

## 視覚情報による身体動揺——臨場感の計測——

矢野 澄男・清水 俊宏

視覚情報処理系の役割は、視対象の認識として説明されることが多い。しかし、視覚系の基本機能は、視対象の認識のみでなく、自己自身の「傾き」「動き」等を知ることにもある<sup>1)</sup>。自分自身と外界を含めた空間内で、「傾き」「動き」等の自己の定位の検出は、視対象の認識を利用するばかりでなく、オプティカルフロー等を利用することによっても可能なことにも特徴がある。この自己定位を知ることが、環境の中で自己自身がどのような状態にいるかを知ることであり、このことは、自分が「まさに、そこにいるかのような気がする」という「臨場感」と密接な関係にあると推測される。

自己定位に関しては、「ベクション」(視覚誘導自己運動)と深いかわりをもつと考えられるが、「ベクション」の評価は基本的には主観評価によってなされることが多く、その評価方法が本質であると考えられる<sup>2)</sup>。一方、「ベクション」は視覚系のみばかりでなく、聴覚、触覚系等でも生じることが知られている<sup>1)</sup>。したがって、いわゆる「五感」からのいずれの情報入力でも生じると考えられる。

ヒトの情報処理のための入力と処理・出力を考えると、図1のような仕組みを想定することができると思われる。このため、この仕組みで、ヒトは環境の中で自己定位を保つことになる。環境の中での自己定位を考える上で、「五感」以上に重要な役割を担う機能に平衡感覚がある。これらのことから、自己定位は平衡感覚と「五感」からの情報入力によって司られていると思われる。これらの感覚情報を統合し、ヒトは環境の中で自己の「傾き」「動き」等を巧妙に制御していると思われる。結果的には、これらの制御の中心課題は、先見的な知識や生体としての保持機能が

ベースとなり、出力としての運動制御の計画にあると思われる。このため、自己定位の機能を評価するには、出力としての姿勢制御を測定・評価すればよいと推測される。姿勢制御自体の評価方法は多くの方法が考えられる。たとえば、足の筋電図、頭部の動揺、身体の振れなどは、その代表例として考えることができる。

本稿では、自己定位の積分結果の表れとみなすことができる重心動揺に着目してヒトが感じる「臨場感」の定量的な評価を行った試みについて解説をする。

## 1. 立体画像と平面画像による臨場感

これまでに行われている主観評価実験の結果では、従来の2次元画像に比べて、立体画像のほうが視覚心理的な効果大きいことが知られている<sup>3)</sup>。一方、前述したように、主にベクションに伴う重心動揺を測定し、平面・立体画像の差異、あるいは、表示画角の変化に伴う効果も客観的に評価されている<sup>4,5)</sup>。

実験に用いた映像の表示装置を図2に示す。実験では、4×5インチの2台のスライドプロジェクターを用い、ハーフミラーで合成し、リレー光学系を通して、魚眼レンズにより、図2に示すような直径3m球形ドームに画像を投影している。実験で用いた視標である立体画像はRDS(random dot stereogram)で、矩形パターンが前後して知覚される。なお、平面パターンはドットが知覚されるのみである。いずれのパターンも、画角は10度から150度、球形ドームの中心を左右に約11度、0.23 Hzで往復回転運動をするように表示を行った。なお、被験者は足の内側を揃えるRombergの足位で、立位姿勢を保持している。

このような平面・立体画像に対する実験の結果を図3(a)(b)に示す。図3(a)(b)は、表示画像を往復回転運動させた場合の被験者の重心動揺の左右方向の成分のパワース

