹ 神戸大学工学部
² 神戸大学大学院工学研究科
^{a)} kazuki-ohmura@stu.kobe-u.ac.jp
^{b)} ohnishi@eedept.kobe-u.ac.jp
^{c)} tsutomu@eedept.kobe-u.ac.jp
^{d)} tuka@kobe-u.ac.jp

この提案デバイスにより日常生活でユーザの視界に視覚刺激を与えてベクションを誘発したり、外部環境にあるベクションに重ね合わせて打ち消したりすることでユーザの活動を快適にすることを目指す。評価実験では、提案デバイスと HMD とで誘発および重ね合せの効果を検証する。

2. 関連研究

本章では、ベクションの性質や利用方法に関する研究や近年普及しつつある HMD の課題や身体への影響に関する研究についても紹介する。

2.1 ベクションの誘発と重ね合せに関する研究

ベクションを誘発する視覚刺激を変化させることで、誘発されるベクションやその強度に変化が現れることが明らかになっている。一方向のベクションをかける場合、ベクションの強度は提示する視覚刺激の面積の増加にともなって大きくなること [6–9] や、周辺視野への提示の方が中心視野への提示に比べてより強いベクションが誘発されること [7–9] などが報告されており、視覚刺激を提示する面積や位置が誘発するベクションに影響を及ぼすことがわかっている。また、視覚刺激の運動速度が大きくなれば誘発するベクション強度も大きくなることもわかっている [9, 10]。

他にも、観察者の視界に 2 種類の異なるベクションを誘発する視覚刺激が提示されている場合に観察者が感じるベクションの変化についても調べられている。Brandt らの研究によれば視野中心部の 30° の領域内と、その外側の視野周辺部 120° までの領域内にそれぞれ反対方向に動く縞模様を同時に提示した場合には、誘発されるベクションは周辺視野に提示された視覚刺激によって決定される [9]。つまり、ベクションを効果的に誘発するためには周辺視野への視覚刺激の提示が重要である。また、Ito らは、拡大の中心位置が異なる 2 種類の視覚刺激をそれぞれ奥と手前に同時に提示した場合には、背景の景色と知覚される奥の視覚刺激により誘発されるベクションが決定されることを明らかにした [11]。なお、ベクションを誘発するには視覚刺激の奥行きが重要であり、視覚刺激を遠くに知覚すればするほどより強いベクションが誘発されることが他のいくつかの研究でも明らかにされている [12]。他にも松田らは直線運動と回転運動が共存する場合のベクション効果に関する分析を行い、視覚刺激の直線方向の速度が大きくなるにつれて、直線方向の運動感覚が増加し、回転方向の運動感覚が減少することを明らかにした [4]。つまり異なる方向のベクションには負の相関があることがわかる。また川島らは速度の違う 2 種類の運動する視覚刺激が誘発するベクションについての研究を行い、2 種類の視覚刺激の速度の差が大きいときには遅い視覚刺激に依存してベクションが誘発されることを明らかにした [13]。

以上の視覚刺激の重ね合せに関する研究から、既にベク

ションを感じている状態で新たにベクションを誘発すると、感じているベクションに変化を与えられる。そこで本研究ではベクションの利用の幅を広げるために、ベクションを誘発する効果とベクションを重ね合わせることでベクションの効果を増減させる機能を備えたデバイスを提案する。

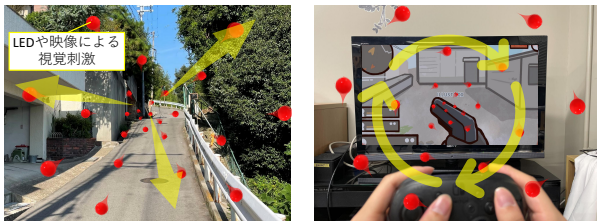
2.2 ベクションを誘発する装着型デバイス

ベクションの性質を検証する実験を行う際、ベクションの誘発には主に HMD が用いられる。HMD は大きく分けて没入型と光学シースルー型の 2 つがあり、その特徴から用途が分けられる。本節では没入型とシースルー型の HMD の利用場面や特徴、ベクションを利用する場合の課題について述べる。またその他のベクションを誘発する装着型デバイスに関する研究を紹介する。

没入型の HMD は主に VR (Virtual Reality) ゴーグルとして用いられるような完全にユーザの視界を覆うもので、広範囲の視野角から高い没入感と臨場感のある体験ができる。近年のベクションに関する研究はベクションの誘発に重要とされている視野の位置、大きさ、奥行きを容易に再現できる没入型 HMD を用いることが多い [4, 5]。臨場感のある体験ができる没入型の HMD だが、視聴時に不快感を覚える人が多く、その不快感についての研究がいくつか報告されている。大野らは質問紙調査により没入型の HMD 使用時の心肺機能への影響を調査した結果、没入型の HMD 特有の動揺病があることを認めている [14]。また、Moss らは HMD の表示遅延の酔いへの影響について調査し、頭部を繰り返し動かすことそのものが酔いの症状を引き起こすことを明らかにした [15]。

