

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：32713

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12088

研究課題名(和文) 前庭眼反射を指標とした「酔い」原因である感覚の不一致の画期的定量評価法の開発

研究課題名(英文) Development of a new method with the vestibulo-ocular reflex to evaluate mismatch among modalities causing "sickness"

研究代表者

加藤 弓子 (Kato, Yumiko)

聖マリアンナ医科大学・医学部・研究員

研究者番号：10600463

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、仮想現実(VR)や拡張現実(AR)の安全な利用に向けて、「酔い」の原因とされる感覚の不一致を客観的に評価する方式を検討した。評価指標として、頭部運動に対する眼球の反射である、前庭眼反射(Vestibulo-ocular reflex: VOR)の量的変化を用い、複数感覚共通の空間知覚精度の測定の可能性を見出した。視覚の空間位置のあいまいさの程度がVORに反映されることを明らかにし、知覚される位置の精度をVORで評価する可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年仮想現実(VR)や拡張現実(AR)からメタバースへとマルチモーダルな情報提示あるいはコミュニケーション技術が急速に発展普及しつつある。しかしながら、VR・AR酔いおよびそれらの使用による疲労、不快感について十分な研究と対策がなされてはならず、メタバース利用による酔いや疲労による事故や問題の可能性は、技術応用の妨げになりかねない。近年のインタフェース技術の展開の速さに対して、システムが全体として人間にどのような影響を与えるかを評価するため、多種の感覚間の不一致を量的に評価する手段を開発した。

研究成果の概要(英文)：In this study, to get the index for safe use of VR and/or AR, we investigated a estimation method for mismatch among modalities which can causes 'motion sickness.' As an evaluation index, using the quantitative change of the vestibulo-ocular reflex (VOR), we found the possibility of estimating the perceived position accuracy common to modalities. VOR is the reflex of the eye motion corresponding to the head movement. We found the degree of ambiguity of the visual spatial position is reflected in the VOR gain, it suggested that evaluating the accuracy of the perceived position by the VOR gain.

研究分野：耳科学

キーワード：前庭眼反射 眼球運動計測 空間知覚 感覚間不一致 聴覚刺激 音源定位

1. 研究開始当初の背景

2009年に3D映画「アバター」が公開されると同時に、VR(仮想現実)酔いが話題となり、映像酔いを防止するための業界基準が設定された。その後VR、AR(拡張現実)技術はエンタテインメントから、医療、産業を支える基本的な技術として浮上してきた。しかし、VR・AR酔いおよびVRの使用による疲労、不快感についての研究と対策はいまだ十分とはいえない。近年では、マルチモーダルなインタフェース技術の展開は目を見張るものがあり、システムが全体として人間にどのような影響を与えるかの検討が視覚と聴覚との関係を中心に進んでいる。

「酔い」については動揺病として乗り物酔いを中心に前庭感覚と視覚刺激等との感覚間の入力の不一致によるものとして、研究がなされてきた。前庭感覚は空間知覚の中でも、自身の前後左右、上下の座標軸の基礎をなす感覚である。前庭感覚と他の感覚との関係を検討するため、我々は、前庭眼反射