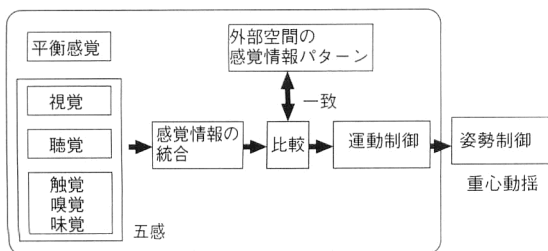


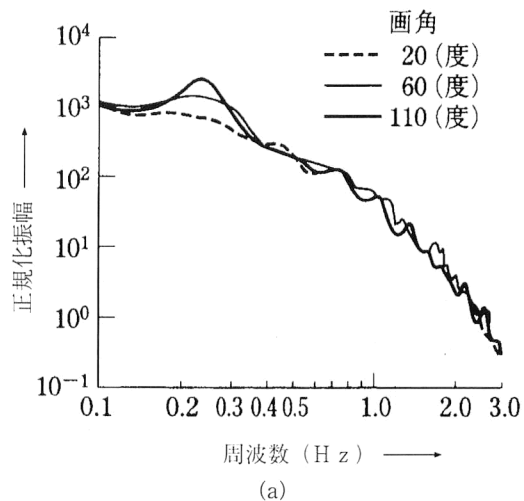
図1 感覚受容と姿勢制御。



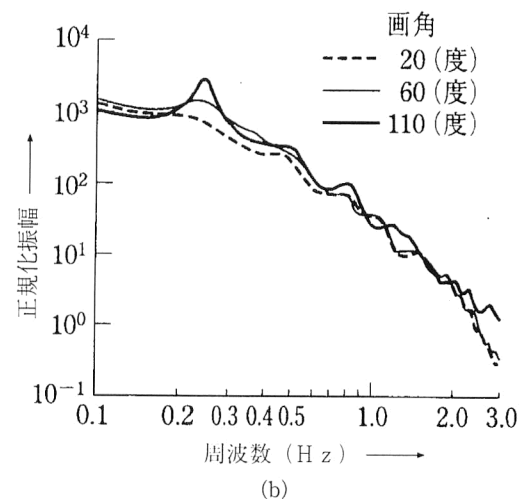
図2 半球ドームスクリーンによる映像表示。

ペクトルを求めたものである。パワースペクトルの推定は最大エントロピー法によっている。結果は画角 20, 60, 110 度の場合である。表示画角 110 度では、平面、立体画像の場合ともに 0.2 から 0.3 Hz の帯域に顕著なローカルピークがみられる。このローカルピークは、40 度くらいから生じ始め、70 度以上では、顕著である。また、広視野での平面、立体画像での場合を比較すると、立体画像の場合のほうが、ローカルピークの形がやや鋭く、最大値は 110 度の場合で平面画像の約 1.2 倍となっている。

この実験結果には立体画像のほうが、重心動揺への誘導効果が大きいことが示されている。表示画像からの重心動揺への誘導効果が大きいとは、表示画像が示す表示空間と観視者との結び付きがより大きいと考えることができる。すなわち、誘導効果の大きい立体画像では、あたかも、その場にいるかのような感覚である「臨場感」が平面画像よりも大きく生じたと推測される。その結果、被験者は画像の往復回転運動により姿勢制御が変動し、その結果が重心動揺に表れたものと考えられる。



(a)



(b)

図3 (a) 平面画像に対する重心動揺の周波数スペクトル、(b) 立体画像に対する重心動揺の周波数スペクトル。

しかしながら、奥行き感を与える要因としては、両眼視差のような生理的な要因のみならず、絵画的な要因も考慮すべきと考えられる。前述した結果で用いた表示画像は RDS であることから、奥行き感の要因としては両眼視差のみである。重心動揺による「臨場感」の評価は立体画像を対象とすれば、平面画像とは異なり、これらの画像の構成要因をさらに含めて検討の必要がある<sup>6)</sup>。

## 2. 立体画像の「奥行き感」が与える臨場感

立体画像では、平面画像に比べて、姿勢制御の結果として表される重心動揺が大きく誘起されることから、「臨場感」をより提示できる可能性があることを示した。さらに、立体画像そのものに着目すれば、「奥行き感」を両眼視差により明確に表示できるために、大きな臨場感を表示できる可能性があることも実験的に示されている<sup>7)</sup>。

