視覚系と前庭系の相互作用による水平回転感覚の基礎特性

Basic Property of Yawing Sensation in Visual-vestibular Interaction

正会員 林 秀彦[†], 宇和 伸明[†], 安藤 広志[†]

Hidehiko Hayashi[†], Nobuaki Uwa[†] and Hiroshi Ando[†]

Abstract We investigated visual-vestibular interaction when a body that was passively rotated about its vertical axis while rotating vertical gratings were visually presented. A turntable, which generated a constant angular acceleration stimulated the semicircular canals and a head mounted display, provided an independent visual input. Vestibular stimulation ranged between 0.02 deg/s^2 and 2.0 deg/s^2 . We found that visual image information was predominant when the visual image was presented and the body acceleration was less than 0.1 deg/s^2 . We also found that in the case of opposite direction between body rotation and visual image rotation, the estimated magnitude of a body rotation increased with the acceleration of visual image when the vestibular acceleration was between 0.1 deg/s^2 and 1.0 deg/s^2 . These experimental findings can be used to develop a simulator or a display which can effectively produce a rotational sensation of the body.

キーワード：異種感覚相互作用，乗り物シミュレータ，水平回転運動，半規管，角加速度

1. ま え が き

バーチャルリアリティ技術を利用したシミュレータには、乗り物の運転、産業機器の操作、手術などの行為を模擬できる体験型システムがあり、さまざまな産業分野で活用されている^{1)~6)}。これらのシミュレータの物理要因に対する感覚特性の定量化は、それぞれの目的に応じた感覚を誘発させるために重要である。それらの感覚特性を考慮してシミュレータを設計することが、没入感の欠如やオペレータのパフォーマンスの低下を防止するだけでなく、動揺病やサイバーシックネス⁷⁾などの安全性・快適性を阻害する要因を除去することにつながる。

人間の感覚特性の定量化は、これまでの知覚研究では視聴覚を対象としたものが、かなりの割合を占めており、触・圧などの皮膚感覚、振動感覚、平衡感覚、自己受容感覚など、身体感覚の定量化に関する研究の遅れが指摘されている⁸⁾。しかしながら、動揺病の発症には、視覚、前庭、体性感覚、中枢が関与していると言われており⁹⁾、視覚のみならず前庭や体性感覚を含めた検討を行う必要がある。なお、前庭は、内耳の一部にある平衡感覚を感受する役割を担う耳石器と半規管を合わせた総称を指しており、頭部を含め

た身体の加速度を検知することができる。また、動揺病の原因の有力な説の一つとして感覚不一致説 (sensory conflict theory)¹⁰⁾があることから、これらの感覚間の相互影響を考慮した検討が重要であるといえる。そこで、本稿では視覚と前庭に着目し、異種感覚間の相互影響の定量化の一つとして、特に水平回転運動と視覚刺激を同時に与えたときの回転感覚について検討を行った。

視覚と前庭の相互影響の研究は、前庭系の感覚器に応じて、身体が直線運動する場合と回転運動する場合の二つに大きく分けられる。これは前庭迷路系が頭部を含めた身体の加速度を検知する耳石器と半規管から構成されており、耳石器が主に直線運動を検出し、半規管が回転運動を検知するためである。さらに、それぞれの運動は、3次元空間における3軸に分けられる。例えば、回転運動の場合は、ローリング (rolling)、ピッチング (pitching)、ヨーイング (yawing) の三つに分けることができる。これらの回転運動のうち、ヨーイングは、最も自己回転感を引き起こしやすいが、最も動揺病を引き起こしにくいという報告がある¹¹⁾。本研究では、実験における安全性が高く、効果的に回転感覚を生じさせる可能性の高い水平回転運動である、ヨーイングと視覚の相互影響について検討した。

水平回転運動と視覚の相互影響の従来研究については、例えば、椅子と円筒状の回転ドラムを使い、水平回転による前庭刺激と視運動性の視覚刺激を独立に呈示したときの自己運動感覚¹²⁾のオリジナル記録が報告されている¹³⁾。その結果では、身体の回転方向と同方向に視覚刺激が動いている場合、等角速度運動から減速したときに身体の回転方

2003 年 映像情報メディア学会冬季大会で発表

2004 年 11 月 5 日受付, 2005 年 2 月 4 日再受付, 2005 年 3 月 11 日採録

[†]ATR 人間情報科学研究所

(〒619-0288 「けいはんな学研都市」京都府相楽郡精華町 光台 2-2-2, TEL: 0774-95-1111)

[†]ATR Human Information Science Laboratories

(2-2-2, Hikaridai "Keihanna Science City" (Seika-cho, Souraku-gun), Kyoto 619-0288, Japan)