シースルー型の HMD を装着すると、ユーザは目の前の現実世界と HMD の映像の両方を見ることができる。これは主に AR (Augmented Reality) ゴーグルとして用いられ、博物館や美術館での情報提示、経路案内や観光におけるナビゲーション、工場での作業支援などで利用されている。このように AR は現実空間を拡張することによって我々の活動をより快適にできるため、光学シースルー型 HMD を用いた様々な研究が行われている。Shibata らは、AR ゴーグルのような両眼視差のある提示を行うデバイスでは奥行きを感じる表示を見ることができるが、同時に幅奏と調整の不整合により視覚疲労が生じることを明らかにしている [16]。また、2 次元のディスプレイを表示する AR ゴーグルもあるが、奥行きのない 2 次元の視覚刺激はベクションの誘発に適していない。

岡野らはルームランナー使用時における速度感覚の増強を目的とした装着型デバイスを検討している [17]。この研究では板状の LED アレイを用いた装着型デバイスによりユーザの速度感覚が増強されることを明らかにした。つまり LED アレイによりベクションを誘発できる可能性がある。しかし、装着型デバイスは板状の LED アレイが装着



(a) ベクションを誘発する例 (b) ベクションを打ち消す例

図 1: 提案手法で与えるベクションのイメージ

者の視界の左右と下方向を囲むように取り付けてあり、視界が狭くなる。視界の中心部が見えていても周辺視野が見えなければ使用環境は限られてしまう。

このように、環境に配置するタイプのベクション誘発手法とは違い、装着型には個人の目的やベクションの感じ方に対応した使い方ができるが、提示方式により一長一短がある。本研究ではそれらの短所を解消し、没入型 HMD による 3 次元的なベクションの誘発と、シースルー型 HMD のように現実世界が直接見られるという 2 つの長所をもつ手法を提案する。没入型 HMD とシースルー型 HMD でベクションを誘発する際はそれぞれ異なる長所と短所があるが、2 つのデバイスを利用したときに感じるベクションを比較した研究はない。そこで本研究では提案手法を含め、提示方式の違いによるベクションの誘発と重ね合わせによる効果の違いを比較する。

3. 提案手法

本章では、装着型デバイスにより現実世界を直接見せつつベクションを誘発する手法を提案する。提案手法では、ユーザの視界を遮ってしまうディスプレイではなく、LED を立体的に配置して流れるように点滅させることでベクションを誘発する。

3.1 想定環境

本研究では、日常生活でユーザの視界に視覚効果を加えてベクションを誘発したり、打ち消したりすることでユーザの活動を快適にすることを目指す。提案手法の実装イメージを図 1 に示す。

図 1(a) では視覚的效果を与えることでベクションを誘発し、ユーザが快適に活動できるようになる場面を想定している。これはランニング中のユーザに提案手法でベクションを誘発することでランニングを楽に感じさせている。装着型デバイスでベクションを誘発することでいかなる場所でもベクションを利用したランニングができる。また、ユーザの視界は遮らないので安全にランニングを楽しめる。

図 1(b) は視覚効果を加えてベクションを打ち消すことでユーザが快適に活動できる場面を想定している。これは提案手法により、ゲーム中に生じる画面酔いを減少させている。画面酔いは視覚情報からは身体が動いていると感じ

るが実際には動いていないという矛盾が原因で生じる。そこで直線方向と回転方向のベクションには負の相関があること [4] から、提案手法を用いてベクションを誘発し、ゲームから感じるベクションと掛け合わせることでユーザが感じるベクションを打ち消す。ベクションを打ち消す使い方はゲームだけではなく、映画や映像アトラクションなど映像のベクションが引き起こす画面酔いの解決策として期待できる。個人の酔いやすさに合わせてベクションを打ち消せば、コンテンツへの悪影響は最低限に抑えられ、酔いやすい人は快適に、酔わない人はそのままの臨場感で楽しむことができる。

3.2 システム要件

想定環境をふまえて、本研究ではベクションを利用しユーザの活動をより快適にするために以下の 3 つの要件に基づき、システムを設計する。

- ベクションの方向や強度を切り替えられる
- ベクションの誘発、外部環境から感じるベクションの増減ができる
- ユーザの視界を極力遮らない

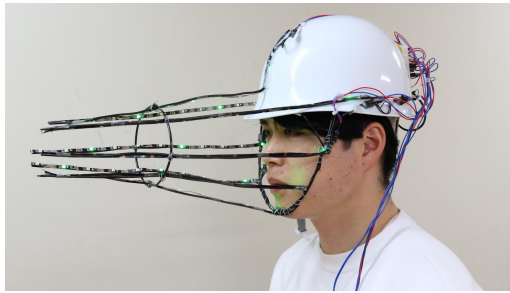
本研究では個人ごとに異なるベクションを与えることを目指す。よって、ユーザ本人のみに視覚刺激を与え、ベクションの方向や強度をユーザに合わせて調節できるような装着型デバイスを提案する。