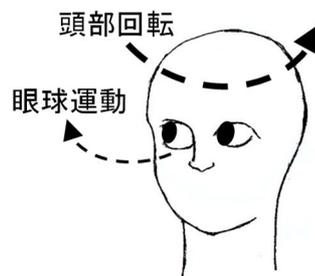


図1

(Vestibulo-ocular reflex: VOR)と、視覚、聴覚、体性感覚との関係について研究を行ってきた。前庭眼反射(VOR)は、図1のように頭部の回転に対して逆の方向に眼球を動かすことで、固視を維持する反射であるが、固視する対象のない暗闇では、頭部回転に対する眼球の回転量(VORの利得)は100%ではない。絶対位置が固定された(Earth Fixed: EF)視覚刺激(固視点)がある場合には、VORの利得はほぼ1すなわちほぼ100%になり、頭部との相対位置が固定された(Head Fixed: HF)の視覚刺激がある場合にはVORが抑制され、ほぼ0すなわち眼球の動きはほとんどない状態となることが知られている。これまで我々は、EF条件の聴覚刺激と体性感覚刺激がVORの利得を増加させる一方で、HF条件の聴覚刺激はVORの利得に影響を及ぼさないことを明らかにしてきた。これらは、感覚によってVORへの影響が異なり、「酔い」の原因となる感覚間の入力の不一致の度合いも異なる可能性を示している。「酔い」を防ぎ、マルチモーダルインタフェースを快適に使用するための基準を策定するためには、感覚間の不一致を量的に計測する方法が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、VRやARの有効で安全な利用に向けて、複数種の感覚の不一致を客観的に比較可能な指標を作ることに挑戦してきた。前庭感覚による反射であるVORでは、視覚等其他の感覚入力の影響を受けて、眼球の運動量に変化が起こる。この、他の感覚入力の影響がVORの利得という量として観測可能であることを利用して、VORの利得により、各感覚における自己の運動あるいは移動の感覚を指標化することを目指した。空間位置に対する感覚間の不一致を量的に示すためには、感覚による空間知覚の精度あるいは強度を比較可能にする必要がある。我々は、まず、眼球運動と直接に関わる視覚刺激の強度や広がり、あいまいさがVORに及ぼす影響を定量化し、視覚刺激で定量化された関係が他の感覚へも適用可能か検証することを目指している。本研究では、(1)視覚刺激の強度と空間的なあいまいさとVORの利得との関係を明らかにし、さらに、(2)VORの利得を用いて、聴覚刺激によって知覚される、空間位置の強度とあいまいさを推定する可能性を検討しようとした。

3. 研究の方法

VORは頭部に回転を加え、頭部の回転に伴う眼球運動を観察する。頸部の筋によるほかの反射や体性感覚の影響を除くため、被験者の動作を伴わずに頭部に回転を与える回転椅子と、椅子の回転に伴って視覚刺激を制御する実験システムを構築し、視覚刺激の強度や広がり、あいまいさがVORに及ぼす影響を定量化する実験を行った。前庭刺激のみ、すなわち椅子の回転のみを提示した際のVORの利得を基準とし、椅子の回転と同時に、明るさと輪郭線のぼけ度合いの異なる視覚刺激を提示した際のVOR、視覚刺激のみを提示した際のVORとの比較を行った。さらに、聴覚刺激のVORへの影響を視覚刺激の場合と比較するため、仮想音源による聴覚刺激の提示を試みた。

(1) 実験システムの概要

実験システムは、前庭刺激を提示する回転椅子と、視覚刺激を提示するプロジェクタと、聴覚刺激を提示するヘッドホンを用意している。また、眼球運動を記録するための赤外線ビデオカメラと赤外線の光源を備えたゴーグルを含む。回転椅子の回転動作と、視覚刺激および聴覚刺激の提示とはそれぞれコンピュータによって制御されている。回転椅子の制御を行う制御電圧が、視覚刺激の制御を行うコンピュータへも入力されることで、椅子の回転と視覚刺激の同期がとられている。視覚刺激を行うコンピュータは、眼球運動を記録するビデオカメラからの画像を取得し、眼球の水平方向、垂直方向および回旋の運動を抽出して椅子の回転運動と合わせ、動画とともに記録する。図2は本研究で用いた実験システムの概略図である。回転椅子は図3左の写

真のような円筒形の構造物内に設置されており、完全に遮光されている。円筒の内部は図3右のように白色のスクリーンとして機能する。被験者はビデオカメラを搭載したゴーグルを装着して椅子に腰かける。椅子は頭部中心を軸に回転する。図4上は、ゴーグルを装着した状態である。ゴーグルには図4下の楕円部分に LED 赤外線光源と赤外線小型カメラが搭載されており、左右の眼球をそれぞれ撮影する。図5は眼球運動を記録中のソフトウェアの表示画面である。右上隅に左右の眼球の画像が表示され、緑の円として示されている部分は画像中で抽出された瞳孔位置である。瞳孔の中心位置によって眼球の位置が計算される。図中のグラフは上段に水平眼球運動、中段に垂直眼球運動、下段に椅子の振り様回転が示されている。

(2) 実験システムの構築

2019年度には、既存の回転椅子による前庭刺激システムを基礎に、前庭刺激と同期して視聴覚刺激を提示可能な、感覚統合実験システムのうち、視覚刺激の提示と眼球運動の記録を行うソフトウェアを開発した。2020年度には、回転椅子と同期して移動する仮想音源による聴覚刺激を提示する機能を追加した。仮想音源は、東北大学電気通信研究所で実績のある、頭部伝達関数による聴覚刺激作成方法とパニングによる補間方法を採用した。