向と逆方向への加速として判別されているが、周囲が静止しており身体が回転する場合、つまり身体の回転方向と逆方向へ視運動情報が与えられる自然な状態では、このような欠陥はほぼ補償されており、等速度運動から減速したときにおいても、身体の回転方向と逆方向への加速を判別することがなくなっている。また、視覚刺激のみが動いている場合は、身体が動いているように感じており、視覚情報が前庭情報よりも優位に働く可能性があることを示唆している。この報告では、椅子と回転ドラムの回転方向の組合せが回転感覚に及ぼす変化が調べられているが、椅子と回転ドラムの回転角加速度の大きさの違いによる影響の詳細は明らかでない。

加速度の大きさについては、視覚と前庭の相互影響の報告の一つとして、前進するカートを用いた受動的な直進運動による前庭情報と、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を用いて仮想的に廊下と側壁を呈示した視覚情報とを観察者に同時に与え、その前庭情報と視覚情報の比率の変化が移動距離感覚に及ぼす影響を調べた実験とモデルについての報告がある⁷⁾。その結果、視覚情報と前庭情報の比率を約4倍で呈示すれば、前庭情報のみの場合と等しい大きさの移動距離感覚が得られることが、実験結果を用いたモデルにより示されている。しかし、カートを用いた直進運動では、移動方向は前進のみであるため、方向の弁別についての検討はなされていない。また、視覚と前庭の相互影響を調べるうえで、直線運動の結果を回転運動に直接的に適用できるとは限らない。

水平回転運動における角加速度の大きさと視覚の相互影響の先行研究として、我々は前庭刺激の刺激閾を求め、前庭刺激の刺激閾に対する画像呈示の影響を調べた¹⁴⁾。実験では、身体の回転運動中にカメラ画像を呈示し、画像を身体の回転方向と逆方向へ動かしたときの身体の回転方向の弁別課題を行い、方向弁別の閾値として 0.1 deg/s^2 程度を得た。

本稿では、この実験結果を踏まえ、前庭刺激の閾値付近を挟む回転角加速度である 0.02 deg/s^2 から 2.0 deg/s^2 までの範囲における、視覚系と前庭系の相互影響を調べた。我々の先行研究では、回転量についての検討はなされていないが、本研究では、回転感覚応答取得システムを用いて回転感覚の方向と回転量を取得し、回転感覚の基本特性を見出す。本研究により、前庭刺激と視覚刺激の相互影響として、加速度の大きさや方向に関連する回転感覚の基本特性を見出すことができれば、視覚と前庭の異種感覚間の相互影響の定量化の一つとして新たな知見を提供できるばかりでなく、身体の回転運動と画像を操作することで回転感覚を制御することも可能であり、回転運動を伴うシミュレータの設計や回転感覚を制御するディスプレイの研究・開発に貢献できる。

2. 実験

2.1 実験装置

視覚系と前庭系の相互作用による水平回転感覚を調べるために、被験者を載せて回転するターンテーブルと画像情報を呈示するためのHMDを備えた回転感覚呈示システムおよび知覚された回転運動の応答を取得するための回転感覚応答取得システムを開発した。実験装置を図1に示す。

(1) 回転感覚呈示システム

ターンテーブルはステッピングモータで駆動され、等角加速度で回転する。この加速度は前庭器官へ入力される刺激である。動作時間は20秒で、前半の10秒は加速し、逆に後半は減速する。被験者の上部に設置した2台のカメラは、60mmの間隔で固定され、HMDへ接続されている。HMDの画角は対角31度で、2m先に画面が仮想的に呈示される。左右2台のカメラの出力は、左右眼独立にHMDに呈示でき、3D表示が可能である。HMDにはPCも接続でき、CGによる視覚刺激も呈示できる。またカメラ部もターンテーブルと同様の回転動作を行うことができる。カメラ回転時の角加速度はターンテーブルの角加速度と等しく、回転時間も同じく20秒である。

(2) 回転感覚応答取得システム

被験者の応答取得システムは、ターンテーブル上に設置されたポテンショメータと、押しボタンスイッチおよび被験者への合図用のバイブレータを備えたスイッチボックスから構成されている。この応答取得システムを用いて、回転方向(L,R)と回転量(deg)による回転感覚の応答を取得できる。回転運動の開始と終了時には、バイブレータを作動させ、被験者への合図とした。

なお、ターンテーブルを用いて、身体へ与える物理的な回転運動と知覚された回転運動とを区別するために、ターンテーブルを用いた回転運動に対する知覚された回転運動を回転感覚と定義した。そして、回転感覚における回転方向を回転感覚方向、回転感覚における回転量を回転感覚量と呼ぶこととした。

2.2 実験1

(1) 目的

実験1の目的は、2.1節で説明した本実験装置が被験者への入出力を介して、正しく動作することを確認することである。つまり、本実験装置を用いることで、物理的な回転量に対して応答する回転感覚を正しく測定できることを保証するための実験である。回転感覚呈示システムに備えつけたカメラによる回転運動を入力とし、被験者の操作する回転感覚応答取得システムを用いて得られる知覚量を出力として、入力と出力の対応関係を調べた。入力と出力の関係が、カメラ画像の角加速度をパラメータとして、ほぼ線形に対応することを示すことができれば、本実験における回転感覚は本実験装置を用いて、正しく測定できるといえる。

図 1 実験装置
Experimental apparatus.

