

## 摘要

前庭動眼反射(以下VOR)とは、頭部運動と反対方向に生じる、反射性の不随意眼球運動である。VORは、頭部を能動的に動かしたときと、受動的に動かされたときで変化することが知られている。特に、搭乗型の装置でピッチ方向に能動的・受動的に回転した際に、VORを推定するモデル内のパラメータが変化することが示されている。しかし、ヨー方向でも同じようにVORが変化するのかは確認されていない。さらに、能動と受動の違いは、VORに影響を与えたが、能動における操作感の違いがVORに影響を与えるかは確認されていない。よって、本研究は、ヨー方向でもピッチ方向と同様のVORの変化を確認できるか検証することを1つ目の目的とする。さらに、能動における操作感の違いがVORに与える影響を検証することを2つ目の目的とする。

本研究では、上記の目的を検証するため、2つ実験を行った。まず、搭乗型の回転座席を用いて、ヨー方向に能動的・受動的に回転させた時のVORを計測する実験を行った。さらに、操作感が異なる操作パラメータを用いた搭乗型の回転座席をヨー方向に回転させる時のVORを計測する実験を行った。

実験の結果、能動より受動の方がVORの評価値が減少することが示された。さらに、操作パラメータの変化により、VORの評価値は減少することが示された。さらに、VORの評価値と操作性に関するアンケート結果の間に有意な正の相関が確認された。

これらの結果は、ヨー方向における能動と受動の違いがVORに変化を起こすことを示している。さらに、能動における操作感の変化がVORに影響を与える事が確認でき、VORが操作性の指標として用いることが可能であることが示唆された。

# 目次

第 1 章 緒言	1
第 2 章 前庭動眼反射を用いた数理モデル	3
2.1 前庭動眼反射	3
2.2 VOR 数理モデル	4
2.2.1 Merfeld モデル	4
2.2.2 6DOF-SVC モデル	5
2.3 能動/受動的な頭部運動の差による VOR への影響	7
第 3 章 実験 1(能動・受動時の VOR 比較実験)	9
3.1 目的	9
3.2 被験者	9
3.3 環境	9
3.3.1 回転座席	9
3.3.2 Tobii Glasses	10
3.3.3 固視点	11
3.3.4 周波数	12
3.4 実験要因	12
3.5 評価指標	12
3.6 手順	12
3.7 解析方法	13
3.7.1 解析データの抽出方法	13
3.7.2 モデルパラメータ $K_\omega$	13
3.7.3 VOR ゲイン	15
3.8 結果	16
3.8.1 パラメータ $K_\omega$	16
3.8.2 VOR ゲイン	17
3.8.3 相関	18
3.9 考察	19
第 4 章 実験 2(能動条件変化時の VOR 比較実験)	20
4.1 目的	20
4.2 被験者	20
4.3 環境	20
4.3.1 固視点	20
4.3.2 周波数	20

4.4 実験要因 . . . . .	21
4.5 評価指標 . . . . .	21
4.6 手順 . . . . .	21
4.7 解析方法 . . . . .	22
4.7.1 解析データの抽出方法 . . . . .	22
4.7.2 パラメータ $K$ の算出方法 . . . . .	22
4.7.3 アンケート . . . . .	22
4.8 実験結果 . . . . .	23
4.8.1 パラメータ $K_\omega$ . . . . .	23
4.8.2 パラメータ $K$ . . . . .	26
4.8.3 VOR ゲイン . . . . .	29
4.8.4 アンケート . . . . .	32
4.8.5 相関 . . . . .	37
4.9 考察 . . . . .	38
<b>第 5 章 結言</b>	<b>39</b>
5.1 結言 . . . . .	39
5.2 今後の展望 . . . . .	39
<b>参考文献</b>	<b>42</b>

# 第1章 緒言

前庭動眼反射 (Vestibulo-ocular reflex, 以下 VOR) とは、不随意眼球運動の一種で頭部の揺れが発生した際に、頭部運動と反対方向に働き、頭部運動を補正することで、網膜上に映る像のブレを抑制する眼球運動である。指標を注視しながらの頭部運動を行った場合、VOR がフィードフォワード的に動作することが知られている。この眼球運動のおかげで、電車や自動車の中で安定した網膜像を得ることができ、文字を読むことができる。VOR がフィードフォワード制御であることから、眼球を動かすために人は頭の中で頭部の動きを推定する、自己運動推定を行っていると考えられる。この推定される動きを VOR から抽出することが出来れば、実際の動きと推定される動きの比較を行うことが出来ると考えられる。人が搭乗型の機械操作を行うとき、人は機械の動きを推定しながら操作しており、その推定誤差が小さいほど操作性が高いと考えられる。よって、実際の動きと推定される動きを比較することで、その誤差から操作性の評価を行えると考えられる。

特に、搭乗型の機械を能動的に操作した際の自己運動推定を VOR の数理モデルにより評価した研究がある。VOR の特性を用いて上船等は、前庭性の動搖病発生率の計算を行う数理モデルに VOR を算出するパスを付加することにより、VOR 計算モデル（以下 6DOF-SVC モデル）を構築した。6DOF-SVC モデルは、Merfeld モデルと異なり、自己運動推定に関する処理過程を考慮できるという利点がある。それにより、上船等は搭乗型の装置の能動、受動による VOR の変化が、6DOF-SVC モデルの自己運動推定等に関連するパラメータ変化によって表現できることを示した。しかし、上船等は、ピッチ方向しか確認しておらず、ヨー方向でも同様に VOR に影響があるのかは確認されていない。さらに、能動、受動の差による VOR の変化は確認することが出来たが、能動における操作感の変化が VOR に影響を与えるかは確認されていない。実車への応用を考えると能動の中での VOR の変化も調査する必要がある。

よって、本研究は、ヨー方向における能動、受動による VOR の変化を確認できるか検証することを 1 つ目の目的とする。さらに、能動における操作感の変化が VOR に与える影響を検証することを 2 つ目の目的とする。

本研究では、上記の目的を検証するため、2 つ実験を行った。まず、搭乗型の回転座席を用いて、ヨー方向に能動的・受動的に回転させた時の VOR を計測する実験を行った。さらに、操作感が異なる操作パラメータを用いた搭乗型の回転座席をヨー方向に回転させる時の VOR を計測する実験を行った。

本論文では、第 2 章において、VOR を用いた数理モデルについて紹介する。まず、VOR がどのような運動情報を受けて発生するのかを説明し、次に、VOR の推定値を計算する数理モデルについて紹介する。さらに、VOR モデルを用いて運動の能動と受動の差と VOR の関係性を調査した研究を紹介する。

第3章では、ヨー方向に能動的・受動的に回転させた時のVORの変化を検証した実験について述べる。

第4章では、操作感が異なる操作パラメータを用いた搭乗型の回転座席をヨー方向に回転させる時のVORと操作性を評価した実験について述べる。

第5章では、結言として、本実験から明らかになったことを中心に本研究のまとめを述べる。また本研究の問題点や今後の課題を踏まえて、今後の展望を述べる。

# 第 2 章 前庭動眼反射を用いた数理モデル

本章では、前庭動眼反射を利用した数理モデルの説明をし、従来の数理モデルを応用した自己運動推定の研究の一例を紹介する。

## 2.1 前庭動眼反射

前庭動眼反射 (Vestibulo-ocular reflex, 以下 VOR) とは、頭部運動と反対方向に生じる、不随意な反射性の眼球運動のことである。VOR には、頭部運動による網膜上の像のぶれを補正する働きがあることが知られている (図. 2.1)。VOR の生成メカニズムに関しては、頭部運動により前庭感覚が刺激を受けたときに生じることが分かっている。指標を注視しながらの頭部運動を行った場合、VOR がフィードフォワード的に動作することが知られている [10]。具体的には前庭感覚系の感覚器である半規管が頭部の角速度に反応し、前庭神経核に支配されている外眼筋が刺激を受けて VOR が生じる [2]。この眼球運動のおかげで、自動車などの振動する乗り物の中で安定した網膜像を得ることができ、文字を読むことができる。

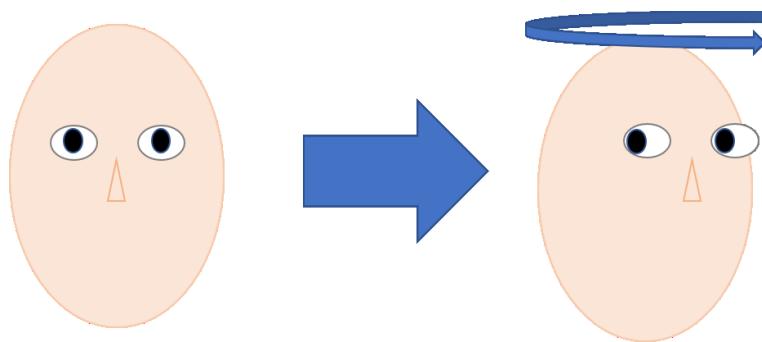


図 2.1: VOR の例

さらに、VOR を計算する数理モデルを用いた、VOR の評価手法が提案された [7]。VOR は、フィードフォワード制御であることから、人は頭の中で自己運動推定を行っていると考えられる。この推定される動きを VOR から抽出することができれば、実際の動きと推定される動きの比較を行うことが出来ると考えられる。実際の動きと推定される動きの誤差から操作性の評価を行えると考えられる。

## 2.2 VOR 数理モデル

本研究で用いた VOR モデルは動搖病発生率を計算する数理モデルに Merfeld らが構築した VOR モデルを組み合わせたものである(以下 Merfeld らの VOR モデルを Merfeld モデル, 我々の用いた VOR モデルを 6DOF-SVC モデルとする). 本節にて, これらのモデルについて説明し, 我々の用いた 6DOF-SVC モデルの利点を述べる.

### 2.2.1 Merfeld モデル

Merfeld らはリスザルを用いた実験に基づいて構築した VOR モデル [8] を基に, ヒトの VOR を計算する VOR モデル (Merfeld モデル) を構築した(図. 2.2)[1].

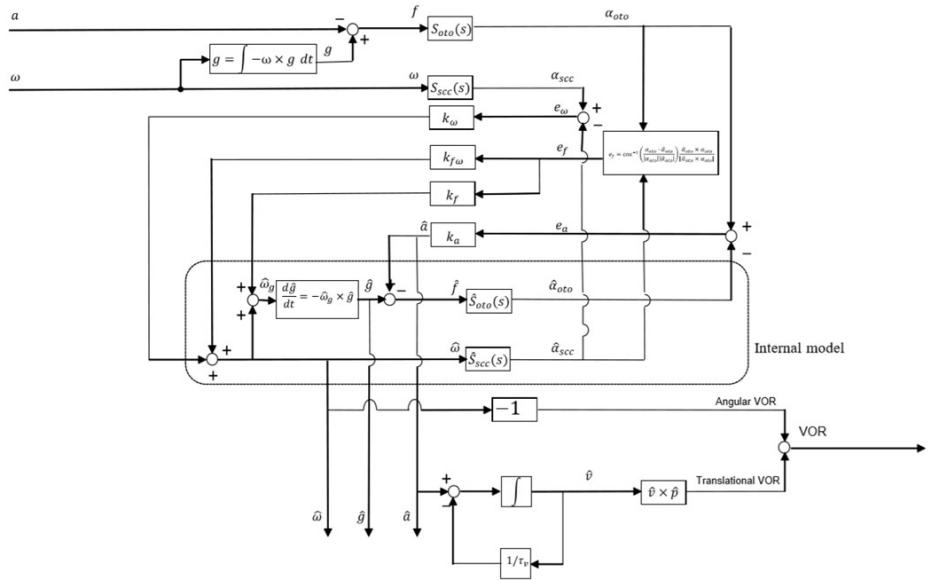


図 2.2: Merfeld モデル

Merfeld モデルはモデル入力を頭部の回転角速度  $\omega$  と並進加速度  $a$  とし, これらの刺激から得られるモデル出力を *VOR* としている. このモデルは 3 つのパーツ感覚器, 内部モデル, VOR 算出パスから成り立っている. この時, 頭部角速度と頭部加速度は 3 次元ベクトルであり, VOR は 3 次元ベクトルで眼球角速度の推定値である. eq.2.1 で表されるベクトル  $f$  は重力加速度  $g$  と  $a$  の差から求められる慣性力である.

$$f = g - a \quad (2.1)$$

$S_{oto}$  は耳石器,  $\hat{S}_{oto}$  はその内部モデルであり, それぞれ単位行列 (eq.2.2, 2.3) で表される.  $S_{scc}$  は伝達関数により半規管を表す伝達関数行列で,  $\hat{S}_{scc}$  はその内部モ

モデルを表している。

$$\omega_s = \frac{\tau_d \tau_a s^2}{(\tau_d s + 1)(\tau_a s + 1)} \mathbf{a}_{scc} \quad (2.2)$$

$$\hat{\omega} = \frac{\tau_d}{(\tau_d s + 1)} \hat{\mathbf{a}}_{scc} \quad (2.3)$$

内部モデルでは、感覚量と感覚推定量の誤差からフィードバック制御により推定値  $\hat{\omega}$ ,  $\hat{a}$ ,  $\hat{g}$  を計算している。ここで  $S_{oto}$ ,  $\hat{S}_{oto}$ ,  $S_{scc}$ ,  $\hat{S}_{scc}$  を経たのもをそれぞれ  $\alpha_{oto}$ ,  $\hat{\alpha}_{oto}$ ,  $\alpha_{scc}$ ,  $\hat{\alpha}_{scc}$  とする。 $e_\omega$  は  $\alpha_{oto}$  と  $\hat{\alpha}_{oto}$ ,  $e_a$  は  $\alpha_{scc}$  と  $\hat{\alpha}_{scc}$ ,  $e_f$  は  $\alpha_{oto}$  と  $\hat{\alpha}_{oto}$  からそれぞれ eq 求められる推定誤差である。 $K_\omega$ ,  $K_a$ ,  $K_f$ ,  $K_{f\omega}$  は誤差率であり、誤差値それぞれに乗じられる(eq. 2.4, 2.5, 2.5, 2.6, 2.7)。

$$e_a = \alpha_{oto} - \hat{\alpha}_{oto} \quad (2.4)$$

$$e_\omega = \alpha_{scc} - \hat{\alpha}_{scc} \quad (2.5)$$

$$e_f = \cos^{-1} \left( \frac{\hat{\alpha}_{oto}^T \alpha_{oto}}{\|\hat{\alpha}_{oto}\| \|\alpha_{oto}\|} \right) \alpha \quad (2.6)$$

$$\alpha = \frac{\hat{\alpha}_{oto} \times \alpha_{oto}}{\|\hat{\alpha}_{oto} \times \alpha_{oto}\|} \quad (2.7)$$