本研究ではベクションを誘発させるだけでなく、ユーザの視界に重ね合わせることでユーザが感じていた運動感覚を打ち消したり増強させたりすることを目指す。そこで提案デバイスでは、ボタンを用いて誘発するベクションの方向や、オン、オフの切り替えを可能にする。また、ベクションを誘発する視覚刺激には LED を用いる。ベクションの誘発には視覚刺激の周辺視野への提示や奥行き異なる刺激を感じられることが重要であるため [9, 11], LED は周辺視野にも刺激が届くように顔の周りを囲うように配置し、視界前方に奥行きをもたせる。

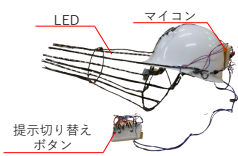
なお、日常生活での使用のためには、ユーザの視界をできる限り遮蔽しないことが望ましい。岡野らの LED アレイを用いた装着型デバイスでは、現実世界を直接見られるが、周辺視野をデバイスが覆うため日常生活に支障をきたす可能性がある [17]。本研究では、ユーザの視野を狭めず前方にも LED を配置しながら現実世界が直接見えるように、細く目立たない黒色の針金を網目状に固定してデバイスを形成する。これによりユーザの視界をほとんど遮らずにベクションを誘発できる。

3.3 提案デバイス

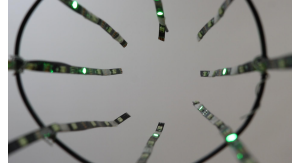
提案デバイスの構成と装着例を図 2 に示す。提案システムでは、針金がヘルメットに固定されており、装着者の視界の前方に突き出すような形をしている。針金は装着者か



(a) 提案デバイスの装着例

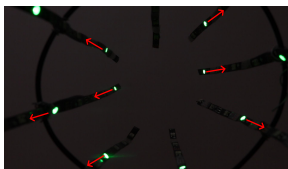


(b) 提案デバイスの構成



(c) 提案デバイスの視界の様子

図 2: 提案デバイス



(a) 前方向ベクション誘発時



(b) 時計回り方向ベクション誘発時

図 3: 提案デバイス装着時のユーザの視界の様子

ら見て上下左右とその斜め方向の計 8 本がユーザの視界を囲むように配置してあり、装着者の視界前方にみえる針金の長さは約 35 cm、針金が描く円周の直径は顔の手前では約 25 cm、針金の先端部分は約 15 cm で、先端が視界中心に集まるような形になっている。針金の長さは筆者がノートパソコンの作業を問題なくこなせる長さであり、この長さであれば一般的な作業は問題なくこなせると考えた。

この針金に LED テープを取り付け、マイコンとスイッチで LED の点滅パターンを操作できるようになっている。前後方向のベクションはドットが視界中心から放射状に動くような視覚刺激で誘発できること [11, 18–20] から、LED はユーザの視界中心から放射状に配置されることになる。

3.4 視覚刺激

前方および時計回り方向のベクションを誘発する際の提案デバイスを装着したユーザの視界を図 3 に示す。なお、図 3 の視界映像は、LED の光をわかりやすくするために暗所で撮影した。LED の点滅によって誘発されるベクションは前方向、後ろ方向、時計回り方向、反時計回り方向の 4 種類である。これらはベクションに関する研究では被験者の前、後ろに進む方向と roll 方向のベクションがよく用いられること [4, 13] を参考に決定した。

図 3(a) は前方向のベクションを誘発する視覚刺激であり、ランダムに配置された LED が矢印の方向に移動する

ように点滅する。提案デバイスは LED の光を視界の中心から放射状に広がるように、かつユーザから見て奥から手前に迫ってくるようにユーザに見せることで前方向のベクションを誘発する。また図 3(b) は時計回り方向のベクションを誘発する視覚刺激で、提案デバイスは 1 列に並んだ LED の光を矢印の方向 (反時計回り方向) に回転させることで、ユーザに時計回り方向のベクションを誘発する。後ろ方向、反時計回り方向のベクションに関しては、それぞれ前方向、時計回り方向の反対の発光パターンにより誘発する。どの方向のベクションも LED の点滅間隔は 200 ms で、これは装着者が LED の光が移動していると認識できる速度である。また、一度に被験者の視界に入る LED の光はおよそ 15 個となっている。LED の点滅パターンは押しボタンスイッチによって自由に変更できる。

4. 評価実験

提案手法がベクションを利用する方法として効果的であることを調べるために評価実験を行った。

4.1 実験概要

ベクションを誘発する視覚刺激の提示方式の違いによる効果の差を知ることは、装着型デバイスによるベクションの利用を考えるうえで重要である。そこでシースルー型の HMD を用いてベクションを誘発する方法を光学シースルー方式、没入型 HMD を用いてベクションを誘発する方法をビデオシースルー方式、提案手法によりベクションを誘発する方法をリアル方式として、ベクションの提示方式の違いによるベクションの効果の差を比較する。