(2) 方法

回転感覚呈示システムに備えつけたカメラによる回転運動の知覚量を、回転感覚応答取得システムを用いて各被験者に応答させた。視覚情報には、水平回転運動するカメラに周囲の室内風景を映した画像を用いた。物理的な回転量を被験者が正しく知覚できるようにするために、周囲の室内風景は、被験者によって日常の見慣れた景色を用いた。つまり周囲の物体の位置は既知であった。このような条件下では、被験者は入力として与えられたカメラの水平回転運動と物体の位置情報を含む画像を手がかりとして、実際の回転運動を正しく知覚することが推測できる。したがって、入力として与えた回転運動と被験者の知覚量として得られる出力がほぼ一致すれば、回転運動を与えるための回転感覚呈示システムと知覚される回転運動を応答するための回転感覚応答取得システムは、正しい動作をしていることを示唆できる。一方、入力と出力の間に一致した関係が示されなければ、実験装置と被験者の入出力の間にいくつかの誤りがあることを示唆できる。

カメラの角加速度が 0.02, 0.40, 0.80, 1.2, 1.6, 2.0 (deg/s^2) の 6 通りと、回転方向が 2 通りの 12 通りのパターンに対し、各々 6 試行、計 72 試行の測定を行った。各試行の順序は被験者ごとにランダムであった。視力と前庭器官がともに正常な成人男性 2 名を被験者とした。被験者には、回転運動終了の合図の後に、回転運動の知覚量を応答するように教示した。

(3) 結果

実験の結果を図 2 に示す。横軸はカメラの角加速度、縦軸は知覚された回転量の応答、右回転を正、左回転を負で示してある。実際のカメラの回転量は、角加速度の増加に伴い、線形に増加する (図 2 の点線)。被験者の応答も、図 2 に示すように、ほぼ線形に増加した。また左右の偏りも少なかった。

図 2 カメラ画像の回転運動における回転感覚応答
Estimation of rotational magnitude and direction of camera image motion.

(4) 考察

実験 1 では、回転感覚呈示システムに備えつけたカメラによる回転運動と回転感覚応答取得システムにより得られた知覚量との対応を調べ、カメラによる回転運動が大きくなるのに伴い、回転運動の知覚量も線形に増加していることがわかった。したがって、被験者の知覚量が実際の回転運動とほぼ一致して得られたことから、回転運動を与えるための回転感覚呈示システムと知覚される回転運動を応答するための回転感覚応答取得システムはともに誤りが少なく、実験装置が被験者への入出力を介して正しく動作することを確認できた。

2.3 実験 2

(1) 目的

実験 2 は、視覚情報を遮断した状態での身体の水平回転運動に対する、回転感覚の応答特性を調べるのが目的である。実験 2 は、後述する実験 3 における視覚と前庭の相互作用による回転感覚を調べるうえでの基準 (Base) を設定するためにも必要である。

(2) 方法

被験者は図 1 に示すように、ターンテーブルの中心に設置した椅子に座り、周囲の明かりが入らないようにマスクを装着した。実験時には、装置の動作状況を音によって把握できないようにするための耳栓をした。

ターンテーブルの回転運動の角加速度は、0.02, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 2.0 (deg/s^2) の 6 通りとした。試行回数は実験 1 と同様に計 72 試行であった。各試行の順序は被験者ごとにランダムであった。被験者は実験 1 と同様であった。被験者には、回転運動終了の合図の後に、身体の回転運動を回転感覚応答取得システムを用いて応答するように教示した。回転感覚応答取得システムにより得られた測定の結果は、回転感覚方向の正答率と回転感覚量に分けて分析した。

(3) 結果

回転感覚方向の正答率を図 3 に示す。ターンテーブルの

角加速度を横軸にとり、正答率を縦軸に表した。図3が示すように、角加速度が 1.0 deg/s^2 、 2.0 deg/s^2 では、正答率 95%以上、 0.5 deg/s^2 のときは、正答率は 70%、 0.1 deg/s^2 以下では、正答率は 60%以下であった。