VOR は Angular VOR と Translational VOR の和ベクトルである。Angular VOR は  $-\hat{\omega}$  と同値であり、Translational VOR は  $\hat{a}$  を eq にて推定直線加速度  $\hat{v}$  に変換し(eq.(2.8)), 注視目標距離ベクトル  $\hat{p}$ (eq.2.9)との外積により求められる。ここで  $\hat{d}$  は対象物との距離を表す。

$$\hat{v} = \frac{\tau_v}{\tau_v + 1} \quad (2.8)$$

$$\hat{p} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\hat{d}} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

表 2.1 に各種パラメータを示す。

表 2.1: Merfeld モデルのパラメータ

$K_\omega$	$K_a$	$K_f$	$K_{f\omega}$	$\tau_d$	$\tau_a$	$\tau_v$
3.0	-2.0	2.0	2.0	5.0	80	0.1

## 2.2.2 6DOF-SVC モデル

図. 2.3 に VOR 計算モデル(6DOF-SVC モデル)[5]のブロック線図を示す。点線 A で囲まれたモデルが動搖病発生率を予測するモデルであり出力が MSI(Motion Sickness Incidence) である[3][4]。点線 B で囲まれたモデルが頭部運動から予測された VOR を出力するモデルである[1]。本実験では、このモデルから MSI のパスを取り除いた VOR モデルを使用した。

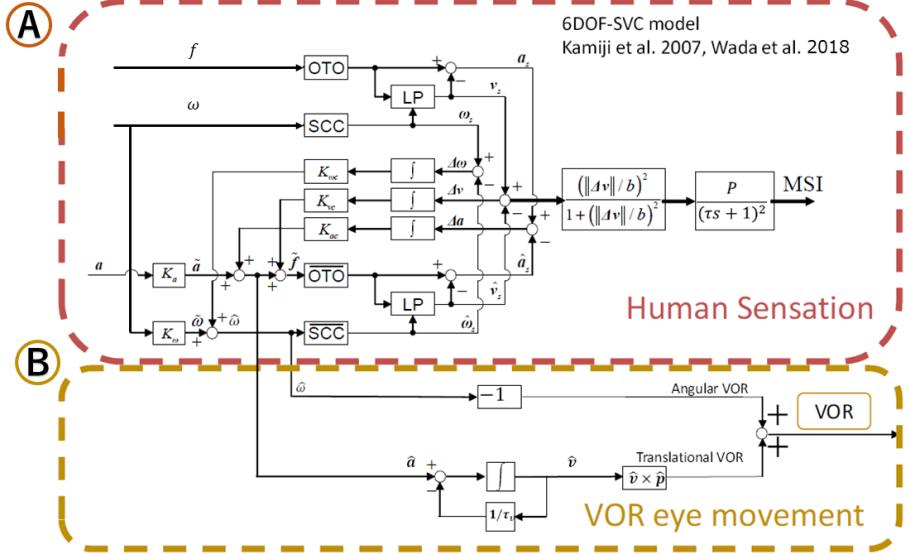


図 2.3: 6DOF-SVC モデル [5]

入力はそれぞれ 3 次元ベクトルである慣性加速度  $\mathbf{f}$ , 角速度  $\boldsymbol{\omega}$ , 並進加速度  $\mathbf{a}$  で, 出力が眼球角速度  $\dot{\boldsymbol{\theta}} = [\dot{\theta}_x, \dot{\theta}_y, \dot{\theta}_z]$  である. ベクトル  $\mathbf{f}$  は, 重力加速度  $\mathbf{g}$  と並進加速度  $\mathbf{a}$  の合力である (eq.2.10).

$$\mathbf{f} = \mathbf{a} + \mathbf{g} \quad (2.10)$$

$OTO$  は耳石器,  $\overline{OTO}$  はその内部モデルでそれぞれ単位行列である.  $SCC$  は半規管,  $\overline{SCC}$  はその内部モデルを示しており, 伝達関数式はそれぞれ eq.2.11, 2.12 で与えられる [8].

$$\boldsymbol{\omega}_s = \frac{\tau_d \tau_a s^2}{(\tau_d s + 1)(\tau_a s + 1)} \boldsymbol{\omega} \quad (2.11)$$

$$\hat{\boldsymbol{\omega}}_s = \frac{\tau_d s}{(\tau_d s + 1)} \tilde{\boldsymbol{\omega}} \quad (2.12)$$

ここで  $s$  はラプラス演算子であり,  $\tau_d, \tau_a$  は共に時定数と呼ばれる. 頭部座標系で表した重力方向の推定値  $\mathbf{v}_s$  は, eq.2.13[9] で計算される.

$$\frac{d\mathbf{v}_s}{dt} = \frac{1}{\tau} (\mathbf{f} - \mathbf{v}_s) - \boldsymbol{\omega}_s \times \mathbf{v}_s \quad (2.13)$$

また,  $\overline{LP}$  は LP の内部モデルであり, 同じく eq.2.13 で計算される.  $K_a, K_\omega$  は内部モデルによる頭部の加速度, 角速度の推定誤差率を表現する定数である.  $\Delta\mathbf{a}, \Delta\boldsymbol{\omega}, \Delta\mathbf{v}$  は, それぞれ並進加速度, 角速度, 鉛直方向の感覚量と内部モデルにおける推定値の誤差であり, 積分を行った後, ゲイン  $K_{ac}, K_{\omega c}, K_{va}$  をそれぞれに乗じて内部モデルに送られる.

$\tilde{\mathbf{f}}, \hat{\boldsymbol{\omega}}$  は内部モデルによる頭部の  $\mathbf{f}, \boldsymbol{\omega}$  の推定値である. Angular VOR が  $\hat{\boldsymbol{\omega}}$ , Translational VOR が  $\hat{\mathbf{a}}$  から算出され, それらを加算することで最終的な VOR が算出される [8]. 表 2.2 に各種パラメータを示す [5].

表 2.2: 6DOF-SVC モデルのパラメータ

$K_a$	$K_\omega$	$K_{ac}$	$K_{\omega c}$	$K_{vc}$	$\tau$
0.1	0.8	1.0	10.0	5.0	5.0
$\tau_d$	$\tau_a$	$\tau_v$	$b[m/s^2]$	$\mu[min]$	P[%]
7.0	190	0.1	0.5	12	85

## 2.3 能動/受動的な頭部運動の差による VOR への影響

上船等は機械操作時における能動・受動の差を評価するため, VOR を用いる手法を提案した [6]. この研究での能動とは, 自ら行う操作, 受動とは他人が行う操作を指している. 実験では被験者がピッチ方向へ機械を操作したときの VOR を計測し, これが能動, 受動的な操作に影響されるか調査した. 要因は機械操作と周波数の 2 要因で, 機械操作要因は(能動, 受動)の 2 水準, 周波数要因は(0.5, 1.0, 1.5 Hz)の 3 水準で, 合計 6 条件である.

上船等は, VOR の評価に 6DOF-SCV モデルを用いた. 6DOF-SCV モデルを用いる利点として, 遠心性コピーのような自己運動推定に関する処理を考慮できることが挙げられた. 遠心性コピーとは, 運動指令信号のコピーのことで, これを用いてヒトは自分の身体の状態(位置や速度)を推定していると考えられているが, 6DOF-SCV モデルにはこのような自己運動推定に影響を与えるパラメータが存在する.

評価指標はモデル内パラメータ, 計測値から計算する VOR ゲインで能動と受動の差から生じる VOR の変化を評価した. モデル内パラメータは試行毎に同定され, 能動, 受動差でパラメータ値を比較した. モデル化誤差は能動条件で同定されたパラメータが用いられ, 眼球角速度の計測値とモデル推定値間から RMSE(Root Mean Square Error)を計算した. 実験結果は図. 2.4, 2.5 に示すように, 受動条件でモデルパラメータは減衰, VOR ゲインは減少した. このことから受動的な機械操作のように自己運動推定精度が低いと期待される条件下では, モデル内の自己運動推定に影響を及ぼすパラメータが減衰することが示された.

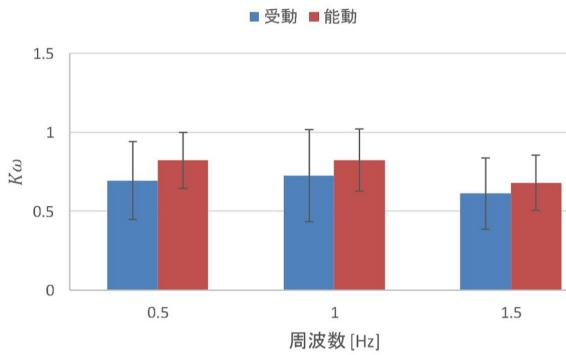


図 2.4: 上船等の結果 ( $K_\omega$ )[6]

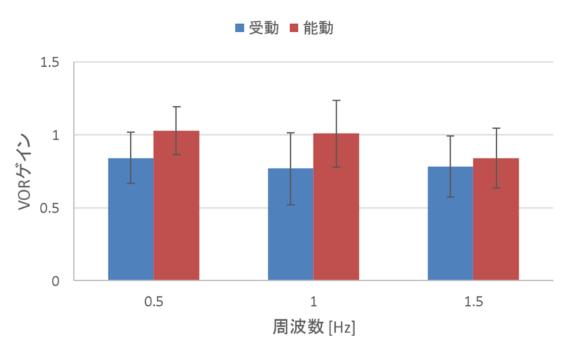


図 2.5: 上船等の結果 (VOR ゲイン)[6]

しかし, ヨー方向でも同じように VOR に影響があるのかは確認されていない. さらに, 能動と受動の違いは, VOR に影響を与えたが, 能動における操作感の違いが VOR に影響を与えるかは確認されていない. 我々は上船等の研究から, 能動状態に

おける操作感を変化させた時に、その影響がVORモデル内の自己運動推定に関するパラメータに表れるのではないかという着想を得た。よって、本研究のは、ヨー方向における能動と受動によるVORの変化を確認できるか検証することを1つ目の目標とする。さらに、能動における操作感の変化がVORに与える影響を検証することを2つ目の目的とする。

# 第3章 実験1(能動・受動時のVOR比較実験)

## 3.1 目的

ヨー方向における能動と受動によるVORの変化を確認できるか検証することを目的とする。

能動に比べ受動の方が、VORの評価値が低いという仮説を設定した。

## 3.2 被験者

男性3名(20代)の被験者に協力を得た。また被験者は実験の参加にあたり、注意事項を十分に理解した上、彼らにインフォームドコンセントを得た上で実験を行った。また計測時の揺れの影響で動搖病を発症する恐れがあるため、実験の辞退は被験者の自由とした。

## 3.3 環境

### 3.3.1 回転座席

本実験ではヨー方向に回転する、1軸回転座席を用いた(図. 3.1)。装置のプラットフォーム上にスポーツカー用バケットシートを取り付け、その上に被験者を着座させた。この装置はジョイスティックから受ける電圧を操作用のPCに受け取り、操作用のPCからMATLAB Simulinkを通して送られる信号を受け制御される(図. 3.2)。このジョイスティックの角度と回転座席の運動の対応を操作パラメータとする。操作ゲインと時定数を変更することで操作パラメータを変化させる。操作ゲインを変化させることでジョイスティックにより座席の回転角度の度合いを変更できる。時定数を変化させることで、ジョイスティックによる座席の回転を行う反応を遅らすことが可能である。頭部の動きと装置の動きを同期させるために首にサポートを取り付け、首とシートとの隙間にクッションを入れることで頭部を固定した。能動条件では、ジョイスティックからの入力された電圧をMATLAB Simulink上で操作パラメータを0.4倍に制御しモータを動作させた。受動条件では、能動条件で出力された電圧を記録させておき、その電圧情報を送ることで、能動条件と同様にモータを動作させた。



図 3.1: 回転座席



図 3.2: 1 軸回転装置の制御

### 3.3.2 Tobii Glasses

頭部角速度 ( $100Hz$ ) と眼球角速度は、眼鏡型センサである Tobii 社の Tobii Pro Glasses 2( $50Hz$ ) によって計測された (図. 3.3). このセンサの座標系は、本実験で用いたモデルとは異なるため、すべての計測データは解析の際にモデル座標系へ変

換した。

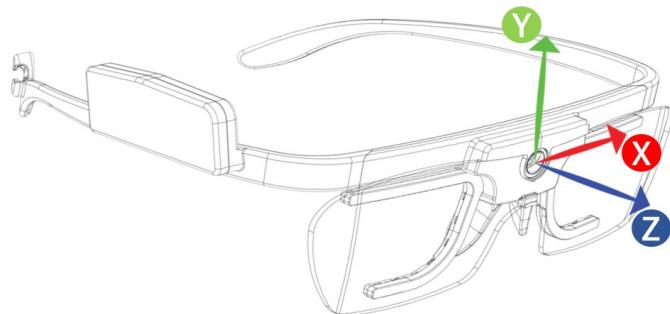


図 3.3: Tobii Glass

### 3.3.3 固視点

実験中被験者には、VOR を安定して発生させるため、被験者の前方に固視点を設け、これを注視してもらう(図. 3.4)。この時、正面を向いている時を角度  $0^\circ$ として、 $\pm 30^\circ$ の位置を目標値と置き、目標値で逆方向に回転座席を切り返してもらう。この固視点に現在角度と目標角度を表示する(図. 3.5)。これにより、固視点を注視

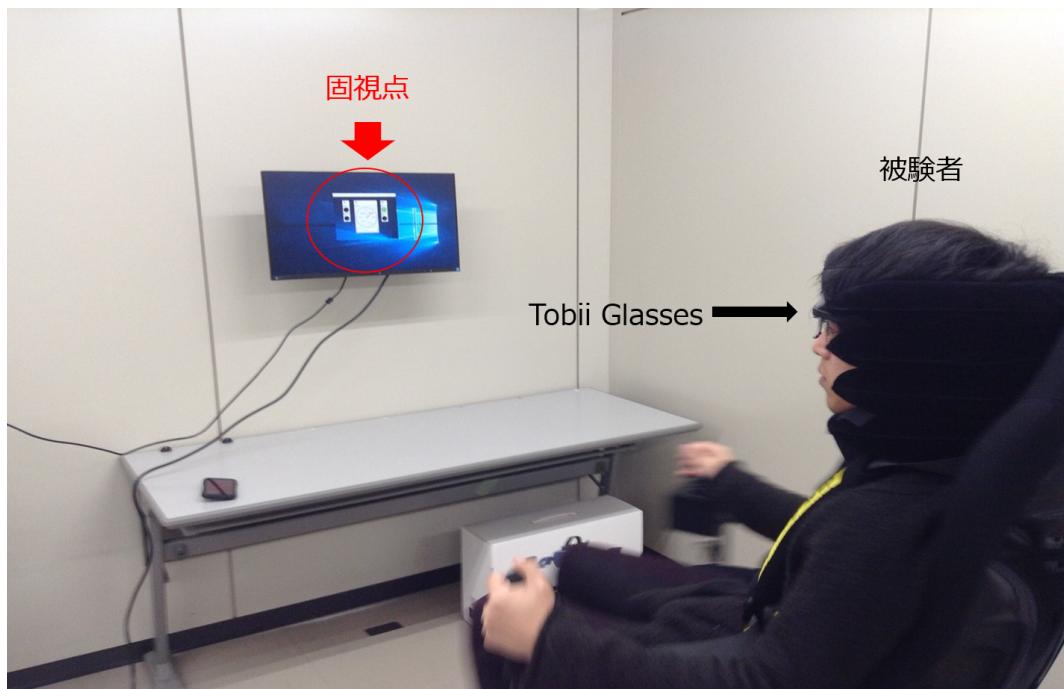


図 3.4: 実験環境

しながら目標角度で装置を切り返すことが出来る。目標値の有効範囲として少しふ

くらみを持たして, 25°から 45°を目標範囲とする. 目標範囲に到達したら固視点に示す緑色の LED が点灯し, 目標範囲を超えたときは赤色の LED が点灯する.