上記の目的のために 2 つの実験を行う。1 つ目はベクションの誘発性能の比較実験で、この実験では各提示方式で誘発するベクション強度に違いがあるかを調査する。2 つ目はベクションの重ね合わせに関する実験で、この実験では被験者が感じている外部環境のベクション強度が、各提示方式によって誘発されるベクションを重ね合わせることでどのように変化するかを調査する。実験は視覚刺激が被験者に知覚されやすいように暗い部屋で行う。また座位がベクションを感じやすい姿勢であること [5] から、被験者は椅子に座った状態で実験を行う。壁と椅子との距離は 2 m となっている。被験者は 20 代男性 7 名、女性 1 名である。なお、本実験は神戸大学大学院工学研究科倫理委員会の承認を得て行った。

4.2 ベクションの提示方式

各提示方式に対応したデバイスと視覚刺激を図 4 に示す。詳しい説明を以下に述べる。

光学シースルー方式

光学シースルー型の HMD を用いてベクションを誘発する方法で、ベクションを視界前方のディスプレイにベク

ションを感じる動画を出力することで誘発する。また被験者の視界は完全に遮られないので、被験者は現実世界を直接見られる。本実験では Microsoft 社の HoloLens 2 [21] を用いる。HoloLens 2 の視野角は 52° である。

光学シースルー方式で用いる視覚刺激は、リアル方式による視覚刺激と揃えるために、図 4 の (a), (d) のように、矢印の方向に緑のドットが動く映像を用いる。これらの動画を HoloLens 2 に出力して被験者にベクションを誘発する。

ビデオシースルー方式

ビデオシースルー方式は、没入型の HMD を用いてベクションを誘発する方法で、ベクションを仮想空間内のオブジェクトを動かすことで誘発する。つまりベクションは 3 次元的な映像の視覚刺激によって誘発される。また装着者の視界は完全に遮られており、被験者は外付けのカメラで撮影した視界映像を HMD に投影したものを見る。本実験では Oculus 社の Oculus Rift S を用いる [22]。現実世界を認識するためのカメラは Jabra 社の PanaCast [23] を使用し、Oculus Rift S の上部に取り付ける。PanaCast で撮影した映像を仮想空間の背景として投影することで現実世界を知覚する。PanaCast の視野角は 180° であり、Oculus Rift S を装着した人の視界が妨げられることはない。

ビデオシースルー方式で用いた視覚刺激は図 4 の (b), (e) である。なお、4(b) は被験者に前方向のベクションを誘発する視覚刺激を横から撮影したもので、オブジェクトが立体的に配置されていることがわかる。矢印はオブジェクトの動く方向を表している。被験者にこの緑のオブジェクトが動く映像を見せることでベクションを誘発する。

リアル方式 (提案手法)

リアル方式は、提案手法によりベクションを誘発する方法で、立体的に配置された LED を流れて動くように点滅させることでベクションを誘発する。また装着者の視界は完全に遮られることなく、ディスプレイを介さずに現実世界を直接見られる。リアル方式には、提案手法を実装した提案デバイスを用いた。リアル方式の視覚刺激は、図 4 の (c), (f) のように 3.4 節で記述した LED の光らせ方を実装したものである。

4.3 ベクションの評価方法

ベクション強度の評価には主に外部の刺激から感じる感覚を数値で評価する方法として他のベクションに関する研究でも用いられているマグニチュード評価法を用いる [13]。本実験で用いるマグニチュード評価法では、実験を行う前に被験者にベクションの基準動画をみせ、ベクション強度を評価する基準を作らせる。実験中、被験者はその基準をもとにベクション強度を数値で回答する。

ベクション強度の評価基準となる動画を図 5 に示す [24, 25]。基準となる動画は前方向、後ろ方向、時計

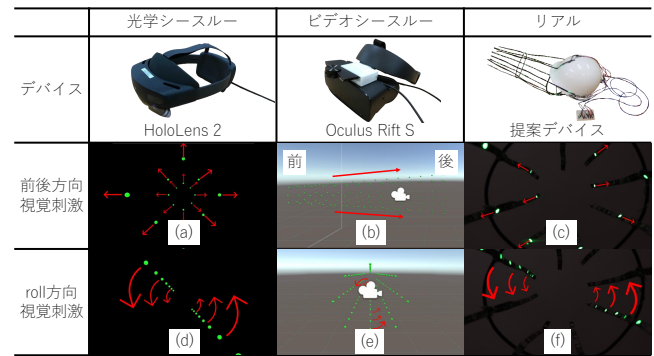
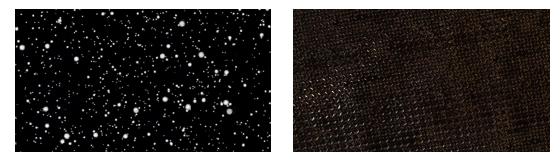


図 4: 実験で使用するデバイスと視覚刺激



(a) 前, 後ろ方向 [24] (b) 時計, 反時計回り方向 [25]