全被験者における回転感覚量の応答特性を図4に示す。横軸はターンテーブルの角加速度、縦軸は回転感覚量である。身体の水平回転運動を前庭情報とした場合 (Vestibular information) と、物理的な回転運動 (Physical value) との比較を図示した。図4に示す各点は、ターンテーブルの角加速度ごとの回転感覚量の平均と標準偏差を示している。回転感覚量の左右の偏りは、実験1と同様に少ないため、各点は絶対値を用いて計算している。ターンテーブルの角加速度が 2.0 deg/s^2 より小さいとき、Physical value に比べて、Vestibular information の回転感覚量は高い値を示した。一方、角加速度が 2.0 deg/s^2 以上では、Physical value と比較して Vestibular information が与えられたとき、回転感覚量は低い値を示した。各被験者における回転感覚量の応答特性を示した図5と図6はともに全被験者における回転感覚量の応答特性を示した図4と同じ傾向を示した。

(4) 考 察

実験2では、視覚情報を遮断した状態での身体の水平回転運動に対する回転感覚の応答特性を測定した。

回転感覚方向の正答率については、図3に示したように、角加速度が 0.1 deg/s^2 以下では、視覚情報を遮断したときに、実際のターンテーブルの回転方向を正しく知覚することは容易ではないことが示唆される。この結果は、先行研究¹⁴⁾の報告から、視覚情報を遮断したときの回転方向の閾値は、角加速度が 0.16 deg/s^2 程度であったことから妥当な結果であるといえる。

回転感覚量については、図4に示すように、角加速度が 2.0 deg/s^2 のときを除いて、実際の回転量よりも大きな値を示した。この結果は、関連研究⁷⁾として報告されている直進運動と視覚刺激の実験結果と同様の傾向である。すなわち、視覚情報を遮断したときの前庭情報は、物理的な運動よりも大きく知覚される可能性を示唆している。また、図5と図6に示すように、被験者ごとに示した結果が類似した傾向を示した。したがって、十分に大きな個人差はみとめられなかった。

2.4 実験3

(1) 目 的

前庭刺激と視覚刺激の同時呈示による水平回転感覚の応答特性を得るための実験を行った。実験3は、視覚情報を付加した状態での身体の水平回転運動に対する回転感覚の応答特性を調べることが目的である。

(2) 方 法

視覚刺激は、物体の位置情報や距離情報を含まないように、CGによる白黒の縦縞格子画像とした。白黒の縦縞格子画像は $800 \times 600 \text{ pixel}$ で、2.1節で説明したHMDを

図3 視覚情報のないときの身体の回転方向の正答率
Correct response of rotational direction in the non-visual condition.

図4 回転量の応答特性
Estimation of rotational magnitude.

図5 回転量の応答特性 (NU)
Estimation of rotational magnitude (Subject: NU).

用いて呈示した。画像は等角加速度 0.02 、 0.05 、 0.1 、 0.5 、 1.0 、 $2.0 \text{ (deg/s}^2\text{)}$ で水平回転運動させた。

視覚情報6通り、前庭情報6通り、視覚情報と前庭情報のそれぞれ左右方向の4通りを組合せたパターンを3試行実施したので計432試行の測定を行った。各試行の順序は被験者ごとにランダムであった。被験者は実験2と同一であった。被験者には、回転運動終了の合図の後に、ターンテーブルの回転運動を応答取得システムを用いて応答する

図 6 回転量の応答特性 (HH)
Estimation of rotational magnitude (Subject: HH).

ように教示した。

実験結果は、回転感覚方向の正答率と回転感覚量に分けて分析した。ターンテーブルの角加速度ごとに回転感覚方向の正答率を示すことで、前庭系と視覚系の寄与する割合を検討した。回転感覚量については、画像の角加速度を横軸にとって、視覚情報が回転感覚量に及ぼす影響を検討した。次に、前庭情報と視覚情報の相互影響を統計的に明らかにするために、ターンテーブルの角加速度の大きさごとに、縦縞画像の角加速度の大きさと方向の違いが、回転感覚量に及ぼす影響を2要因の分散分析により検定した。そして、その後、分散分析の結果に基づいて、画像の角加速度の大きさが回転感覚量に及ぼす影響をみるために、多重比較を行った。

(3) 結果

ターンテーブルの角加速度ごとに回転方向の正答率を求めた(図7の Mix direction)。図7の Mix direction は、視覚情報なしの場合(実験2)と比較するためのものであり、考察において後述する。図7の Mix direction を分析するために、図7ではターンテーブルと画像が同方向へ回転する場合(Same direction)と、逆方向へ回転する場合(Opposite direction)とに分けて正答率を示した。なお、回転方向について、日常生活における環境と比較すると、Opposite direction は、周囲が静止している環境において、頭部を回転させたときにみえる視運動情報と同じ状況であるため、自然な状況であるといえるが、Same direction は、頭部を回転させたときに周囲の環境が伴って同じ方向へ動く状況であるため不自然な状況であるといえる。