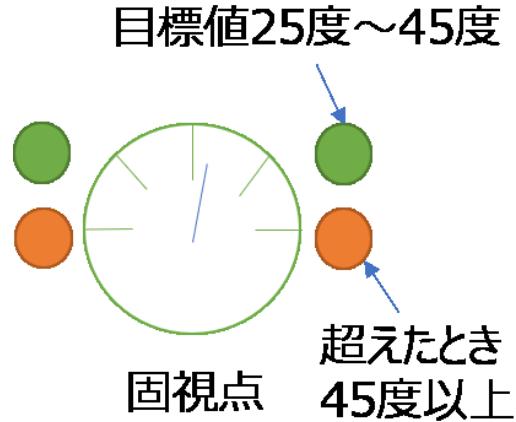


図 3.5: 固視点

### 3.3.4 周波数

VOR を発生させるために座席を動かす周波数条件として, 0.2Hz, 0.5Hz と一定の周波数を設定せず被験者が自由に操作するランダムの 3 つを実施した. 0.2Hz, 0.5Hz は, 被験者にわかるようにメトロノームの音により切り返しのタイミングを示した.

## 3.4 実験要因

実験要因は, 装置の操作要因で能動と受動の 2 水準である. 能動では, 被験者自身が回転座席を操作を行う. 受動では, 能動の出力電圧を保存したものを用いて PC から回転座席の操作を行う. この時, 受動は能動と同じ動きである.

## 3.5 評価指標

VOR の評価指標として, 数理モデルにより計算されるパラメータ  $K_\omega$ (3.7.2) と計測された眼球角速度と頭部角速度から計算される VOR ゲイン(3.7.3) の 2 つを用いた.

## 3.6 手順

被験者は実験に参加する前に, 実験に関する注意事項を十分に理解した上でインフォームドコンセントに同意した. 回転座席をヨー方向に回転させた時の眼球角速度と頭部角速度を計測する実験を行った. 回転装置上に設けたシートに座り, 計測開始までに装置の操作に慣れてもらうために練習を 5 分間行った. 能動と受動の 2

条件の計測を計測時間 1 分で実施した (図. 3.6). 計測は  $0.2Hz, 0.5Hz$ , ランダムの周波数 3 条件を行った. 能動条件の動きと同じ受動条件の動きを行うために計測順序の入れ替えは行わなかった. 試行間には 2 分間の休憩時間を設け, 揺れに対する被験者の体調の変化を聞き, いつでも実験辞退を行えるよう配慮した.



図 3.6: 計測順序

## 3.7 解析方法

### 3.7.1 解析データの抽出方法

本実験のすべての眼球角速度の計測データは, 瞬きなどにより高周波のノイズが混入するため, ゼロ位相のバタワースフィルタを用いて, カットオフ周波数  $5Hz$  のローパスフィルタを通した. さらにこのローパスフィルタで消すことのできなかったノイズを除去するために, eq.3.1 を満たすデータを削除した. ここで  $abs(\dot{\theta}_{eye}^i)$  は眼球角速度の絶対値の  $i$  番目のデータで,  $abs(\dot{\theta}_{head}^i)$  は頭部角速度の絶対値の  $i$  番目のデータである.

$$\begin{cases} abs(\dot{\theta}_{eye}^i) \geq 2.0abs(\dot{\theta}_{head}^i) \\ abs(\dot{\theta}_{eye}^i) \leq 0.3abs(\dot{\theta}_{head}^i) \end{cases} \quad (3.1)$$

### 3.7.2 モデルパラメータ $K_\omega$

VOR を推定するために実験数理モデルを用いる. 機械操作における VOR を推定する自己運動推定を含めた数理モデルを図.3.7 に示す. モデル内の伝達関数  $SCC$  (eq.3.2),  $B$  (eq.3.3),  $\hat{B}$  (eq.3.4) とする.  $S\hat{C}C$  は  $SCC$  と同じ伝達関数とする.  $SCC$  は半規管,  $S\hat{C}C$  は半規管の内部モデルを示しており,  $B$  は操作パラメータ,  $\hat{B}$  は操作パラメータの内部モデルを示している.

$$SCC := \frac{\tau_d s}{\tau_d s + 1} \quad (3.2)$$

$$B := \frac{K_b}{\tau_b s + 1} \quad (3.3)$$

$$\hat{B} := \frac{\hat{K}_b}{\hat{\tau}_b s + 1} \quad (3.4)$$

数理モデルの入力は目標角度で、出力はVORである。 $\tau_d$ と $\tau_b$ と $\hat{\tau}_b$ は時定数、 $K_b$ と $\hat{K}_b$ は操作ゲインを示す。 $B$ は、ジョイスティックの入力から回転座席の動きに変換する伝達関数を表す。時定数と操作ゲインを変更することで操作感を変化させることができる。回転座席と頭部は同じ動きなので、ジョイスティックの電圧を装置 $B$ に通すことによって実際に生じる頭部運動が計算される。 $\hat{B}$ は、装置によって生じる頭部運動の予測を行う。

本実験では、入力を計測することが出来ないので、 $B$ と $\hat{B}$ を複合させたパラメータとして $K_\omega$ を用いた。(eq.3.5)

$$K_\omega := B^{-1}\hat{B} \quad (3.5)$$

先行研究で使用された数理モデル6DOF-SVCモデル(図. 2.3)のVORを算出する部分だけを取り出したモデルを図. 3.8に示す。入力は頭部角速度で、 $\tau_d$ と $K_{\omega c}$ は先行研究と同値で行った。 $K_\omega$ は実験モデル内のパラメータの1つである。このパラメータは自己運動推定への影響を示すパラメータで、本実験ではこの $K_\omega$ を同定することにより、能動、受動条件によるVORへの影響を評価した。パラメータ同定では、目的関数 $J_{VOR}$ (eq.3.6)を最小にするような $K_\omega$ を同定する。ここで $\dot{\theta}_{eye_{obs}}$ は眼球角速度の計測値、 $\dot{\theta}_{eye_{mdl}}$ はモデル出力であるVORの推定値である。Nは各ブロックのデータ長で、nはサンプルデータ位置を表している。同定範囲0.4から1.6で0.1刻みに探索を行った。このとき、0.4と1.6は、オーバーフィッティングとして除き、 $K_\omega$ の値としては0.5から1.5を用いた。(図. 3.9)

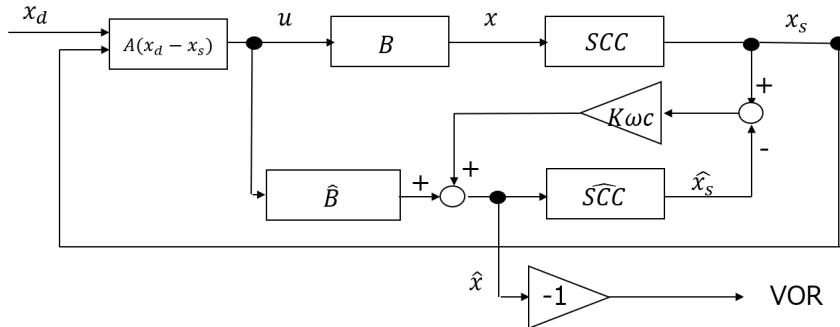


図 3.7: 実験モデル 1

$$J_{VOR} := \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \{ \dot{\theta}_{eye_{obs}}(n) - \dot{\theta}_{eye_{mdl}}(n) \}^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \{ \dot{\theta}_{head}(n) \}^2}} \quad (3.6)$$

$K_\omega$ を波形全体から同定すると一部分の波形がノイズにより外れ値に引っ張られる可能性がある。そこで、波形データを5secごとに1サンプルずつずらして同定を行った。(図. 3.10)  $K_\omega$ は、x回の代表値でeq.3.7で求められる。

$$K_\omega := \text{median}_{i \in [1, x]}(K_\omega^i) \quad (3.7)$$

ここで $\text{median}()$ は中央値を求める関数で、 $K_\omega^i$ はi回目に同定された $K_\omega$ である。

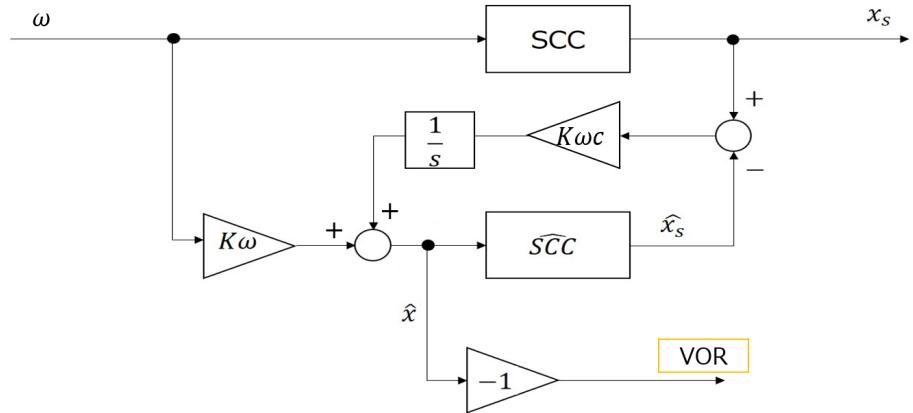


図 3.8: 実験モデル 2

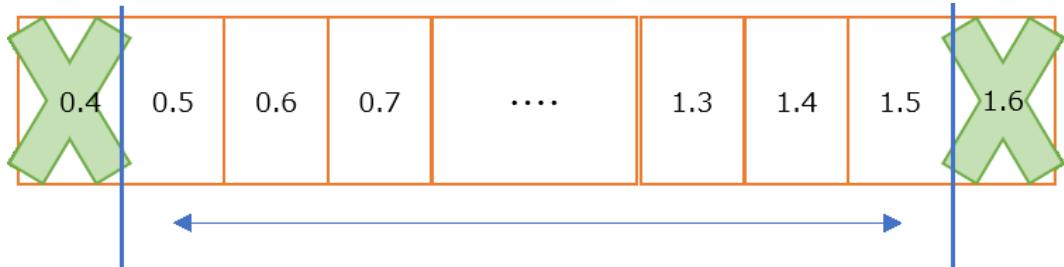


図 3.9: 同定範囲

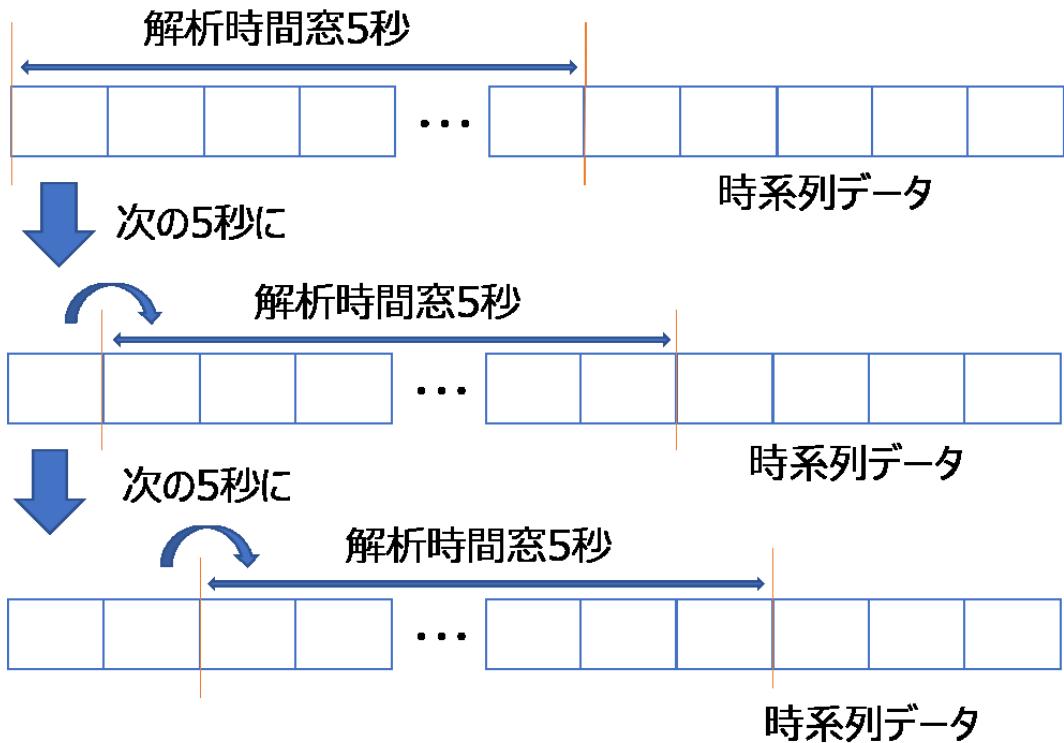


図 3.10: データの探索

### 3.7.3 VOR ゲイン

VOR ゲインは、計測データから VOR を評価する指標である。この VOR ゲイン ( $G$ ) は eq.3.8 で定義した。

$$G := \underset{k \in [1, N]}{\text{mean}} \left( \frac{\omega_{\text{eye}}^k}{\omega_{\text{head}}^k} \right) \quad (3.8)$$

ここで  $\text{mean}()$  は平均値を計算する関数である.  $\omega_{\text{eye}}^k$  と  $\omega_{\text{head}}^k$  は眼球と頭部角速度の  $k$  番目のピーク値を表し,  $N$  はデータブロック内に含まれるピーク数である. また眼球と頭部角速度の対応するピーク値を検出時, ピーク値の発生時間の差が 0.15 以下の最も近いものを選択した. さらに VOR ゲインが 0.1 以上かつ 2.0 以下の値以外のものはノイズの混入が考えられるため削除した.