図 5: ベクション強度評価の基準となる動画

回り方向、反時計回り方向の 4 種類である。図 5(a) は前方向と後ろ方向のベクションを誘発する動画で [24]、前方向のベクションを誘発するときは白いドットが膨張しながら放射状に広がり、後ろ方向のベクションを誘発するときは縮小しながら中心に集まるように動く。図 5(b) は時計回り方向と反時計回り方向のベクションを誘発する動画で [25]、時計回りのベクションを誘発するときは模様が画面の中央を中心として反時計回りに回り、反時計回りのベクションを誘発するときは時計回りに回る。本実験ではこれらの動画を壁にプロジェクタで投影した。投影した動画の大きさは横 190 cm, 縦 120 cm である。ベクション強度の基準は評価基準となる動画を被験者が見たときに感じるベクション強度を 100 とし、視覚刺激や外部環境による刺激を与えていないときに感じるベクション強度を 0 とした。実験中に感じたベクション強度が基準の動画に比べて半分であれば 50, 倍であれば 200 というように回答させた。また壁に投影する基準動画は、4.5 節で述べる評価実験 2 のベクションの重ね合わせにおける外部環境のベクションとしても利用する。

4.4 評価実験 1: ベクションの誘発性能の比較

この実験では 3 つのベクションの提示方式でベクションの誘発性能に違いがあるのかを比較する。

実験手順

被験者は、デバイスを装着し、30 秒間視覚刺激を提示する。その後、被験者は視覚刺激が提示されているときに感じたベクションを 4.3 節の評価方法に従って数値で回答した。視覚刺激を提示した順番は、はじめに前方向のベクションの誘発について提示方式ごとに比較し、その後、後ろ方向、時計回り方向、反時計回り方向のベクションの順

とした。被験者が装着するデバイスの順番は被験者ごとにランダムとした。視覚刺激を提示しているときは、視覚刺激ではなく壁を見るように意識させた。

実験結果と考察

各提示方式でベクションを誘発したときに各被験者が感じたベクション強度について、提示方式と誘発したベクションの方向の2要因で参加者内分散分析を行ったところ、有意な差は認められず、提示方式によってベクションの誘発性能に差があるとはいえなかった。

個人差に着目すると、光学シースルー方式において被験者BとCが、ビデオシースルー方式において被験者BとGが、リアル方式において被験者Gが時計回り方向と反時計回り方向で感じたベクション強度が0と回答した。これは時計回り方向と反時計回り方向のベクションを日常で感じる機会が少ないため、うまくベクションが誘発されなかったことが原因だと考えられる。

今回の実験では提示方式において有意差は認められなかったため、ベクションを誘発するデバイスによってベクションの誘発効果に差があるとはいえなかった。しかし、被験者によってベクションを感じやすい提示方式があったため、個人ごとに感じやすいベクションの提示方式がわかれば、個人ごとに適した提示方式を用いることで、効果的なベクションの利用が可能になると推測できる。本研究で提案したリアル方式では、基準動画より効果は小さいが、ベクションを誘発できた。そのため先行研究で行われていた、ベクションを利用して歩行方向を誘導することや、階段を上る動作を楽に感じさせることを、環境にベクション誘発装置を設置せず、視界を遮らず日常生活で使える装着型デバイスを用いて行えるのではないかと考える。このようにベクション誘発装置を装着型デバイスに置き換えることで、ベクションを誘発させたくない人や、誘導する方向が違う人に対応できるようになる可能性がある。

4.5 評価実験 2: ベクションの重ね合せ

この実験では外部環境からベクションを感じている際に、デバイスを使ってベクションを誘発することで、被験者が外部環境から感じるベクション強度は変化するかと、その変化に提示方式間の違いがあるのかを調査する。

実験手順

本実験では4.3節で述べたベクションの評価の基準として採用した動画をプロジェクタで投影し、外部環境のベクションとして想定する。被験者はまず、プロジェクタで投影した基準動画を30秒間見る。その後、被験者は目の前の壁にベクションの基準動画がある状態で各デバイスを装着し、視覚刺激を提示した。実験で前方向のベクションの基準動画に各提示方式で前、後ろ、時計回り、反時計回り方向の順でベクションを重ね合せ、被験者はプロジェクタで投影した基準動画から感じたベクション強度を数値で回答

させた。その後、後ろ、時計回り、反時計回り方向のベクションの基準動画に同様の手順でベクションを重ね合わせた。視覚刺激を提示する時間は30秒で、被験者が装着するデバイスの順番はランダムとした。外部環境のベクションとしてベクション強度の基準動画を用いたため、被験者の回答した値が100未満なら被験者が感じた外部環境のベクション強度は減少、101以上なら増加、100なら変化しなかったとわかる。

また、デバイスによる視覚刺激を提示しなくてもデバイスを装着しただけで、被験者が外部環境から感じるベクション強度が変化する可能性が考えられる。そこで視覚刺激を提示せずにデバイスを装着したときの外部環境ベクションの変化をベクションの阻害度とし、各提示方式で視覚刺激を提示していない状態で被験者が感じるベクション強度を回答させた。