ターンテーブルの角加速度が 1.0 deg/s^2 、 2.0 deg/s^2 では、正答率 90%以上の値を示した。角加速度が 0.5 deg/s^2 のとき、正答率は 76%となった。角加速度が 0.1 deg/sec^2 以下では、正答率が 60%以下となった。(図7 Mix direction)。図7の Opposite direction では、ターンテーブルの全ての角加速度において 80%以上の高い正答率を示した。図7の Same direction では、ターンテーブルの角加速度が 0.1 deg/s^2 以下において正答率が 20%程度の低い正答

図 7 視覚情報を伴う条件での身体の回転方向の正答率
Correct response of rotational direction of the turntable with a vertical grating.

表 1 分散分析の結果。
Result of Two-Way ANOVA.

Acceleration of turntable	Factor 1 (Direction)		Factor 2 (Acceleration of image)		DOF
0.02	0.40	n.s	1.27	n.s	167
0.05	0.11	n.s	0.87	n.s	167
0.1	0.76	n.s	3.94	$p < 0.05$	167
0.5	4.74	$p < 0.05$	2.51	$p < 0.10$	167
1	6.12	$p < 0.05$	3.82	$p < 0.05$	167
2	2.24	n.s	0.52	n.s	167

率を示した。

画像の角加速度の大きさの違いが回転感覚量に影響を与えるかどうかを調べるために、ターンテーブルの角加速度の大きさごとに、縦縞画像の角加速度の大きさと方向の違いが、回転感覚量に及ぼす影響を2要因の分散分析により検定した(表1)。表1において、二つの要因のうち、一つはターンテーブルと画像の回転方向(Factor 1)、もう一つは画像の角加速度の大きさ(Factor 2)である。Factor 1の水準はターンテーブルと画像が同方向か、逆方向か、そして画像が呈示されない場合の計三つである。Factor 2の水準は、実験4の縦縞画像の加速度について小さいほうから順に二つを合わせた平均加速度 0.035 、 0.3 、 1.5 deg/s^2 の三つと画像が呈示されない場合の一つを合わせた計四つである。表1において、 $p < \alpha$ の p は検定統計量の確率値、 α は有意水準、DOFは自由度を表している。有意水準は $\alpha = 0.05$ 、または $\alpha = 0.10$ とした。分散分析の結果、ターンテーブルの角加速度 0.5 deg/s^2 、 1.0 deg/sec^2 では、Factor 1とFactor 2の両方ともに有意であり、画像の角加速度の違いが回転感覚に及ぼす影響は少なくはないことが示唆された。ターンテーブルの角加速度 0.1 deg/s^2 はFactor 2について有意であった。交互作用はすべての角加速度の場合についてみられなかった。

分散分析の結果から、回転感覚量において有意差がみられたターンテーブルの角加速度が 0.1 deg/s^2 から 1.0 deg/s^2 の範囲において、画像の角加速度の大きさの影響を検討するために多重比較を行った。ターンテーブルのそれぞれの角加速度において、ターンテーブルと画像が、ともに同方向

図 8 多重比較検定: ターンテーブルと画像は同じ回転方向で, ターンテーブルの角加速度が 0.5 deg/s^2

Multiple comparisons: acceleration of turntable is 0.5 deg/s^2 . (Same direction)

図 9 多重比較検定: ターンテーブルと画像は逆方向で, ターンテーブルの角加速度が 0.5 deg/s^2

Multiple comparisons: acceleration of turntable is 0.5 deg/s^2 . (Opposite direction)

図 10 多重比較検定: ターンテーブルと画像は同じ方向で, ターンテーブルの角加速度が 1.0 deg/s^2

Multiple comparisons: acceleration of turntable is 1.0 deg/s^2 . (Same direction)

図 11 多重比較検定: ターンテーブルと画像は逆方向で, ターンテーブルの角加速度が 1.0 deg/s^2

Multiple comparisons: acceleration of turntable is 1.0 deg/s^2 . (Opposite direction)

度 0.3 deg/s^2 の回転感覚量は, ターンテーブルの角加速度が 1.0 deg/s^2 の場合に, 画像とターンテーブルが同方向でも逆方向でも, どちらの方向においても有意差がみられた. 画像の角加速度 0.035 deg/s^2 と, 角加速度 1.5 deg/s^2 については, 画像とターンテーブルが逆方向の場合に有意となった. また, グラフから観測されるように, 画像とターンテーブルが逆方向の場合, 画像の角加速度 0.3 deg/s^2 のときの回転感覚量は, 画像の角加速度が 0.035 deg/s^2 と 1.5 deg/s^2 のときの中間の回転感覚量を示した. 一方, ターンテーブルと画像が同方向の場合は, 画像の角加速度 0.035 deg/s^2 と角加速度 1.5 deg/s^2 の間に対して有意差はみられず, 画像の角加速度が増加しても, 回転感覚量には大きな変化はみられなかった. このように多重比較において, 画像の角加速度が増加するにつれて回転感覚量が增大する結果は, 先の分散分析の結果において, 有意水準を満たしたターンテーブルの角加速度が 0.1 deg/s^2 においても同様にみられた. 分散分析の結果において, 有意水準を満たしていない角加速度が 2.0 deg/s^2 のときは, 多重比較においても有意差はみられなかった.