## 3.8 結果

### 3.8.1 パラメータ $K_\omega$

図. 3.11 は, 被験者自身が操作を行う能動状態と操作を行わない受動状態が VOR に及ぼす影響を自己運動推定に関するパラメータ  $K_\omega$  を同定し, 能動条件と受動条件で比較した結果を周波数条件ごとに示している. 図. 3.11 中の能動条件と受動条件は, 各条件で計算された被験者 3 名のパラメータ  $K_\omega$  の平均値を計算したものである. 図. 3.12 から図. 3.14 は被験者ごとの結果である. 結果から  $K_\omega$  は, 能動状態より受動状態の値が減少した.

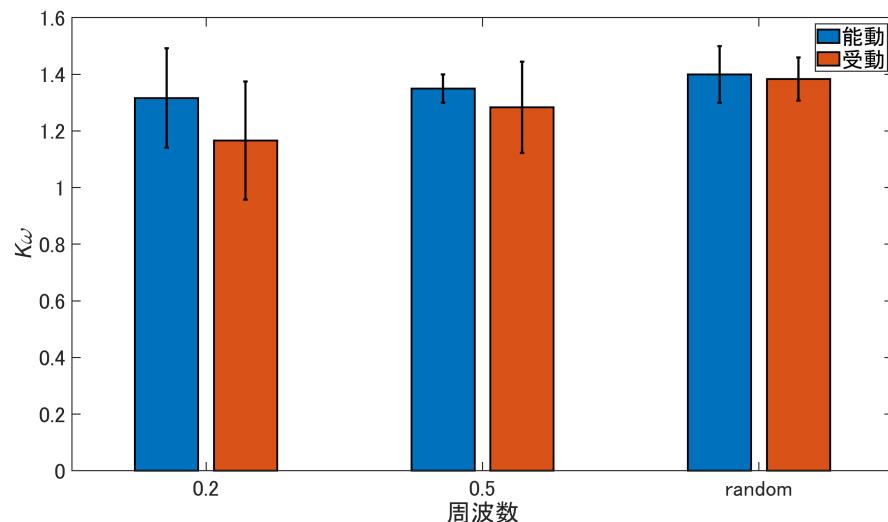


図 3.11:  $K_\omega$  の結果

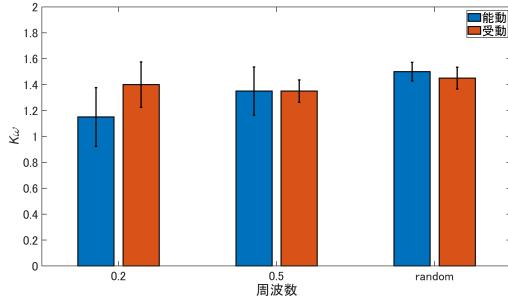


図 3.12: 被験者 A の  $K_\omega$  の結果

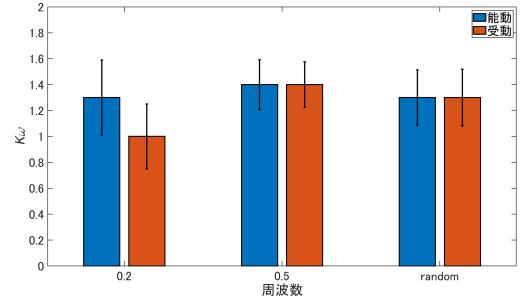


図 3.13: 被験者 B の  $K_\omega$  の結果

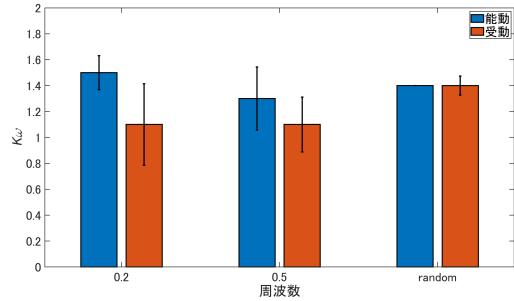


図 3.14: 被験者 C の  $K_\omega$  の結果

### 3.8.2 VOR ゲイン

図. 3.15 は、被験者自身が操作を行う能動状態と操作を行わない受動状態が VOR に及ぼす影響を VOR ゲインを計算し、能動条件と受動条件で比較した結果を周波数条件ごとに示している。図. 3.16 から図. 3.18 は被験者ごとの結果を示している。結果から VOR ゲインは、能動状態より受動状態の値が減少した。

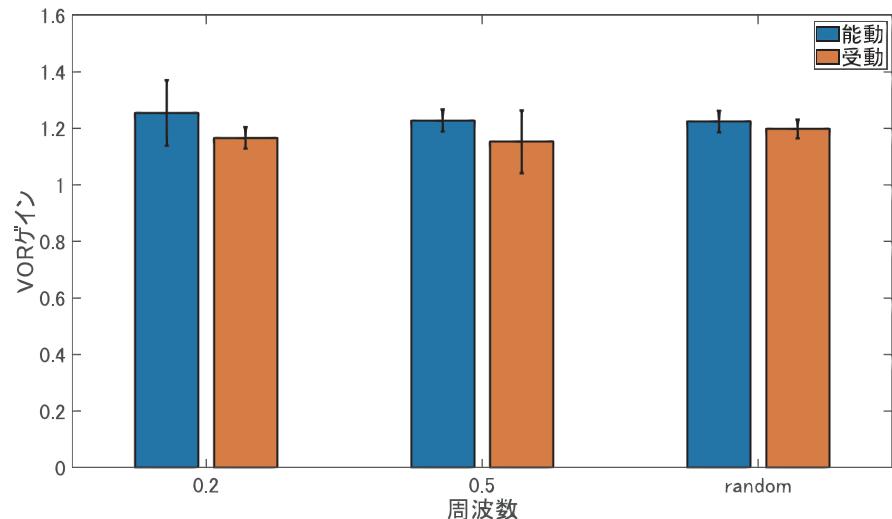


図 3.15: VOR ゲインの結果

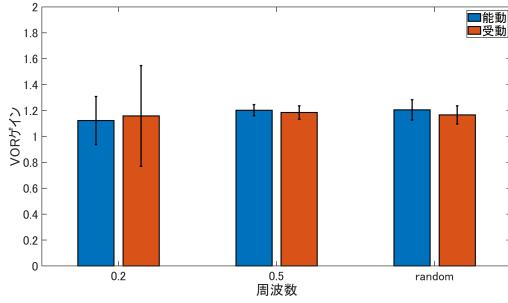


図 3.16: 被験者 A の VOR ゲインの結果

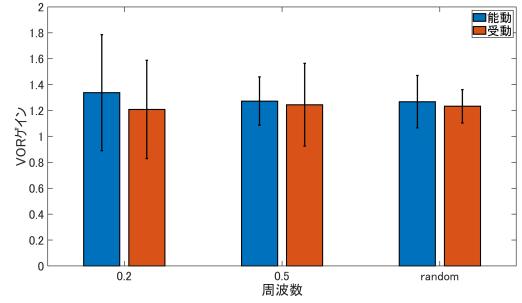


図 3.17: 被験者 B の VOR ゲインの結果

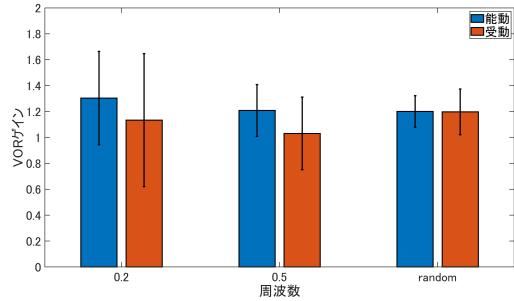


図 3.18: 被験者 C の VOR ゲインの結果

### 3.8.3 相関

図. 3.19 に,  $K_\omega$  と VOR ゲインの相関関係を示す. 正の相関が確認された. (pearson の線形相関で相関係数  $r = 0.4579$ ,  $p = 0.0560$ )

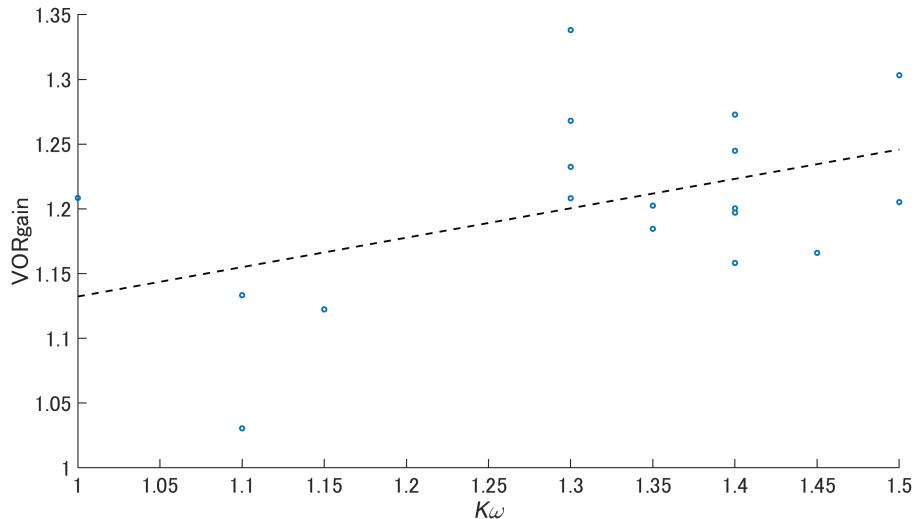


図 3.19:  $K_\omega$  と VOR ゲインの相関の結果

### 3.9 考察

本実験は、ヨー方向における能動と受動による VOR の影響を VOR の評価値によって確認できるか検証することを目的とした。そのために、搭乗型の回転座席を用いて、ヨー方向に能動的・受動的に回転させた時の VOR を計測する実験を行った。本実験の結果、実験数理モデル内の自己運動推定に関するパラメータ  $K_\omega$  と眼球角速度と頭部角速度の計測値から計算した VOR ゲインは、能動より受動の方が  $K_\omega$  と VOR ゲインが減少した。さらに、 $K_\omega$  と VOR ゲインの相関関係には正の相関が確認され、眼球角速度の振幅の減衰がモデル内パラメータの減少と関係があることが示された。これは、上船等の研究と同傾向であった[6] したがって、ピッチ方向で得られた能動と受動の違いによる  $K_\omega$  と VOR ゲインの変化をヨー方向の操作でも得ることが示唆された。能動と受動の違いによって、実験数理モデル内の自己運動推定精度を表すパラメータが減少する傾向が得られた。これにより、人の運動予測には、操作を行っている能動と操作を行っていない受動の差に影響を受ける可能性があることが示唆された。

# 第4章 実験2(能動条件変化時のVOR比較実験)

## 4.1 目的

能動における操作感の異なる搭乗型の回転座席の操作がVORの評価値と操作性に与える影響を検証することを目的とする。

能動における操作感を変化させた時、変化させる前に比べ、VORの評価値が低くなり、複数回行うことでVORの評価値が変化前の値に近づくという仮説を設定した。さらに、VORの評価値と操作性のアンケートの間には相関があるという仮説を設定した。もし相関があれば、操作性をVORで客観的に評価できる可能性がある。

## 4.2 被験者

男性12名(20代)の被験者に協力を得た。また被験者は実験の参加にあたり、注意事項を十分に理解した上、彼らにインフォームドコンセントを得た上で実験を行った。また計測時の揺れの影響で動搖病を発症する恐れがあるため、実験の辞退は被験者の自由とした。

## 4.3 環境

回転座席と眼球運動、頭部運動を計測するセンサは3章の実験と同様のものを使用した。

### 4.3.1 固視点

3章の実験と同様に、VORを安定して発生させるため、被験者の前方に固視点を設け、これを注視してもらう(図. 3.4)。固視点には、現在角度と目標角度を表示する(図. 3.5)。

### 4.3.2 周波数

VORを発生させるために座席を動かす周波数条件として、 $0.5\text{Hz}$ で行ってもらう。周波数は、被験者にわかるようにメトロノームの音により切り返しのタイミングを示した。

## 4.4 実験要因

実験要因は、操作感要因で操作パラメータ A と操作パラメータ B の 2 水準である。操作パラメータ A(eq.4.1)、操作パラメータ B(eq.4.2) とする。

$$\text{操作パラメータ } A := \frac{0.3}{0.1s + 1} \quad (4.1)$$

$$\text{操作パラメータ } B := \frac{0.4}{0.4s + 1} \quad (4.2)$$

これらは共に被験者内要因である。操作パラメータ A は、ヨー方向に回転座席を  $0.5Hz$  で回転させやすいように、操作パラメータ B は、回転させにくいように設定した。

## 4.5 評価指標

評価指標として、数理モデルにより計算されるパラメータ  $K_\omega$  と計測された眼球角速度と頭部角速度から計算される VOR ゲイン、頭部角速度にゲイン値をかけた簡易モデルを提案し、そのゲイン値であるパラメータ K を用いて評価した。さらに、操作性に関するアンケートを実施し評価を行った。

## 4.6 手順

まず被験者に実験内容を説明し、本実験への参加に同意を得た。そして被験者は回転座席に着座し、眼球運動と頭部運動を計測するためのセンサを取り付け、回転座席をヨー方向に回転させる。まずは、装置の操作に慣れてもらうために操作パラメータ A で 5 分間練習を行った。その後、1 分間の計測を操作パラメータ A を 1 回、操作パラメータ B を 4 回計測行った(図. 4.1)。計測間に 1 分間の休憩を挟みその間に操作性に関するアンケートにも答えてもらった。

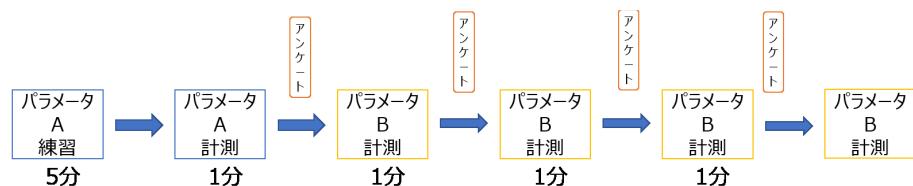


図 4.1: 計測順序

## 4.7 解析方法

### 4.7.1 解析データの抽出方法

VOR の評価指標は実験 1 と同様で自己運動推定に関するパラメータ  $K_\omega$ , 計測された眼球角速度と頭部角速度から計算した VOR ゲインを用いた。これらの計算法は実験 1 と同様である。パラメータ  $K_\omega$  の同定範囲として 0 から 2.0 で 0.1 刻みに探索を行った。このとき, 0 と 2.0 は, オーバーフィッティングとして除き,  $K_\omega$  の値としては 0.1 から 1.9 を用いた。(図. 4.2) さらに, 頭部角速度にパラメータ  $K$  を掛けたものを推定する眼球角速度とする評価指標と操作性を評価するアンケートを追加した。