実験結果

外部環境のベクションに各提示方式による視覚刺激を重ね合わせたときのベクション強度について、4つの外部環境のベクションの方向、3つの提示方式、各提示方式で誘発した4つのベクションの方向の3要因に対して、 $4 \times 3 \times 4$ の条件で参加者内分散分析を行った。その結果、外部環境ベクションの方向とデバイスで誘発したベクションの方向に有意差 ($F(9, 63)=3.46, p < 0.05$) が見られた。そこで外部環境のベクションの方向と、各提示方式で誘発したベクションの方向の各要素の交互作用に対して検定をした結果、前方向と後ろ方向の外部環境ベクションに対して、提示方式で誘発したベクションの方向の項目で有意傾向 (外部環境のベクションの方向、前: ($F(3, 21)=2.48, p < 0.10$), 後ろ: ($F(3, 21)=2.68, p < 0.10$)) が認められた。また時計回り方向と反時計回り方向の外部環境ベクションに対しては、提示方式で誘発したベクションの方向の項目で有意差 (外部環境のベクションの方向、時計回り: ($F(3, 21)=5.38, p < 0.01$), 反時計回り: ($F(3, 21)=3.51, p < 0.05$)) が認められた。そこで下位検定としてLSD法を用いて多重比較を行った。その結果、有意傾向、または有意差が認められた組合せを図6~9に示す。グラフは被験者が感じたベクション強度の平均で、エラーバーは分散誤差を表す。松田らの先行研究 [4] から、異なる方向のベクションが混在する視覚刺激では、直線方向と回転方向のベクション強度に負の相関があるので、直線方向と回転方向のベクションを重ね合わせるとベクションは打ち消し合うと予想できる。実際に実験結果から、いくつかのベクションの重ね合せでベクションを減少させる結果が得られた。

前方向の外部環境ベクションにおける重ね合せ

前方向の外部環境ベクションでは、後ろ方向のベクションの重ね合せに比べ前方向のベクションの重ね合せでベクション強度が有意に大きかった ($MSe=33, p < 0.05$)。この結果を示す図6をみると、前方向の外部環境ベクシ

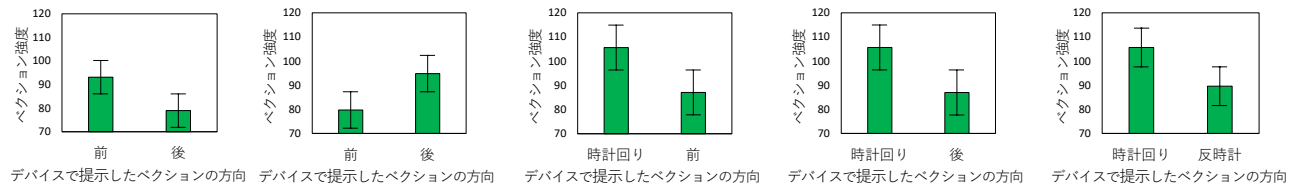


図 6: 前方向の外部環境ベクシオンへの重ね合せ 図 7: 後ろ方向の外部環境ベクシオンへの重ね合せ (a) 時計回りと前方向の比較 (b) 時計回りと後ろ方向の比較 (c) 時計回りと反時計回り方向の比較

図 8: 時計回り方向の外部環境ベクシオンへの重ね合せ

ンでは前方向のベクシオンの誘発に比べ、後ろ方向のベクシオンの誘発でベクシオン強度が減少している。したがって、ユーザが前方向のベクシオンを感じているときはデバイスで後ろ方向のベクシオンを重ね合わせることで、ユーザが感じるベクシオンを効果的に減少させられる。

後ろ方向の外部環境ベクシオンにおける重ね合せ

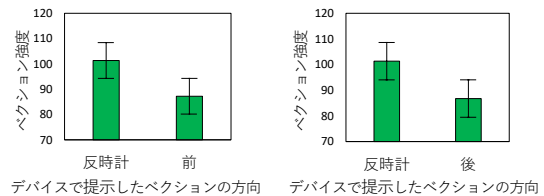
後ろ方向の外部環境ベクシオンでは、前方向ベクシオンの重ね合せに比べ後ろ方向のベクシオンの重ね合せでベクシオン強度が有意に大きかった ($MSe=38, p < 0.05$)。この結果を示す図 7 をみると、後ろ方向の外部環境ベクシオンでは後ろ方向のベクシオンの誘発に比べ、前方向のベクシオンの誘発でベクシオン強度が減少している。したがって、ユーザが後ろ方向のベクシオンを感じているときはデバイスで前方向のベクシオンを重ね合わせることで、ユーザが感じるベクシオン強度を効果的に減少させられる。

時計回り方向の外部環境ベクシオンにおける重ね合せ

時計回りの方向の外部環境ベクシオンでは前方向、後ろ方向、反時計回り方向のベクシオンの重ね合せに比べ、時計回り方向のベクシオンの重ね合せでベクシオン強度が有意に大きかった ($MSe=36, p < 0.05$)。これらの結果を表した図 8 をみると、時計回り方向の外部環境ベクシオンでは、時計回り方向のベクシオンの誘発に比べて、前方向、後ろ方向、反時計回り方向のベクシオンの誘発でベクシオン強度が減少している。したがってユーザが時計回り方向のベクシオンを感じているときは、前方向、後ろ方向、反時計回り方向のベクシオンを重ね合わせることでユーザが感じるベクシオン強度を減少させられる。また、有意差は認められなかったが、時計回り方向の外部環境ベクシオンでは、時計回り方向のベクシオンを誘発するとベクシオン強度が増加した。