以上の多重比較の結果からまとめると, 0.1 deg/s^2 から 1.0 deg/s^2 の範囲では, ターンテーブルと画像が同方向のときは, 画像の角加速度の大きさに対応して, 回転感覚量が変化する傾向は充分にはみられないが, ターンテーブルと画像が逆方向のときは, 画像の角加速度が増加するにつれて回転感覚量が增大する傾向がみられた.

(4) 考 察

実験 3 の結果に基づき, 視覚系と前庭系の相互作用による水平回転感覚について, 回転感覚方向と回転感覚量に分けて考察する.

回転感覚方向について考察する. 図 7 の Mix direction では, ターンテーブルの角加速度ごとに回転感覚方向の正答率を示しており, 角加速度が 1.0 deg/s^2 , 2.0 deg/s^2 では, 正答率 90%以上の値を示したが, 角加速度 0.1 deg/s^2 以下では正答率 60%程度以下に落ち込みがみられた. したがって, この結果を実験 2 と比較すると, 実験 2 の図 3 で

の場合と逆方向の場合に分けて Tukey の HSD 法による検定を行った. 有意水準は 5%である. 試行数は, 基準 (Base) および画像の角加速度ごとに, それぞれ 24 試行である.

ターンテーブルの角加速度 0.5 deg/s^2 , 1.0 deg/s^2 のときの結果を, 図 8, 図 9, 図 10, 図 11 に示す. 画像の呈示がない場合を基準 (Base) として, 画像の角加速度が小さいほうから順に 0.035 deg/s^2 , 0.3 deg/s^2 , 1.5 deg/s^2 を横軸とし, 回転感覚量を縦軸に示した. 結果は, Base と角加速度 0.035 deg/s^2 は, 画像とターンテーブルがどちらの方向においても有意となった. さらに, Base と角加速

求めた視覚情報を含まない場合の回転感覚方向の正答率とほぼ同様の傾向であったといえる。よって、この結果のみからは、回転感覚方向については、前庭情報に視覚情報を付加することの影響が見出されていないように一見してみえる。しかしながら、実験3における回転感覚方向の正答率(図7のMix direction)の内訳をみると、ターンテーブルの角加速度が 0.1 deg/s^2 以下のときに、図7のOpposite directionと図7のSame directionでは、それぞれの正答率についての明確な差異がみられる。例えば、ターンテーブルの角加速度が 0.05 deg/s^2 のときは、Same directionの正答率15%、Opposite directionの正答率83%で、その差異は明確であるといえる。このような差異から考察すれば、前庭情報の回転方向が画像と同方向か逆方向かに関わらず、ターンテーブルの角加速度が 0.1 deg/s^2 以下の場合、画像の回転方向とは逆方向への回転感覚が得られたといえる。したがって、ターンテーブルの角加速度が 0.1 deg/s^2 以下の場合、回転方向の弁別は、前庭情報よりも視覚情報が優位である可能性を示唆している。

回転感覚量について考察する。分散分析の結果では、画像の回転量の大きさの違いが回転感覚量に与える影響について、ターンテーブルの角加速度が 0.1 deg/s^2 、 0.5 deg/s^2 、 1.0 deg/s^2 のときに有意差がみられた。このことは、画像の回転量を変化させることで、回転感覚量に差異を見出せる可能性が示唆されたといえる。しかしながら、その変化量に伴い、回転感覚量も増加するかどうかは多重比較の結果が必要である。多重比較の結果では、 0.1 deg/s^2 から 1.0 deg/s^2 の範囲において、ターンテーブルと画像が逆方向のときに、画像の角加速度が増加するにつれて回転感覚量が増大する傾向がみられた。したがって、 0.1 deg/s^2 から 1.0 deg/s^2 の範囲のとき、ターンテーブルと画像が逆方向の場合に、前庭情報と視覚情報の間に線形な対応がある可能性が示唆される。