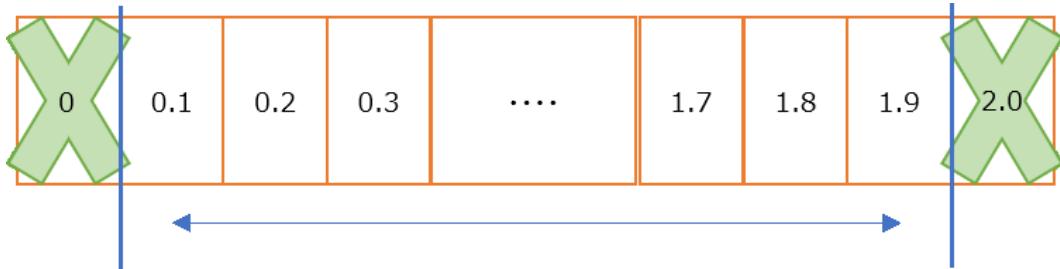


図 4.2: 同定範囲 (2)

### 4.7.2 パラメータ $K$ の算出方法

パラメータ  $K$  は, 計測データから VOR を評価する指標として, 頭部角速度にゲイン値をかけた簡易モデルであり, そのゲイン値である。eq.4.3 によって計算される  $\dot{\theta}_{eye_{mdl}}$  により, 目的関数  $J_{VOR}$ (eq.3.6) を最小にするような  $K$  を同定する。同定範囲として 0 から 2.0 を 0.1 刻みに探索を行った。このとき, 0 と 2.0 は, オーバーフィッティングとして除き,  $K$  の値としては 0.1 から 1.9 を用いた(図. 4.2)。

$$\dot{\theta}_{eye_{mdl}} := -K \dot{\theta}_{head} \quad (4.3)$$

ここで  $\dot{\theta}_{eye_{mdl}}$  は眼球角速度の推定値,  $\dot{\theta}_{head}$  は眼球角速度の計測値である。

パラメータ  $K_\omega$  と同様に波形データを 5sec ごとに 1 サンプルずつずらして同定を行い, eq.4.4 で  $K$  を求めた(図. 3.10)

$$K := \underset{i \in [1, N]}{\text{median}}(K^i) \quad (4.4)$$

$N$  は同定された  $K$  の総数を表し,  $K^i$  は  $i$  回目に同定された  $K$  を表す。

### 4.7.3 アンケート

装置を操作したときの, 操作感が異なる能動条件の操作性を VAS を採用したアンケート用いて主観評価を行う。VAS とは, 図. 4.3 に被験者の感じたところに縦線を引いてもらう。以下は, アンケートの質問項目である。

1. 設定された目標値で装置を切り返すことができましたか
2. 自身が想定している位置で装置を切り返すことができましたか
3. メトロノームの音に対応した周期運動をおこなえましたか
4. 装置の動きの遅れになれましたか



図 4.3: VAS

アンケートの値は、項目 1, 2, 3 の平均をとったものである。

## 4.8 実験結果

### 4.8.1 パラメータ $K_\omega$

図. 4.4 に被験者 12 名のモデルパラメータ  $K_\omega$  の平均値結果を示す。数理モデル内の自己運動推定を表すモデル内パラメータ  $K_\omega$  は、操作パラメータ A から操作パラメータ B に変化させたときに、減少した。操作パラメータ B を繰り返し行うとパラメータ  $K_\omega$  が 1 回目より増加した。操作パラメータ A と操作パラメータ B の 1 回目の間に有意差は確認することができなかった。(ウィルコクソン検定  $p = 0.598$ ) 図. 4.18 から図. 4.29 に被験者 A から L のパラメータ  $K_\omega$  の結果を示す。

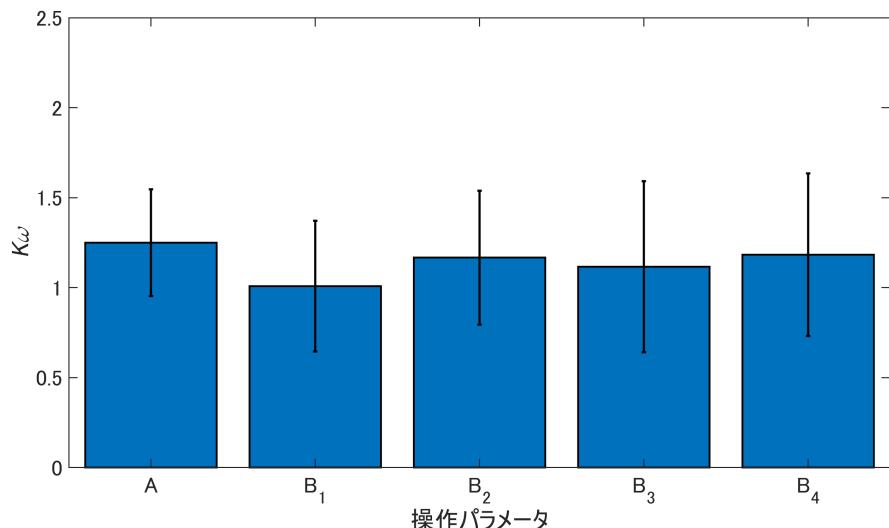


図 4.4:  $K_\omega$  の結果

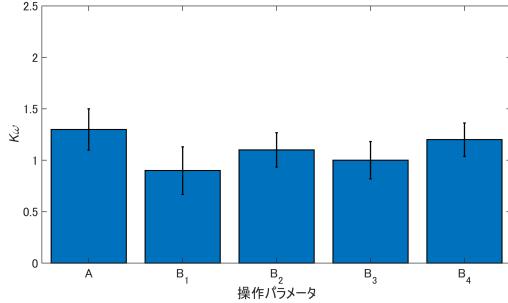


図 4.5: 被験者 A の  $K_\omega$  の結果

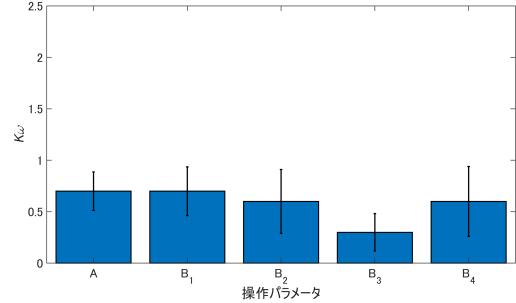


図 4.6: 被験者 B の  $K_\omega$  の結果

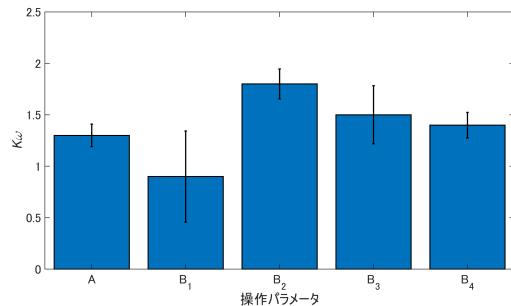


図 4.7: 被験者 C の  $K_\omega$  の結果

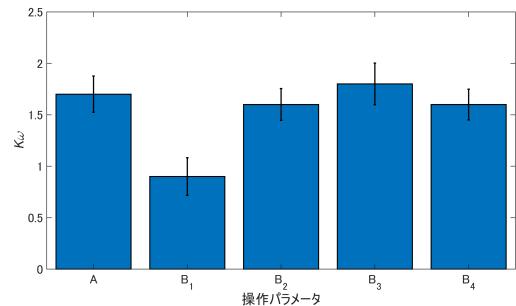


図 4.8: 被験者 D の  $K_\omega$  の結果

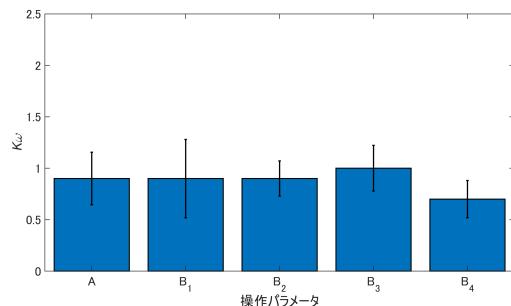


図 4.9: 被験者 E の  $K_\omega$  の結果

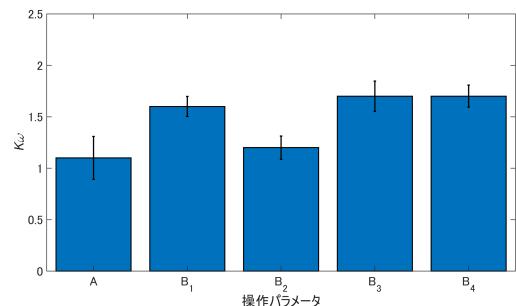


図 4.10: 被験者 F の  $K_\omega$  の結果

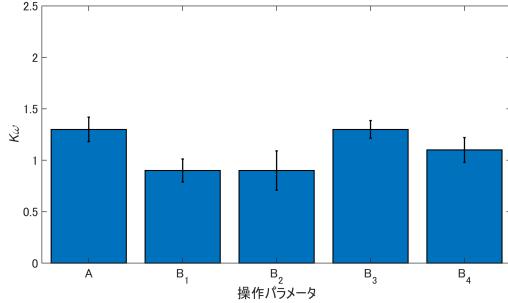


図 4.11: 被験者 G の  $K_\omega$  の結果

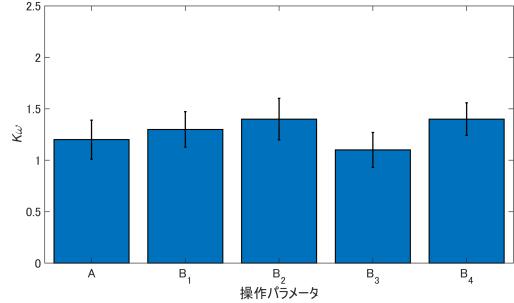


図 4.12: 被験者 H の  $K_\omega$  の結果

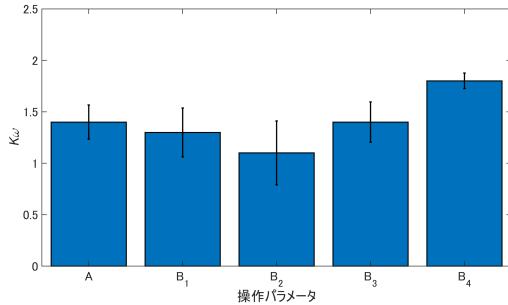


図 4.13: 被験者 I の  $K_\omega$  の結果

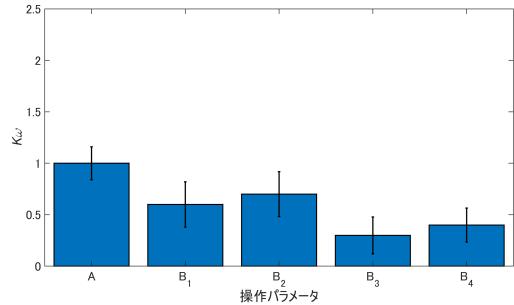


図 4.14: 被験者 J の  $K_\omega$  の結果

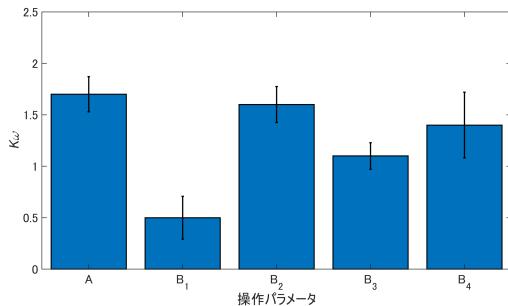


図 4.15: 被験者 K の  $K_\omega$  の結果

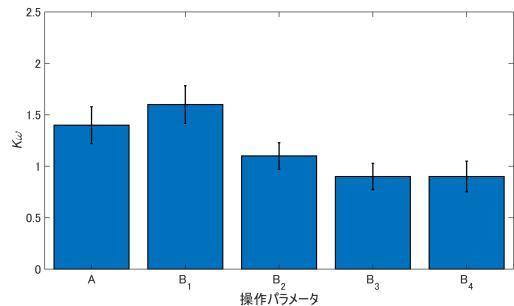


図 4.16: 被験者 L の  $K_\omega$  の結果

#### 4.8.2 パラメータ $K$

図. 4.17 に被験者 12 名のパラメータ  $K$  の平均値の結果を示す。頭部角速度にゲイン値をかけた簡易モデルを提案し、そのゲイン値であるパラメータ  $K$  は、操作パラメータ A から操作パラメータ B に変化させたときに減少した。図. 4.18 から図. 4.29 に被験者 A から L のパラメータ  $K$  の結果を示す。