(3) 視覚刺激による実験

前庭刺激として、回転椅子による水平方向の振り様回転を用い、実験条件として、前庭刺激と視覚刺激が同時に提示される2つの条件、視覚刺激の絶対位置が固定されている Earth Fixed (EF) 条件、視覚刺激が被験者頭部正面に固定されている Head Fixed (HF) 条件、椅子が回転しない、すなわち前庭刺激がなく、視覚刺激のみが振り様に頭部の周辺を回転する Pursuit (P) 条件で実験を行った(図6)。コントロールとして、視覚刺激のな

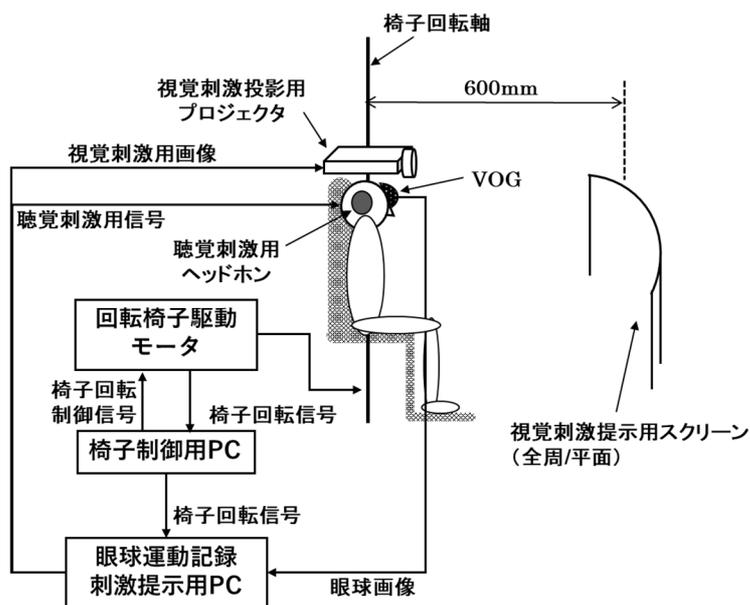


図2



図3



図4

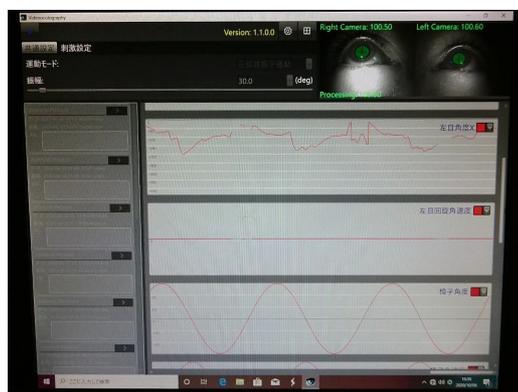
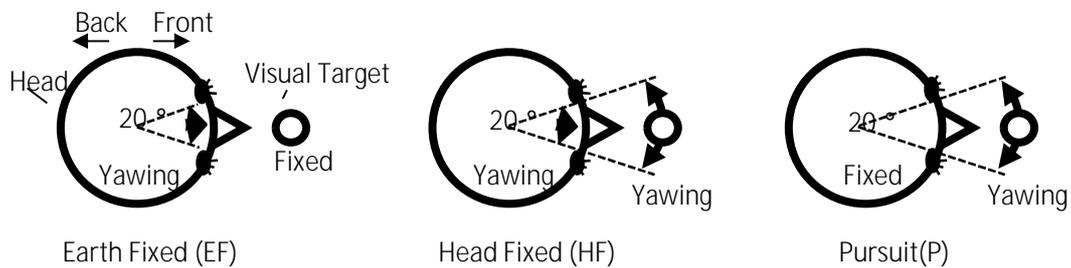