反時計回り方向の外部環境ベクシオンにおける重ね合せ

反時計回りの外部環境ベクシオンでは前方向、後ろ方向のベクシオンの重ね合せに比べ、反時計回り方向のベクシオンの重ね合せでベクシオン強度が有意に大きかった ($MSe=34, p < 0.05$)。これらの結果を表す図 9 をみると、反時計回り方向のベクシオンの誘発に比べて、前方向、後ろ方向のベクシオンの誘発でベクシオン強度が減少している。したがって、ユーザが反時計回り方向のベクシオンを感じているときは、前方向、後ろ方向のベクシオンを重ね



(a) 反時計回りと前方向の比較 (b) 反時計回りと後ろ方向の比較

図 9: 反時計回り方向の外部環境ベクシオンへの重ね合せ

合わせることでユーザが感じるベクシオン強度を効果的に減少させられる。また、有意差は認められなかったが、反時計回り方向の外部環境ベクシオンでは、反時計回り方向のベクシオンを誘発するとベクシオン強度が増加した。

考察

実験結果から特定のベクシオンの重ね合せで外部環境のベクシオンが減少することが確認された。よって、外部環境から感じるベクシオンが引き起こす、画面酔いなどの身体ストレスを装着型デバイスによるベクシオンの重ね合せで軽減できる可能性がある。装着型デバイスにより身体ストレスを解決する方法は、外部環境のベクシオン自体には手を加えないのでユーザ以外の人間に悪影響を及ぼすことはない。例えば、画面酔いを起こしやすい映画を視聴するときには、酔いやすい人は装着型デバイスでベクシオンを重ね合わせて画面酔いを防ぎ、酔いにくい人はそのままの臨場感で楽しむことができる。

時計回り方向と反時計回り方向の外部環境のベクシオンで、前後方向のベクシオンを重ね合わせると、被験者が感じるベクシオン強度が減少したのは松田らの研究結果と一致する [4]。また、外部環境のベクシオンと反対方向のベクシオンの重ね合せによって被験者が感じるベクシオン強度は、外部環境のベクシオンが時計回り方向か反時計回り方向で異なる結果となった。前後方向の外部環境ベクシオンにおける重ね合せでは外部環境のベクシオンと反対方向のベクシオンの重ね合せで外部環境のベクシオン強度を減少させられたが、時計回りと反時計回りの外部環境のベクシオンにおいても同様の結果が得られるかどうかについては更なる検討が必要である。

本実験では提示方式の違いによるベクシオン強度や阻害度に有意な差は認められなかった。外部環境のベクシオンの阻害度について、ビデオシースルー方式で阻害度が大き

い可能性が高いと予想していたが、有意差は認められなかった。これは被験者が各デバイスを装着するのにかかる時間が関係していると考えられる。光学シースルー方式、リアル方式ではデバイスの装着時に時間はかからなかったが、ビデオシースルー方式では被験者にHMDを装着させるときにHMDに取り付けたカメラの起動に時間がかかることがあった。このとき被験者の視界はしばらく遮られるため、装着前と装着後のベクシオン強度の比較ができず、デバイスの装着による外部環境のベクシオン強度の変化が正しく感じられなかった可能性がある。

5. まとめ

本研究では、現実世界を直接見ながらベクシオンを誘発できるよう、LEDを用いたベクシオン誘発手法を提案した。提案手法がベクシオンを誘発する方法として有効かを調べるために、シースルー型のHMD、没入型のHMD、提案手法の3つの方式で、ベクシオンの誘発性能とベクシオンの重ね合せについて比較する実験を行った。ベクシオンの誘発性能に関する実験では、各提示方式で誘発するベクシオン強度に違いがあるかを調査した。ベクシオンの重ね合せに関する実験では、プロジェクタで投影した動画から感じるベクシオンに対し、デバイスの視覚刺激によるベクシオンを重ね合わせることでユーザが感じるベクシオン強度に違いがあるかを調査した。誘発するベクシオン強度の違いについては、実験結果から提示方式の違いによるベクシオンの誘発性能に有意な差は認められなかったが、提案手法においてもベクシオンの誘発が確認できた。また、ベクシオンの重ね合せの実験からは特定のベクシオンを誘発することで外部環境のベクシオンを減少させられることがわかった。