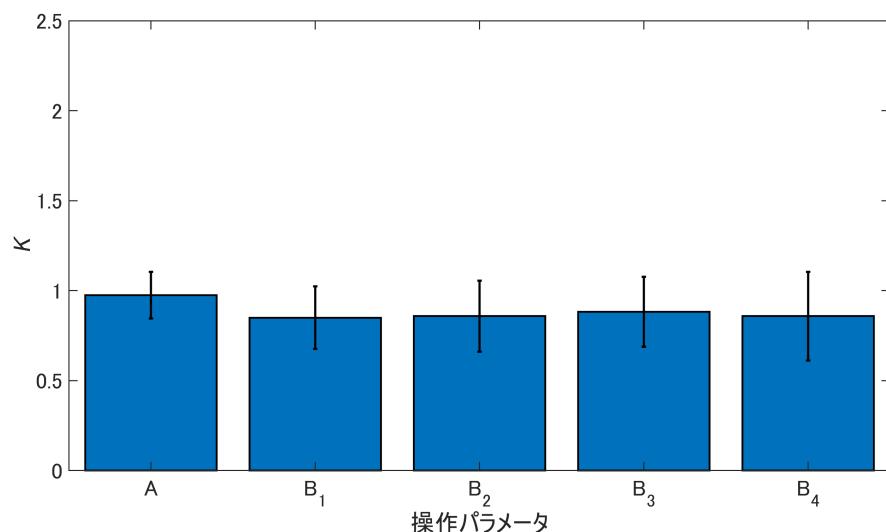


図 4.17:  $K$  の結果

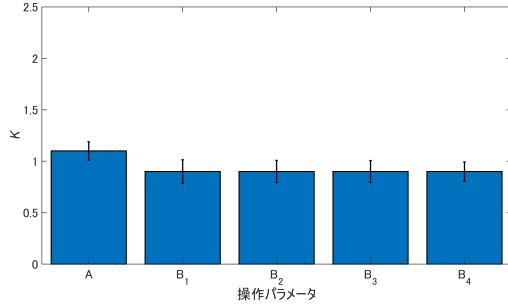


図 4.18: 被験者 A の  $K$  の結果

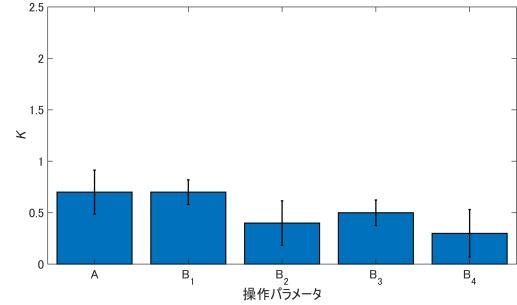


図 4.19: 被験者 B の  $K$  の結果

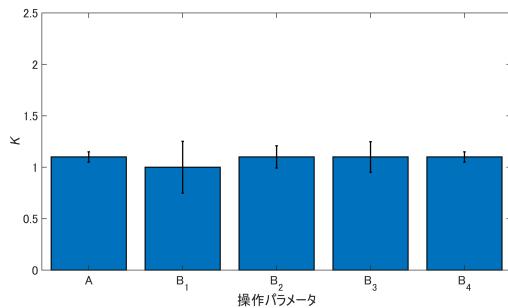


図 4.20: 被験者 C の  $K$  の結果

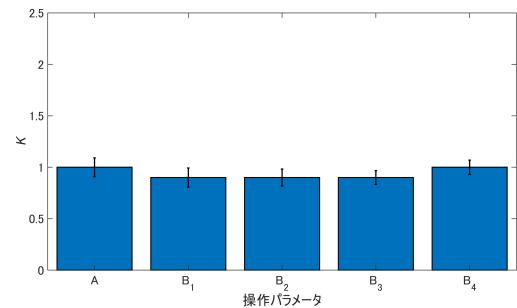


図 4.21: 被験者 D の  $K$  の結果

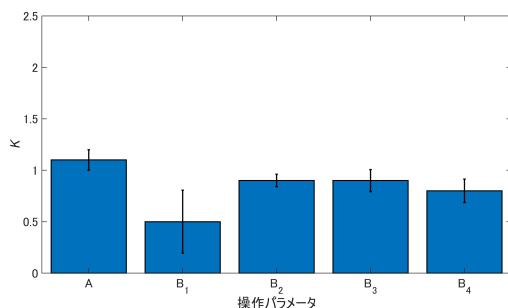


図 4.22: 被験者 E の  $K$  の結果

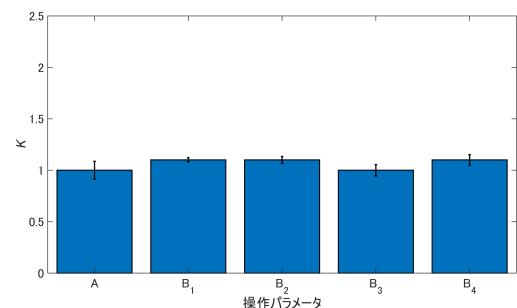


図 4.23: 被験者 F の  $K$  の結果

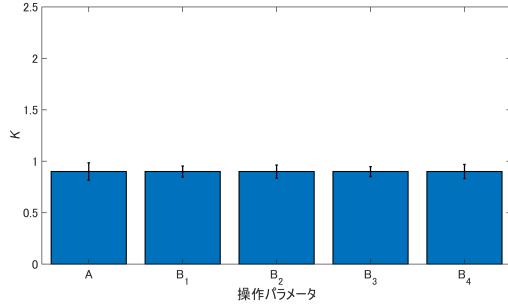


図 4.24: 被験者 G の K の結果

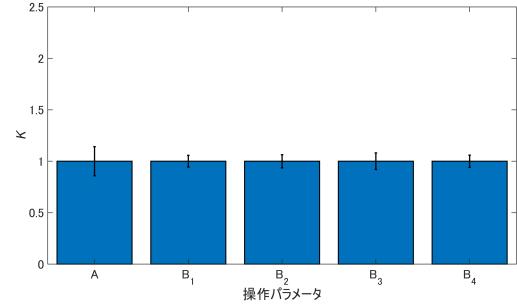


図 4.25: 被験者 H の K の結果

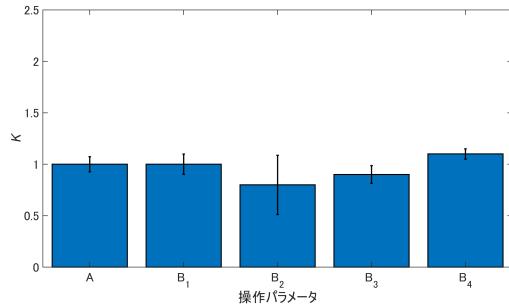


図 4.26: 被験者 I の K の結果

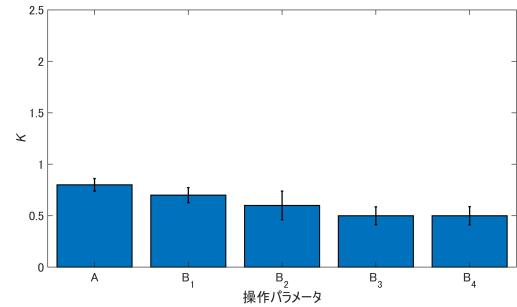


図 4.27: 被験者 J の K の結果

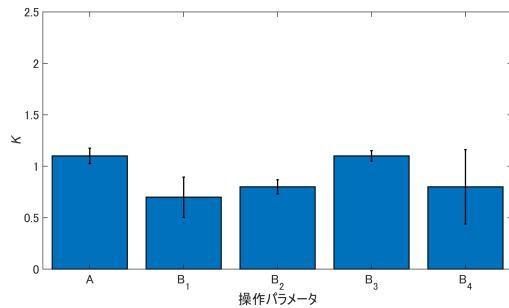


図 4.28: 被験者 K の K の結果

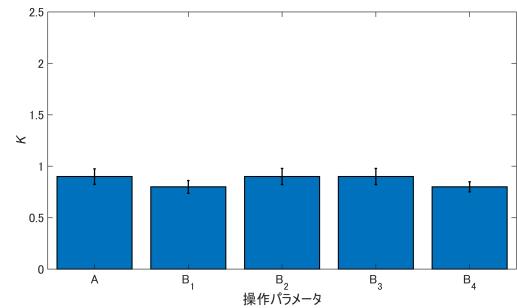


図 4.29: 被験者 L の K の結果

### 4.8.3 VOR ゲイン

図. 4.30 に被験者 12 名の VOR ゲインの平均値の結果を示す。眼球角速度と頭部角速度の計測値から計算された VOR ゲインは、差が大きく出なかった。操作パラメータ A より操作パラメータ B の方が VOR ゲインが減少した。図. 4.31 から図. 4.42 に被験者 A から L の VOR ゲインの結果を示す。

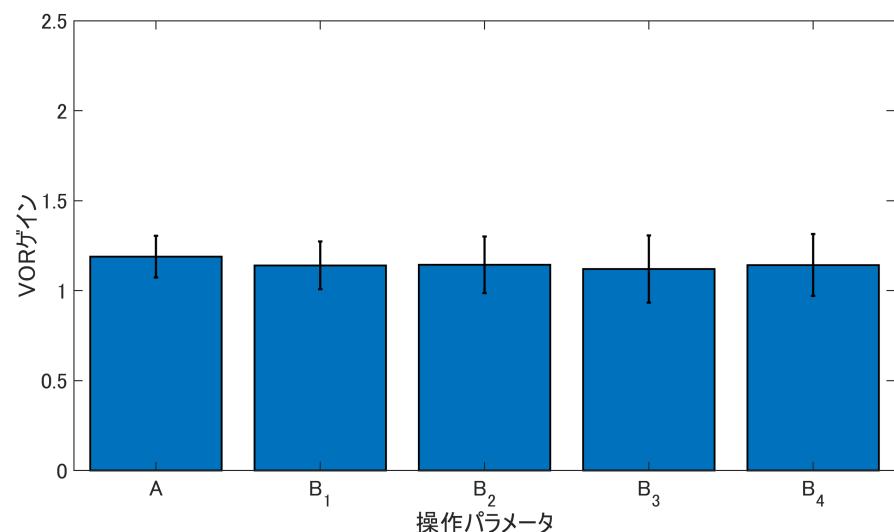


図 4.30: VOR ゲインの結果

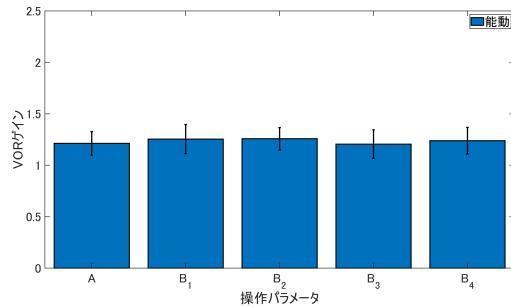


図 4.31: 被験者 A の VOR ゲインの結果

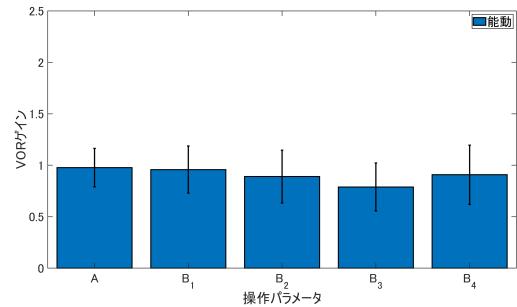


図 4.32: 被験者 B の VOR ゲインの結果

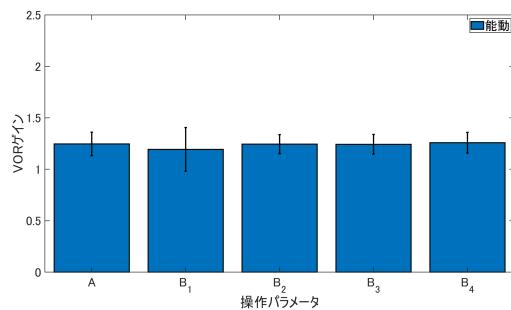


図 4.33: 被験者 C の VOR ゲインの結果

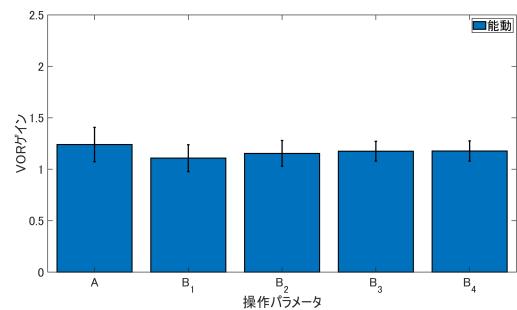


図 4.34: 被験者 D の VOR ゲインの結果

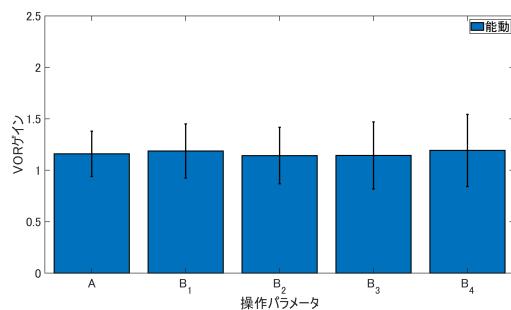


図 4.35: 被験者 E の VOR ゲインの結果

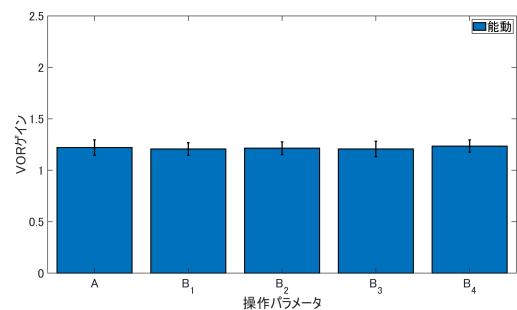


図 4.36: 被験者 F の VOR ゲインの結果

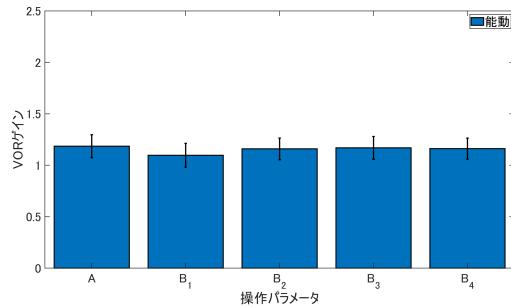


図 4.37: 被験者 G の VOR ゲインの結果

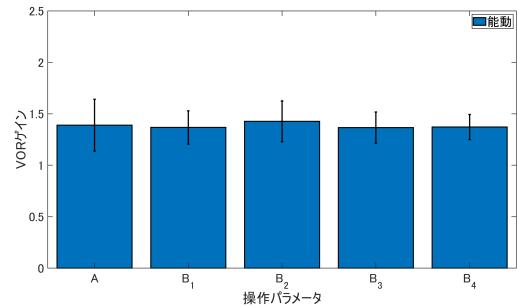


図 4.38: 被験者 H の VOR ゲインの結果

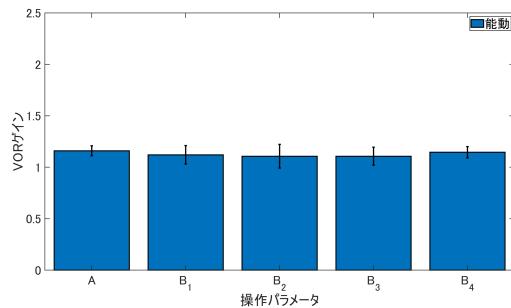


図 4.39: 被験者 I の VOR ゲインの結果

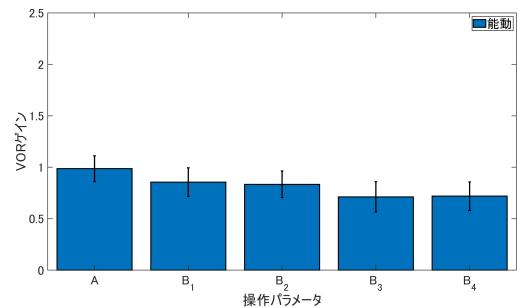


図 4.40: 被験者 J の VOR ゲインの結果

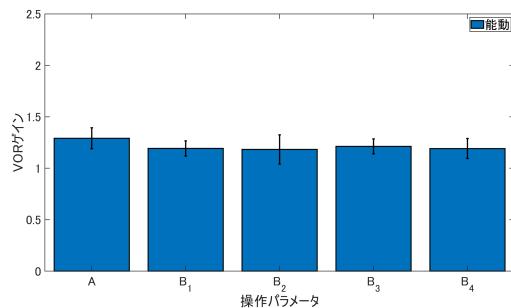


図 4.41: 被験者 K の VOR ゲインの結果

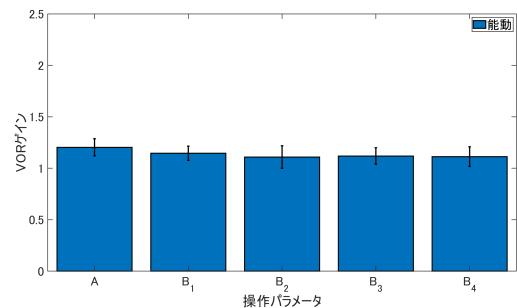


図 4.42: 被験者 L の VOR ゲインの結果

#### 4.8.4 アンケート

図. 4.43 に被験者アンケートの平均値の結果を示す。図. 4.44 から図. 4.55 に被験者 A から L のアンケートの結果を示す。

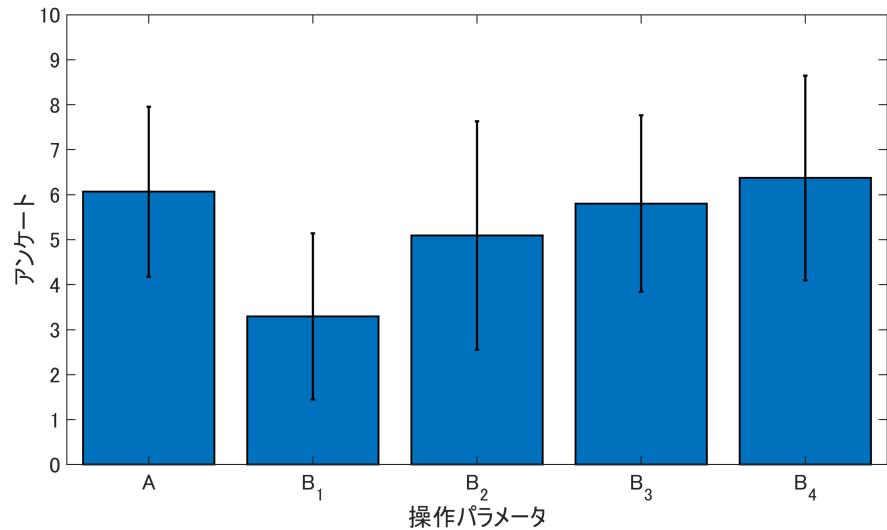


図 4.43: アンケートの結果

図. 4.56 から図. 4.59 にアンケートの項目ごとの被験者 12 名の結果を示す。被験者内の右から操作パラメータ A, 操作パラメータ B の 1 回目, 2 回目, 3 回目, 4 回目のグラフである。