3. 総 合 考 察

実験1では、本実験装置を用いて回転感覚を正しく測定できることを確認した。実験2では、視覚情報を遮断したときの身体の回転運動についての回転感覚特性を示した。実験3では、身体の回転運動に視覚情報を付加した場合の回転感覚の特徴を統計的手法により抽出した。以上の実験1、実験2、実験3の結果から、視覚と前庭の相互作用による水平回転感覚の特性について以下のようにまとめることができる。

回転感覚方向については、身体の回転角加速度が 0.1 deg/s^2 以下では、身体の回転方向に関わらず、画像の回転方向とは逆方向へ回転感覚が誘発されることが示唆された。回転感覚量については、身体の回転角加速度 0.1 deg/s^2 から 1.0 deg/s^2 の範囲では、身体の回転方向と逆方向へ画像を回転させたとき、画像の角加速度の増加に伴い、回転感覚が増大する応答特性をもつことが示唆された。

以上、前庭系と視覚系の相互作用による水平回転感覚として、身体の回転角加速度の大きさと回転方向についての特性を見出した。このことから、視覚系と前庭系の異種感覚間の相互影響の定量化の研究の一つとして、新たな知見を提供することができた。さらに、身体の回転運動と画像を操作することで回転感覚を制御できる可能性を示唆し、回転運動を伴うシミュレータの設計や回転感覚を制御するディスプレイの研究・開発につながると考えられる。

例えば、身体の回転方向と画像の回転方向の関係について、身体の回転角加速度が 0.1 deg/s^2 以下では、身体の回転方向に関わらず、画像の回転方向とは逆方向へ回転感覚が誘発されることを活用すれば、身体の回転角加速度を 0.1 deg/s^2 以下に抑えることで、画像情報を用いた回転感覚の方向制御が可能である。これはVR技術への応用として、実際の回転方向を操縦者に気づかれることなく、方向を変える際に有用であろう。応用例の一つとして、乗り物シミュレータへの利用が考えられる。回転感覚を必要とする乗り物シミュレータにおいて、連続的に同じ方向へ回転感覚を与えたい場合がある。このような場合、同じ方向へ連続してシミュレータを駆動させるため、シミュレータの可動範囲は広く取る必要があり、シミュレータの可動部と固定部の接続方法や信号の伝達方法が複雑になりやすい。一方、本実験で得られた知見を利用すれば、連続して同じ方向へ回転感覚を与えたい状況においても、角加速度 0.1 deg/s^2 以下の限定された可動範囲だけで、画像情報を呈示することによる回転感覚を与えることも可能であろう。したがって、可動範囲を限定した簡易な装置を用いても、十分に回転感覚を呈示できる可能性がある。

また、身体の回転量と画像の回転量の関係は、身体の回転角加速度が 0.1 deg/s^2 から 1.0 deg/s^2 の範囲では、身体の回転方向と逆方向へ画像を回転させたとき、画像の角加速度の増加に伴い、段階的に回転感覚が増大する応答特性をもつことを示した。この結果は、画像の回転角加速度を調節することで、身体の回転運動に対する回転感覚量を定量的に制御できる可能性を示唆している。このことは、身体の回転角加速度が 0.1 deg/s^2 から 1.0 deg/s^2 程度の比較的に安全性の高い身体への運動を付加することで、回転感覚量を定量的に制御可能なディスプレイの研究・開発へ貢献できる。

4. む す び

ターンテーブルとヘッドマウントディスプレイによって構成される身体の水平回転運動と視覚刺激を同時に呈示することが可能な回転感覚呈示システムと、知覚した回転方向と回転量の応答を取得する回転感覚応答取得システムを用いて、視覚系と前庭系の相互作用による水平回転感覚の基礎特性を検討した。

身体の回転方向と画像の回転方向の関係は、身体の回転角加速度が 0.1 deg/s^2 以下では、回転感覚の方向弁別の正

答率が低い値を示した。さらに、この範囲の角加速度では身体の回転方向に関わらず、画像の回転方向とは逆方向へ回転感覚が誘発されることが示唆された。これらのことから、身体の回転角加速度を 0.1 deg/s^2 以下に抑えることで、視覚情報を用いた回転感覚の方向制御が可能であることを示唆した。

身体の回転量と画像の回転量の関係は、身体の回転角加速度が 0.1 deg/s^2 から 1.0 deg/s^2 の範囲では、回転感覚量は、身体の回転方向と逆方向へ画像を回転させたとき、画像の角加速度の増加に伴い、回転感覚量は増大する応答特性をもつことを実験的に明らかにした。このことは、画像の回転角加速度を調節することで、回転感覚量を定量的に制御できることを示唆している。以上の結果から、本研究は、視覚系と前庭系の相互影響についての定量的な知見を提供できるだけでなく、回転角加速度をもつシミュレータの設計や回転感覚を制御するディスプレイの開発への貢献が期待できる。