謝辞 本研究の一部は、JST CREST(JPMJCR18A3)の支援によるものである。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- [1] 妹尾武治, 永田喜子: 没入傾向とベクシオン強度は相関するか? 没入感に関する挑戦的研究, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 21, No. 1, pp. 3–6 (Mar. 2016).
- [2] 吉川博美, 蜂須 拓, 福島政期, 吉川正紘, 梶本裕之: ベクシオン場による歩行誘導手法の提案, 情報処理学会インタラクシオン 2011 論文集, pp. 1–4 (Mar. 2011).
- [3] 名古屋電機工業株式会社: 走光型運転支援灯システム「BLINKs」, <https://www.itsie-nagoyadenki.jp/information-equipment/blinks.html>.
- [4] 松田あゆみ, 荻原息吹, 松室美紀, 柴田史久, 木村朝子: 運動方向の異なる視覚刺激が混在する場合のベクシオン効果の分析, 情報処理学会研究報告, Vol. 2021, No. 15, pp. 1–8 (Mar. 2021).
- [5] 森将輝, 妹尾武治: 姿勢の違いがベクシオンに及ぼす影響, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 22, No. 3, pp. 391–394 (Mar. 2017).
- [6] R. Held, J. Dichgans, and J. Bauer: Characteristics of Moving Visual Scenes Influencing Spatial Orientation, *Vision Research*, Vol. 15, No. 3, pp. 357–365 (Mar. 1975).
- [7] A. Berthoz, B. Parvard, and L. R. Young: Perception of Linear Horizontal Self-Motion Induced by Peripheral Vision (Linear Vection) Basic Characteristics and Visual Vestibular Interactions, *Experimental Brain Research*, Vol. 23, No. 5, pp. 471–489 (Apr. 1975).
- [8] F. Lestienne, J. Soechting, and A. Berthoz: Postural Readjustments Induced by Linear Motion of Visual Scenes, *Experimental Brain Research*, Vol. 28, No. 3, pp. 363–384 (June 1977).
- [9] T. Brandt, J. Dichgans, and E. Koneig: Differential Effects of Central Versus Peripheral Vision on Egocentric and Exocentric Motion Perception, *Experimental Brain Research*, Vol. 16, No. 5, pp. 476–491 (Mar. 1973).
- [10] X. M. Sauvan and C. Bonnet: Properties of Curvilinear Vection, *Percept Psychophys*, Vol. 53, No. 4, pp. 429–435 (July 1993).
- [11] H. Ito and I. Shibata: Self-Motion Perception from Expanding and Contracting Optical Flows Overlapped with Binocular Disparity, *Vision Research*, Vol. 45, No. 4, pp. 397–402 (Feb. 2005).
- [12] I. P. Haward and T. Heckmann: Circular Vection as a Function of the Relative Sizes, Distances, and Positions of Two Competing Visual Displays, *Perception*, Vol. 18, No. 5, pp. 657–665 (Oct. 1989).
- [13] 川島祐貴, 福島一帆, 金子寛彦, 内川恵二: 異なった速さをもつ2種類のオブティカルフローにより生起するベクシオンの速さ評価, 視覚の科学, Vol. 33, No. 4, pp. 152–163 (Dec. 2012).
- [14] 大野さちこ, 鶴飼一彦: Head Mounted Display をゲームに使用して生じる動揺病の自覚評価, 映像情報メディア学会誌, Vol. 54, No. 6, pp. 887–891 (June 2000).
- [15] J. D. Moss, J. A. Salley, J. Coats, K. Williams, and E. R. Muth: The Effects of Display Delay on Simulator Sickness, *Displays*, Vol. 32, No. 4, pp. 159–168 (Oct. 2011).
- [16] T. Shibata, J. Kim, D. M. Hoffman, and M. S. Banks: The Zone of Comfort: Predicting Visual Discomfort with Stereo Displays, *Journal of Vision*, Vol. 11, No. 8, pp. 1–29 (July 2011).
- [17] 岡野 裕, 雑賀慶彦, 橋本悠希, 野嶋琢也, 梶本裕之: 速度感覚増強のための周辺視野への刺激提示手法の検討, 情報処理学会研究報告ヒューマンコンピュータインタラクシオン, Vol. 2008, No. 11, pp. 145–150 (Feb. 2008).
- [18] M. Ohmi and I. P. Howard: Effect of Stationary Objects on Illusory Forward Self-Motion Induced by a Looming Display, *Perception*, Vol. 17, No. 1, pp. 5–11 (Feb. 1988).
- [19] S. Palmisano: Perceiving Self-Motion in Depth: The Role of Stereoscopic Motion and Changing-Size Cues, *Perception and Psychophysics*, Vol. 58, No. 8, pp. 1168–1176 (Aug. 1996).
- [20] S. Palmisano, B. J. Gillamm, and S. G. Blackburn, Global-Perspective Jitter Improves Vection in Central Vision, *Perception*, Vol. 29, No. 1, pp. 57–67 (Jan. 2000).
- [21] Microsoft: HoloLens 2, <https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens/hardware>.
- [22] Oculus: Oculus Rift S, <https://www.oculus.com/rift-s/>.
- [23] Jabra: PanaCast, <https://www.jabra.jp/business/video-conferencing/jabra-panacast>.
- [24] 妹尾研究室 Seno LAB: A Typical Vection Stimulus, the Simplest Optical Flow (Gibson, 1966), <https://youtu.be/vsQSnAgfCwY>.
- [25] 時計回り方向ベクシオン基準動画, <https://www.youtube.com/watch?v=Q8h-ubpZK08>.