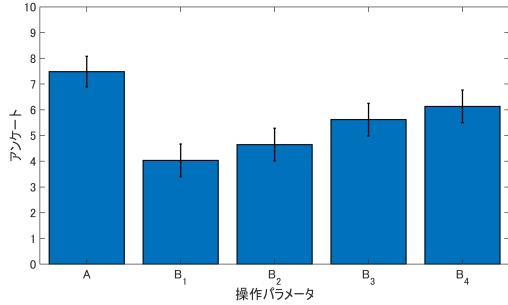


図 4.44: 被験者 A のアンケートの結果

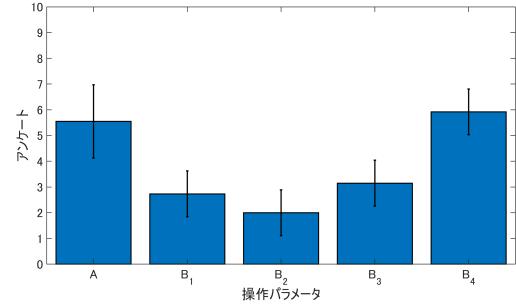


図 4.45: 被験者 B のアンケートの結果

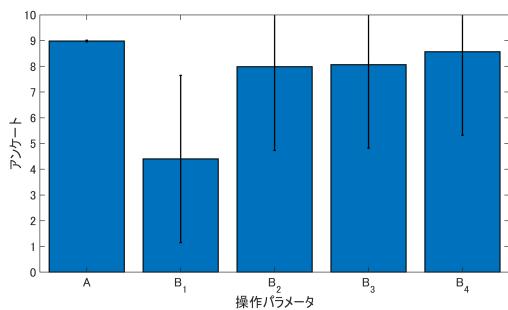


図 4.46: 被験者 C のアンケートの結果

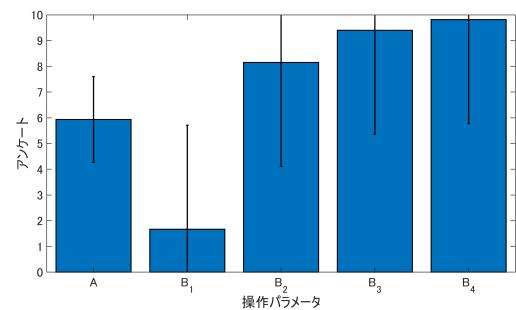


図 4.47: 被験者 D のアンケートの結果

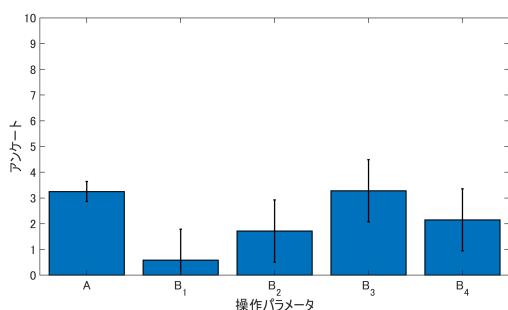


図 4.48: 被験者 E のアンケートの結果

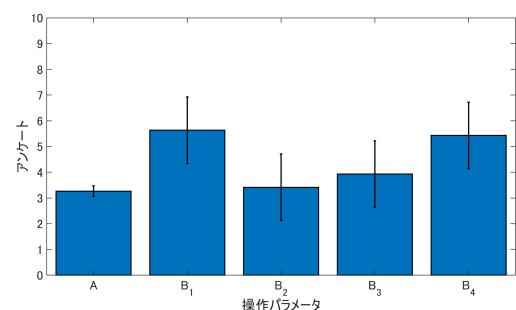


図 4.49: 被験者 F のアンケートの結果

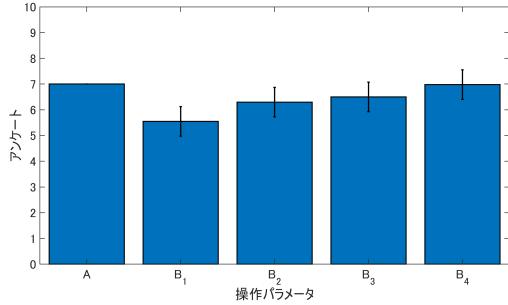


図 4.50: 被験者 G のアンケートの結果

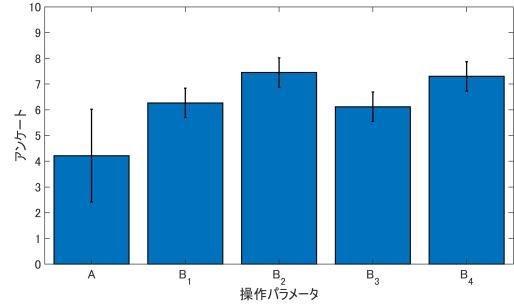


図 4.51: 被験者 H のアンケートの結果

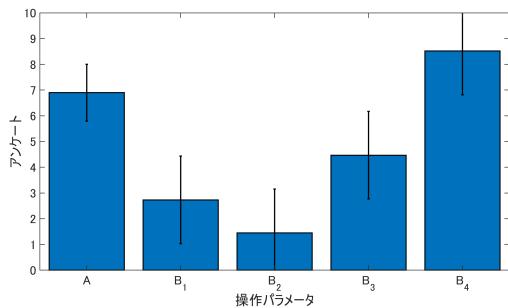


図 4.52: 被験者 I のアンケートの結果

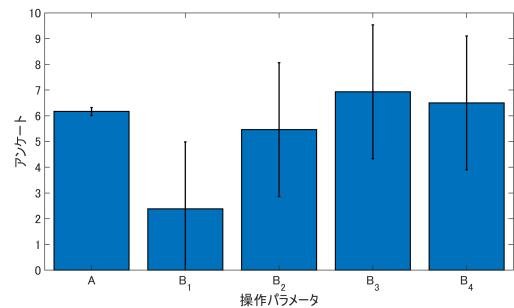


図 4.53: 被験者 J のアンケートの結果

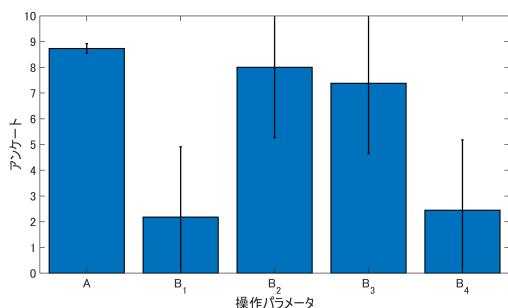


図 4.54: 被験者 K のアンケートの結果

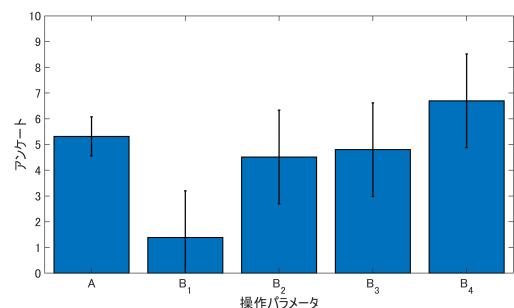


図 4.55: 被験者 L のアンケートの結果

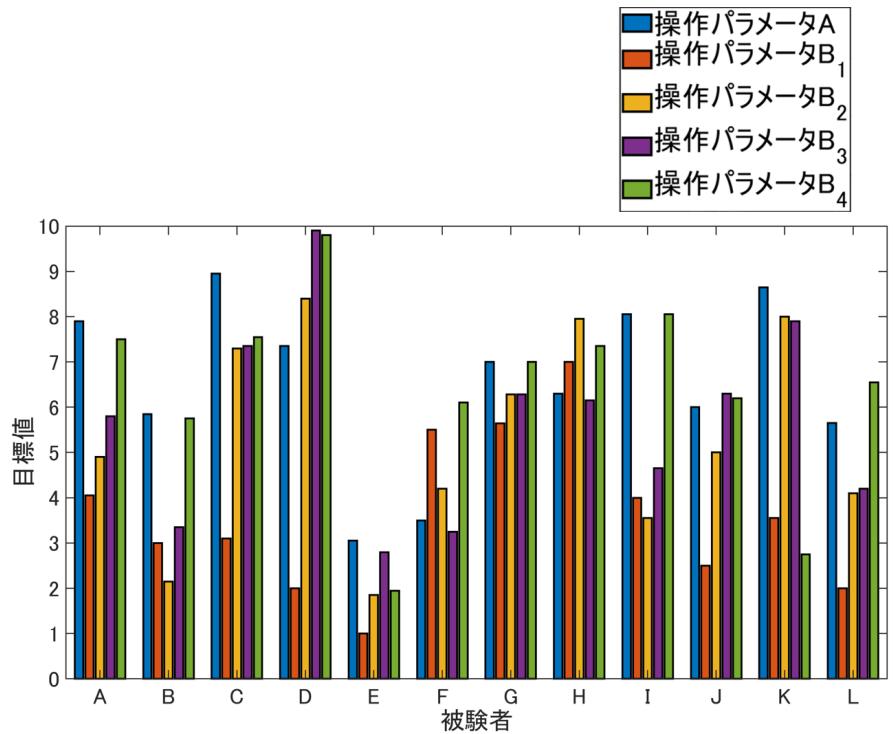


図 4.56: アンケートの質問項目 1 の結果

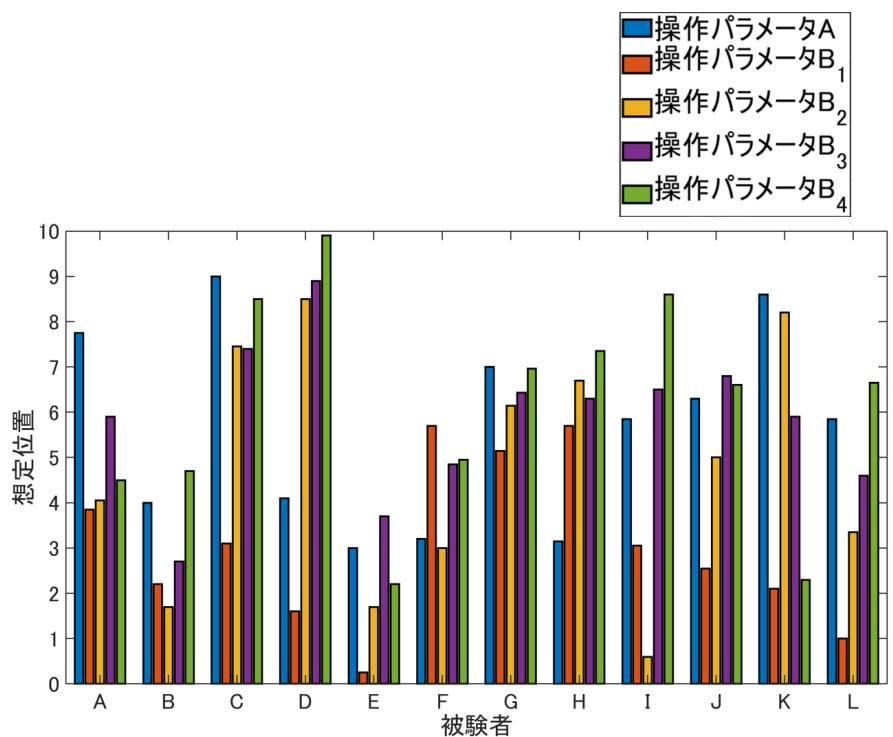


図 4.57: アンケートの質問項目 2 の結果

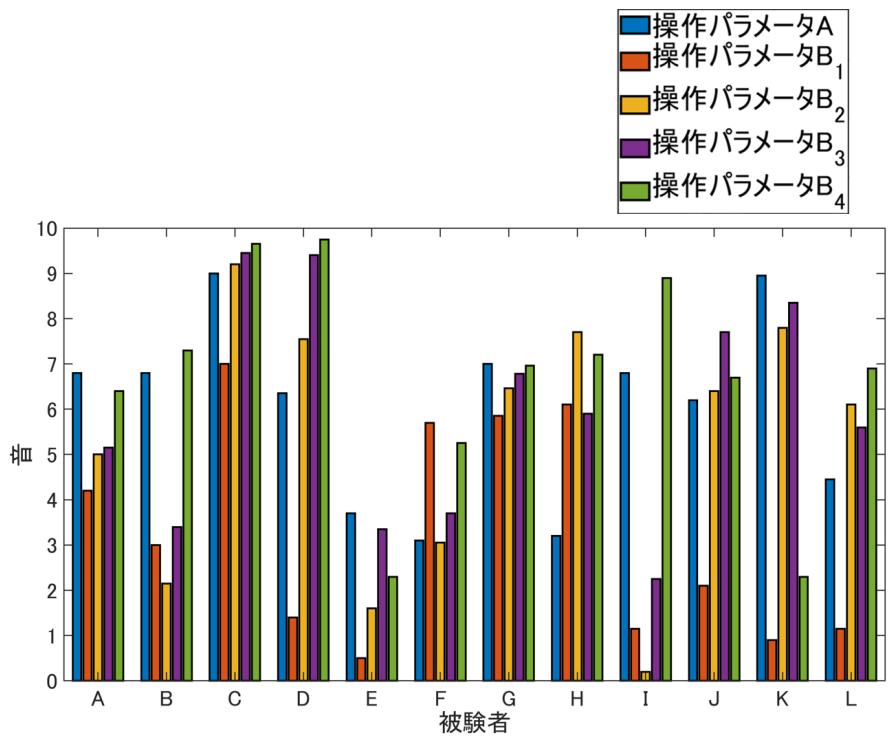


図 4.58: アンケートの質問項目 3 の結果

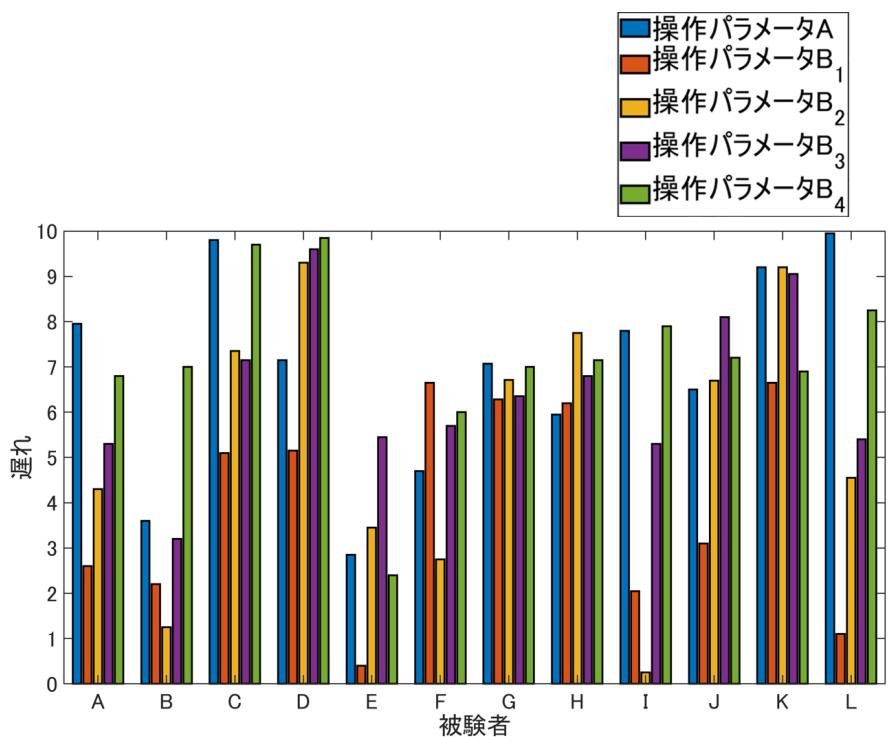


図 4.59: アンケートの質問項目 4 の結果

#### 4.8.5 相関

図. 4.60 に  $Kw$  とアンケートの相関を示す.  $Kw$  とアンケートの間には有意な正の相関が見られた. (Spearman の順位相関で  $r = 0.4123, p = 0.00011$ )

図. 4.61 に  $K$  とアンケートの相関を示す.  $K$  とアンケートの間には有意な正の相関が見られた. (Spearman の順位相関で相関係数  $r = 0.4285, p = 0.000636$ )

図. 4.62 に VOR ゲインとアンケートの相関を示す. VOR ゲインとアンケートの間には有意な正の相関が見られた. (Spearman の順位相関で相関係数  $r = 0.3665, p = 0.0040$ )

図. 4.63 に  $Kw$  と VOR ゲインの相関を示す.  $Kw$  と VOR ゲインの間には有意な正の相関が見られた. (Spearman の順位相関で相関係数  $r = 0.6004, p = 0.00000039$ )

図. 4.64 に  $K$  と VOR ゲインの相関を示す.  $K$  と VOR ゲインの間には有意な正の相関が見られた. (Spearman の順位相関で相関係数  $r = 0.7105, p = 0.000000000203$ )

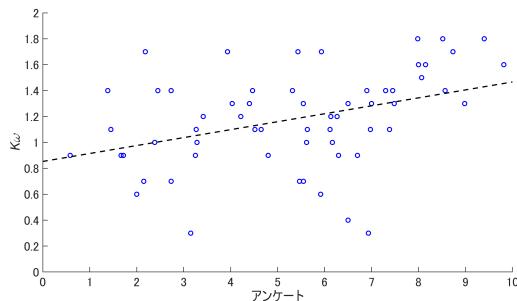


図 4.60:  $Kw$  とアンケートの相関

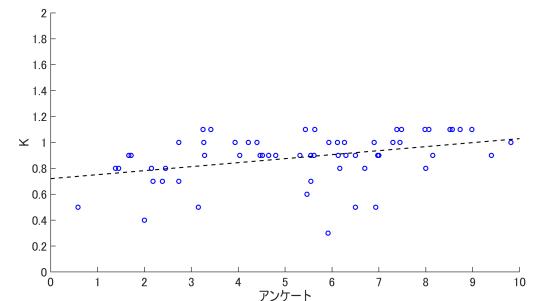


図 4.61:  $K$  とアンケートの相関

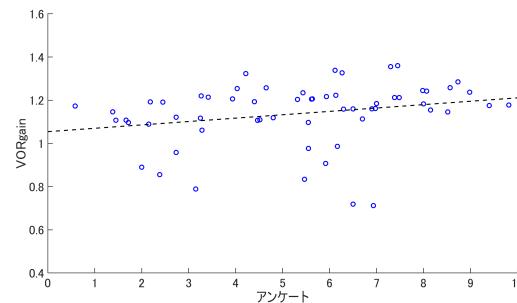


図 4.62: VOR ゲインとアンケートの相関

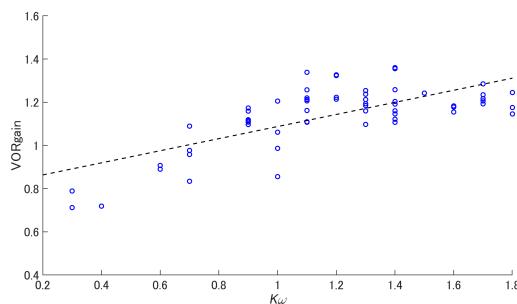


図 4.63:  $Kw$  と VOR ゲインの相関

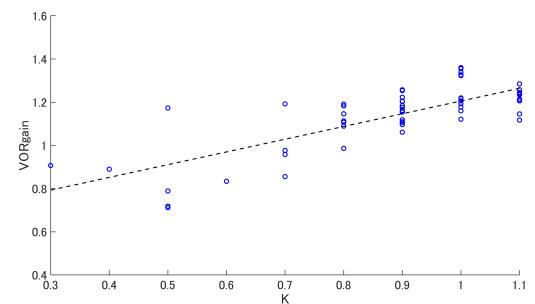


図 4.64:  $K$  と VOR ゲインの相関

## 4.9 考察

本実験は、能動における操作感の異なる搭乗型の回転座席の操作がVORの評価値と操作性に与える影響を検証することを目的とした。そのために、搭乗型の回転座席を用いて、ヨー方向に回転させる時に操作感が異なる操作パラメータを用いた時の眼球角速度と頭部角速度を計測する実験を行った。

結果、操作パラメータAから操作パラメータBに変化させたときに、パラメータ $K_w$ 、VORゲイン、パラメータ $K$ が減少した。さらに、操作パラメータBを繰り返すことでパラメータ $K_w$ が増加した。これは、能動における操作感を変化させた時、変化させる前に比べ、VORの評価値が低くなり、複数回行うことでVORの評価値が変化前の値に近づくという仮説が支持された。さらに、VORの評価値(パラメータ $K_w$ 、VORゲイン、パラメータ $K$ )とアンケートの間に有意な正の相関を見ることが出来た。これは、VORの評価値と操作性のアンケートの間には相関があるという仮説が支持された。

操作感を変化させた時のVORの評価値を見ることはできた。しかし、操作パラメータAと操作パラメータBの1回目の間に有意差を見ることは出来なかった。この理由として、被験者の中には、操作パラメータBの方がVORの評価値が増加することがあった。(図4.10) この傾向が見られた被験者(F, H)は、アンケートでも操作パラメータAより操作パラメータBの方が操作が行いやすいと答えている。(図4.49) これらのことから、被験者によっては、操作パラメータAよりも操作パラメータBの方が $0.5\text{Hz}$ の回転を行いやすかった可能性がある。さらに、VORの評価指標とアンケートの間には正の相関が得られた。これは、操作パラメータAよりも操作パラメータBの方が行いやすかった結果もVORでとらえることができている。よって、機械の操作性をVORにより客観的な評価を行うことが可能であると示唆される。さらにVORは、被験者における操作性の変化をリアルタイムに評価できる可能性がある。

# 第5章 結言

## 5.1 結言

本研究は、ヨー方向における能動と受動の差によるVORの変化を確認できるか検証することを1つ目の目的とした。さらに、能動における操作感の変化がVORに与える影響を検証することを2つ目の目的とした。まず、搭乗型の回転座席を用いて、ヨー方向に能動的・受動的に回転させた時のVORを計測する実験を行った。さらに、操作感が異なる操作パラメータを用いた搭乗型の回転座席をヨー方向に回転させる時のVORを計測する実験を行った。

実験の結果、VORの評価値が能動より受動の方が減少した。さらに、VORの評価値が操作感を変化させた時に値が減少した。さらに、それぞれのVORの評価値と操作性に関するアンケートの結果に有意な正の相関が示された。

のことから本研究では、ヨー方向の機械操作において能動より受動の方がVORの評価値が減少することが確認された。さらに、能動における操作感の変化がVORに影響を与える事が確認でき、VORが操作性の客観的指標として用いることが可能であることが示唆された。