図5



$$\text{VORの利得} = \frac{\text{眼球運動振幅}}{\text{頭部回転振幅}}$$

図 6

い暗条件での計測も行った。前庭刺激は左右に一定幅で体をゆする刺激であり、回転速度が正弦波状に変化する（図 5 下段の表示）。回転の幅（振幅）は 20°、周波数は 0.32Hz、最大角速度は 20°/秒とした。視覚刺激は、図 7 に示す、赤色の円形図形を使用した。明るさは、中心位置で 10LX と 0.4LX の 2 種類、輪郭のぼけ度合いは直径が視度 1 度の明瞭な円と、その円の輪郭をガウス関数により視度 20°までぼかしたもの、40°までぼかしたものの 3 種類で、6 種類とした。すべての被験者で、3 つの実験条件と、6 種類の視覚刺激の組み合わせによる 18 種類とコントロールの暗条件との 19 の条件で VOR を記録し、椅子または視覚刺激の回転速度の振幅に対する眼球運動の速度の振幅を利得として計算し、分析を行った。

（4）聴覚刺激の検討

当初の予定では、視覚刺激による実験に基づいて、視覚刺激の結果と比較可能な聴覚刺激を検討する予定であったが、先行して作成したソフトウェアによる仮想音源の音源定位について、頭部伝達関数の個人差による定位位置の変動等について、数名の被験者による視聴により検討を行った。

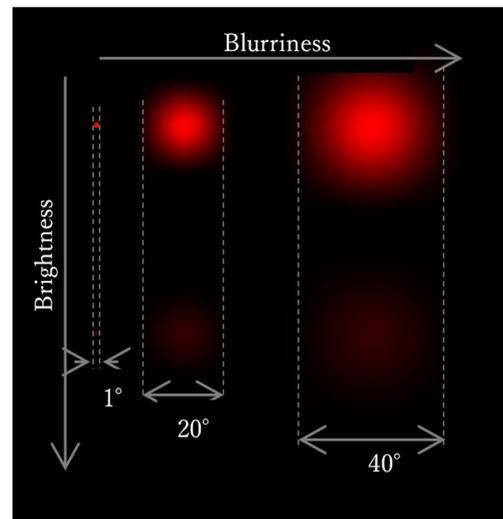


図 7

4. 研究成果

2020 年度以降の COVID-19 の影響により、被験者を募集しての実験が困難になった。視覚刺激による実験は 2020 年度には十分な被験者をそろえることができず、2021 年度までの 2 年間で 20 名での実験結果を得ることができた。視覚刺激による実験の検証が十分でないままに、聴覚刺激を提示するシステムを先行して構築したが、視覚刺激と比較しうる聴覚刺激の準備には至らなかった。

（1）視覚刺激による実験結果

視覚刺激を用いて空間位置のあいまいさと VOR の利得との関係を検討した結果、頭部との相対位置が固定された (HF) 刺激があることによる VOR の抑制量として、知覚された空間位置の精度を評価しうる事が示唆された。

健常成人 20 名での実験結果を図 8 に示す。EF 条件ではすべての視覚刺激で提示によりコントロールに比較して VOR の利得は増大した。一方、HF 条件では視覚刺激の提示により VOR は抑制された。EF 条件では刺激の明暗による VOR の差は有意であったが、ぼけ度合いでは VOR に有意な影響は見られなかった。HF 条件では刺激の明暗とぼけ度合いのいずれも VOR に有意な影響を及ぼした。P 条件では明暗による VOR の差が有意だった。輪郭線が明瞭な視度 1° の刺激では明暗による VOR の差はなく、視度 20° と 40° に輪郭がぼけた刺激では明暗により VOR の利得に有意な差が見られた。HF 条件では刺激の明るさにかかわらず、輪郭のぼけ度合いと VOR の利得との間に相関がみられ、各被験者の VOR の利得の大きさの順も一致していたが、EF 条件と P 条件では、暗い刺激でのみ輪郭のぼけ度合いと VOR の利得との間の相関と、判断順位のも一致が見られた。これらの結果より、我々は、VOR の利得を用いて、知覚された空間位置のあいまいさを評価できると考えた。特に、HF 条件での VOR の抑制量が指標として有望であると考えた。視覚刺激の空間位置のあいまいさと VOR の利得との関係をもとに、他のモダリティで知覚される空間位置の精度を評価する尺度を得る可能性が示された。