本研究では、視覚と前庭の相互影響について、回転感覚の基礎的な応答特性を得るための実験として、視覚刺激には位置情報を含まないように白黒の縦縞格子画像を用いた。今後、より効果的な回転感覚を得るためには、画像の3次元情報や色情報を含む視覚刺激を用いて検討する予定である。

なお、本研究は、独立行政法人情報通信研究機構の研究委託「人間情報コミュニケーションの研究開発」により、ATR 人間情報科学研究所にて実施したものである。また、本研究の一部は、文部科学省のオープン・リサーチ・センター整備事業による私学助成を得て行われた（平成16年度～平成20年度）。

〔文 献〕

- 1) 藤本 英雄, 陳 連怡, 佐野 明人, 櫻井 陽一: “力覚呈示機能をもつ車いす仮想体験システムの試作と空間認識実験”, 機学論 (C 編), **64**, pp.4687-4693 (1989)
- 2) 岩谷 徹: “人工現実感生成技術とその応用”, 岩田洋夫編; エンターテインメント「遊び」の世界と人工現実感, サイエンス社, pp.157-182 (1992)
- 3) 小山 博史: “バーチャルリアリティ, 野村淳二, 澤田一哉 (編); 医療用バーチャルリアリティシステムのシステム化論”, 朝倉書店, pp.125-145 (1997)
- 4) 早苗 勝重, 三森 光二郎: “原子力発電所の運転と訓練”, 電学誌, **117**, p.528-531 (1997)
- 5) 沢 桓, 阿部 千秋: “名医を育てる患者シミュレータ”, 電学誌, **117**, p.532-535 (1997)
- 6) 種田 行男, 北畠 義典, 江川 賢一, 渡辺 進一郎: “シニアシミュレータの開発に関する研究 - 高齢者の移動動作模擬装置 -”, 体力研究, **93**, p.11-19 (1997)
- 7) Harris, L. R., Jenkin, M., Zikovitz, D. C.: “Vestibular cues and virtual environments: choosing the magnitude of the vestibular cue.”, IEEE Int. Conf. on Virtual Reality, **1**, pp.229-236 (1999)
- 8) 鈴木 浩明: “乗り物シミュレータの動揺システムに関する知覚心理学的諸問題”, 心理学評論, **44**, 3, pp.349-366 (2001)
- 9) 中川 千鶴, 大須賀 美恵子: “VE 酔い研究および関連分野における研究の現状”, 日本バーチャルリアリティ論文誌, **3**, 2, pp.31-39 (1998)
- 10) Reason J.T.: “Motion sickness adaptation: a neural mismatch model”, Roy Soc Med, **71**, pp.819-829
- 11) Yang, T. D., Pei, J. S.: “Motion sickness severity under interaction ofvection and head movements.”, ASEM, **62**, 2, pp. 141-144 (1991)
- 12) 近江 政雄: “自己運動感覚”, 館岡監修; 人工現実感の基礎, 培風館, pp.73-87 (2000)

- 13) Dichgans J, Brandt Th: “Visual-vestibular interaction: Effects on self-motion perception and postural control. In: Held R, Leibowitz HW, Teuber HL (eds) Handbook of sensory physiology”, VIII Perception, Springer, Berlin Heidelberg New York, pp.755-804 (1978)
- 14) 宇和 伸明, 林 秀彦, 矢野 澄男: “回転方向知覚における視覚情報の前庭情報への影響”, 2003 年映情学冬季大会, 5-7, (2003)

はやし 伸明 2003 年北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科博士後期課程修了。同年, ATR 人間情報科学研究所入社, 専任研究員。2005 年より, 甲南大学知的情報通信研究所, 博士研究員。画質評価, 教育評価, 視覚認知計測学の構築, 異分野の統合の研究に従事。電子情報通信学会, ヒューマンインタフェース学会, 日本教育工学会の各正会員。博士 (知識科学)。

う 和 伸明 1990 年, 姫路工業大学大学院修士課程修了。同年, 三洋電機株式会社に入社。ハイパーメディア研究所にて画像処理関連の研究に従事。1996 年より ATR 人間情報通信研究所に転出。2000 年三洋電機退任。2002 年 ATR 人間情報科学研究所入社。2003 年より東京工業大学博士後期課程入学。視覚研究に従事。電子情報通信学会, 日本 VR 学会, 日本視覚学会の各正会員。

あんどう ひろし 1983 年, 京都大学理学部卒業。1992 年 MIT 脳認知科学部博士課程修了。同年, ATR 人間情報通信研究所研究員。2000 年より, 東京工業大学大学院連携助教授。2001 年より, ATR 人間情報科学研究所主任研究員・プロジェクトリーダー。視覚情報処理, 認知脳科学, 脳活動計測の研究に従事。Ph.D. (計算神経科学)。