これにより、自動車や建機など搭乗型の機械の操作における操作性をVORにより客観的に評価出来る可能性が示唆される。

## 5.2 今後の展望

本研究では上記の成果を上げることができたが、今後研究を発展させるために必要な課題として、以下の5点挙げられる。

1. ノイズ処理方法の検討
2. VORの変化がゲインと時定数に関係があるのか
3. 操作が難しい操作パラメータに慣れた状態で操作が簡単な操作パラメータに変更したときのVORの変化
4. パラメータ  $K$  の計算方法の検討

1について、計測データにはVORの他、瞬きやそれ以外の視線運動が含まれる。よってVORの評価精度を向上させるためのノイズ処理は重要な課題である。今回の実験では、周波数が固定であったため複数の周波数が複合された周波数での実験時にも使用できる解析方法の手法が必要である。

2について本研究では、操作条件の変更を行うとき、ゲインと時定数の両方を変化させた。そのため、どちらがVORに変化に起因する要因であるかを示すことが出来なかった。よって、ゲインだけを変化させた時、時定数だけを変化させた時のVORの変化を調べることでVORの変化がどちらの要因に起因しているかが確認することが出来ると考える。

3について本研究では、操作が行いやすい操作パラメータAから操作が行いにくい操作パラメータBへの変化でしか実験を行わなかった。しかし、数名の被験者が操作パラメータBの方が操作が行いやすく、パラメータ $K_\omega$ やVORゲインが操作パラメータAより増加する結果が得られた。この結果より、他の被験者でも操作が行いにくい操作パラメータから操作が行いやすいパラメータに変更した場合、パラメータ $K_\omega$ やVORゲインが増加する結果が得られるか調査する必要がある。

4について、本実験で用いたパラメータKの計算方法は頭部角速度にパラメータKをかけたものを推定される眼球角速度とするものである。これには、時間遅れが考慮されておらず、頭部と眼球の時間のずれがある場合、表現することが出来ない。よって、時間遅れを考慮する計算を追加する必要があると考えられる。

## 謝辞

本研究を進めるにあたって、指導教官の和田隆広教授にはVORやVOR推定モデルの基礎知識をご教授していただき、実験やその解析の際はご指導頂きました。また論文執筆の際、私の原稿を精細に添削していただき、重ねて感謝の意を表します。同研究室研究員の佐藤勇起研究員には、私の研究の問題解決のため数多くの助言をして頂きました。本研究を進める中で大変お世話になり、誠に感謝致します。同研究室の事務補助員である武村ともみ様には、物品の購入時の会計やその他書類の提出を引き受けて頂き、誠に感謝致します。また同研究室の学生や実験に協力して頂いた方々につきましても、本研究を進める中で多くの助けを頂き、併せて深い感謝の意を表します。

# 参考文献

- [1] Merfeld, D. M. M., & Zupan, L. H. H. (2002). Neural Processing of Gravitoinertial Cues in Humans. III. Modeling Tilt and Translation Responses. *Journal of Neurophysiology*, 87(2), 819–833. <https://doi.org/10.1152/jn.00485.2001>
- [2] Obinata, G., Tokuda, S., & Shibata, N. (2008). Mental workloads can be objectively quantified in real-time using VOR (vestibulo-ocular reflex). In *Proceedings of the 17th World Congress of IFAC* (pp. 15094–15099). <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.1635>
- [3] Kamiji, N., Kurata, Y., Wada, T., & Doi, S. (2007). Modeling and validation of carsickness mechanism. In *Proceedings of International Conference on Instrumentation, Control and Information Technology* (pp. 1138–1143).
- [4] Wada, T., Fujisawa, S., & Doi, S. (2018). Analysis of driver's head tilt using a mathematical model of motion sickness. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 63, 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2016.11.003>
- [5] Uefune, T., Wada, T., & Sonoda, K. (2016). Computation of the Vestibulo-Ocular Reflex for eye closure based on the 6DOF-SVC model. In *Proceedings of IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics* (pp. 1285–1290).
- [6] Uefune, T., Wada, T., & Asao, T. (2018). Modulation of Vestibulo-Ocular Reflex by Volition of Machine Operation. In *IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics*. Miyazaki.
- [7] 内川 恵二：聴覚・触覚・前庭感覺., 朝倉書店, 2008.
- [8] Merfeld, D. M. (1995). Modeling the vestibulo-ocular reflex of the squirrel monkey during eccentric rotation and roll tilt. *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation Cérébrale*, 106(1), 123–134. <https://doi.org/10.1007/BF00241362>
- [9] Bos, J. E., & Bles, W. (2002). Theoretical considerations on canal-otolith interaction and an observer model. *Biological Cybernetics*, 86, 191–207. <https://doi.org/10.1007/s00422-001-0289-7>
- [10] Satou, Y. & Zhang, X. (2009). Theoretical Vestibulo-Ocular Reflex Model for Robotic Binocular Motor Control System. *Journal of the Robotics Society of Japan*, 27, 10, 1123–1131. <https://doi.org/10.7210/jrsj.27.1123>