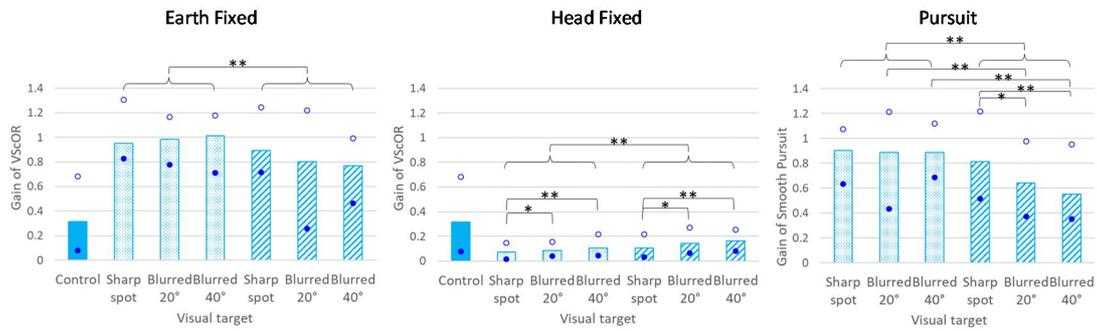


図 8

(2) 聴覚刺激の検討結果

聴覚刺激については、実験システムの構築を行ったが、仮想音源による実験の可能性を検討するとどまった。

表 1

n.s. : $p \geq 0.05$, * : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$

	Earth Fixed		Head Fixed		Smooth Pursuit	
	Bright	Dark	Bright	Dark	Bright	Dark
Correlation	n.s	**	**	**	n.s	**
Concordance	n.s	**	**	*	n.s	**

視覚刺激の移

動はプロジェクタを用いることで、画面内での位置および移動を比較的自由に設定することができる。しかしながら音源については、図3に示した環境でスピーカを動かすことは困難である。複数のスピーカを配置して、スピーカ間の音源についてはパニングを用いて仮想的に中間の音源を再現する方法はあるが、図3のように円筒の内面はスクリーンとして使用しており、スピーカを被験者に見えないように設置することも困難である。そこでヘッドホンによる仮想音源の提示により、視覚刺激と同等の実験が可能か否かを検討した。3名の健常成人により視聴を行った。頭部伝達関数は本来個人ごとに異なるため、正確な音源位置の再現には個人ごとに頭部伝達関数を計測する必要があるが、今回は日本人の平均として作成された頭部伝達関数を用いてピンクノイズの音源を移動させ、聴覚刺激のみを提示した際の定位位置と、視覚刺激との一致の状態を口頭で確認した。3名中2名では、方向のあるものとして意識し、聞きなれるまで、音源位置として特定の方向を知覚することができなかった。3名中2名で聴覚刺激が前方ではなく後方に定位された。また、視覚刺激と同時に提示した際には、3名とも前方に提示された視覚刺激との位置の不一致が大きく、音源は視覚刺激とは全く別の位置にあるものとして知覚された。日本人の平均として作成された頭部伝達関数を用いることで、聴覚の空間知覚による VOR への影響について大まかには検討可能であることを期待したが、頭部伝達関数の個人差による音源位置の違いは単純ではなく、特に他の感覚と合わせて提示した際の知覚は予測不能であることが示唆された。聴覚刺激については複数スピーカの配置等の実音源による提示方法を再度検討する必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 加藤 弓子
2. 発表標題 視刺激のあいまいさが半規管動眼反射に及ぼす影響
3. 学会等名 第79回日本めまい平衡医学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yumiko O. Kato, Koshi Mikami, Shuichi Sakamoto, Izumi Koizuka
2. 発表標題 Effect of Visual Target Ambiguity on the Semicircular Ocular Reflex
3. 学会等名 Association for Research in Otolaryngology 43th MidWinter Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yumiko O. Kato, Fumihiro Mochizuki, Koshi Mikami, Shuichi Sakamoto, Izumi Koizuka
2. 発表標題 Effect of Visual Target Ambiguity on the Semicircular Ocular Reflex
3. 学会等名 XXXI Barany Society Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	坂本 修一 (Shuichi Sakamoto) (60332524)	東北大学・電気通信研究所・教授 (11301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	三上 公志 (Koshi Mikami) (20434409)	聖マリアンナ医科大学・医学部・助教 (32713)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協 力 者	肥塚 泉 (Koizuka Izumi)	聖マリアンナ医科大学・医学部・教授 (32713)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関