実験は、図4のように、90度画角(視距離1m)の大画面スクリーンに2台のビデオプロジェクターを用いて立体

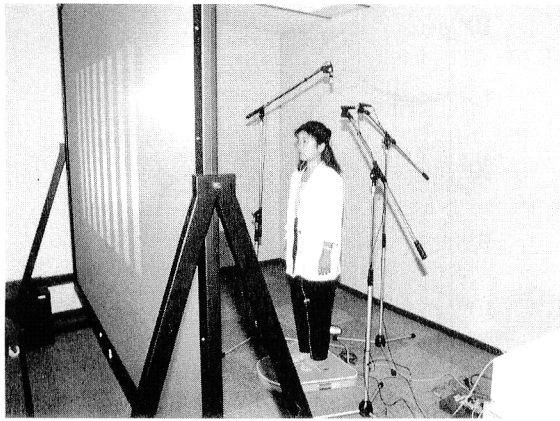


図4 広視野立体画像表示スクリーン。

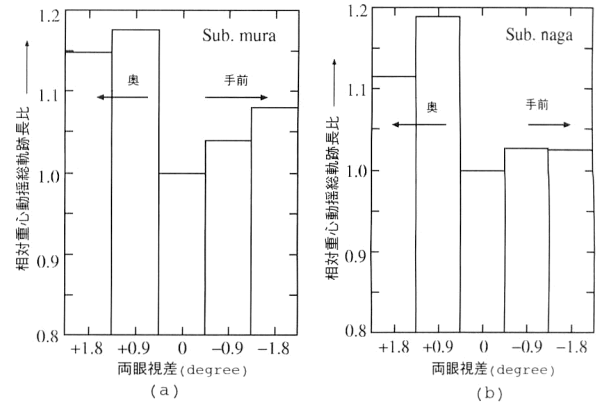


図6 重心動揺による奥行き感の測定結果。

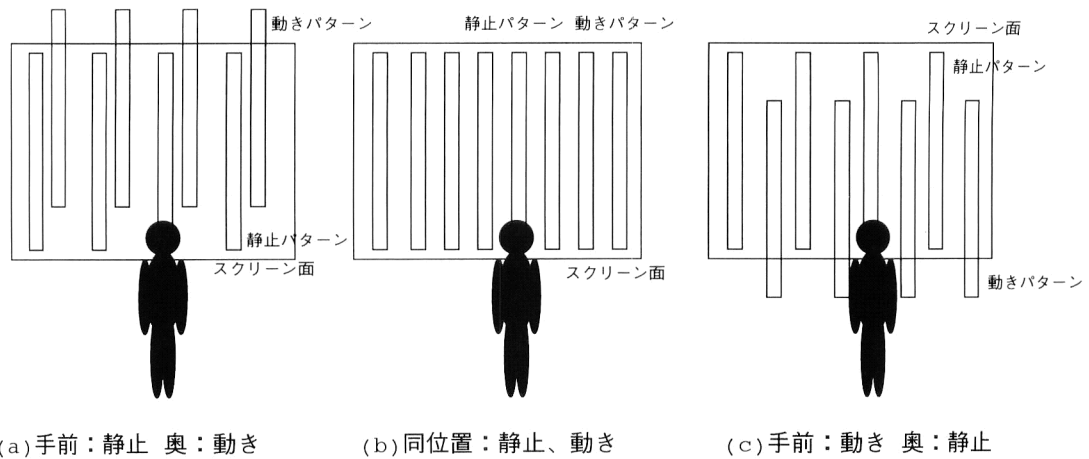


図5 立体画像による「奥行き感」の表示。

映像としての矩形の周期映像を用いて行われ、自己定位の機能を重心動揺、さらに眼球運動のOKN (optokinetic nystagmus) を指標として検討が行われている。実験では、表示した矩形の周期映像の一部分を左右に往復運動させている。表示パターンを図5(a), (b), (c) に示す。図5(a) が静止パターンがスクリーン面上にあり、動きパターンがスクリーン面より奥にある場合である。同図 (b) が静止パターン、動きパターンがともにスクリーン上にある場合である。同図 (c) は (a) とは動きパターンの位置が異なり、スクリーン面よりも前にあり、静止パターンがスクリーン面上にある場合である。すなわち、視標となる表示パターンでは、矩形の周期で1つおきに、静止パターンと動きパターンとして、さらに矩形の動きパターンに関しては、両眼視差を与え、スクリーンの手前、スクリーン上 (視差がゼロ)、スクリーンより奥と3つの状態での表示を行っている。静止矩形パターンは、常に、スクリーン上にある。

実験の結果の一例を図6(a), (b) に示す。図6は  $x$  軸が与えた視差量 (動き視標の画面上のずれ)、 $y$  軸がそのと

きに対応する重心動揺総軌跡長の基準を動き、静止視標とともにスクリーン上にあるときとした総軌跡長比を示している。被験者2名の結果である。図6(a), (b) によると、視差がゼロ、すなわち、静止矩形パターンと動き矩形パターンがともにスクリーン上にある場合の重心動揺の総軌跡長比が最も小さく、静止矩形パターンをスクリーン上におき、それよりも、動き矩形パターンが前後にある場合が大きい。重心動揺の総軌跡長比の増大は、姿勢変動に伴うものと推測される。この場合、有意に、静止スクリーンの前方に動き矩形パターンがある場合よりも、静止パターンの奥に動きパターンがある場合のほうが軌跡長比が大きい。

パターンに対する注目を意識的に操作すると考えなければ以下のような説明ができる<sup>8,9)</sup>。このことは、静止パターンの手前をあるパターン、すなわち視標が動く場合は、静止した背景の前を視対象が動くことであり、視対象が動き、解釈として自己は動いていないと知覚したと考えられる。一方、静止パターンの奥に、動きパターンがある場合は、静止パターンの奥が動いているわけであるから、視対象は静止し、背景が動いていると知覚したと考えられる。しか

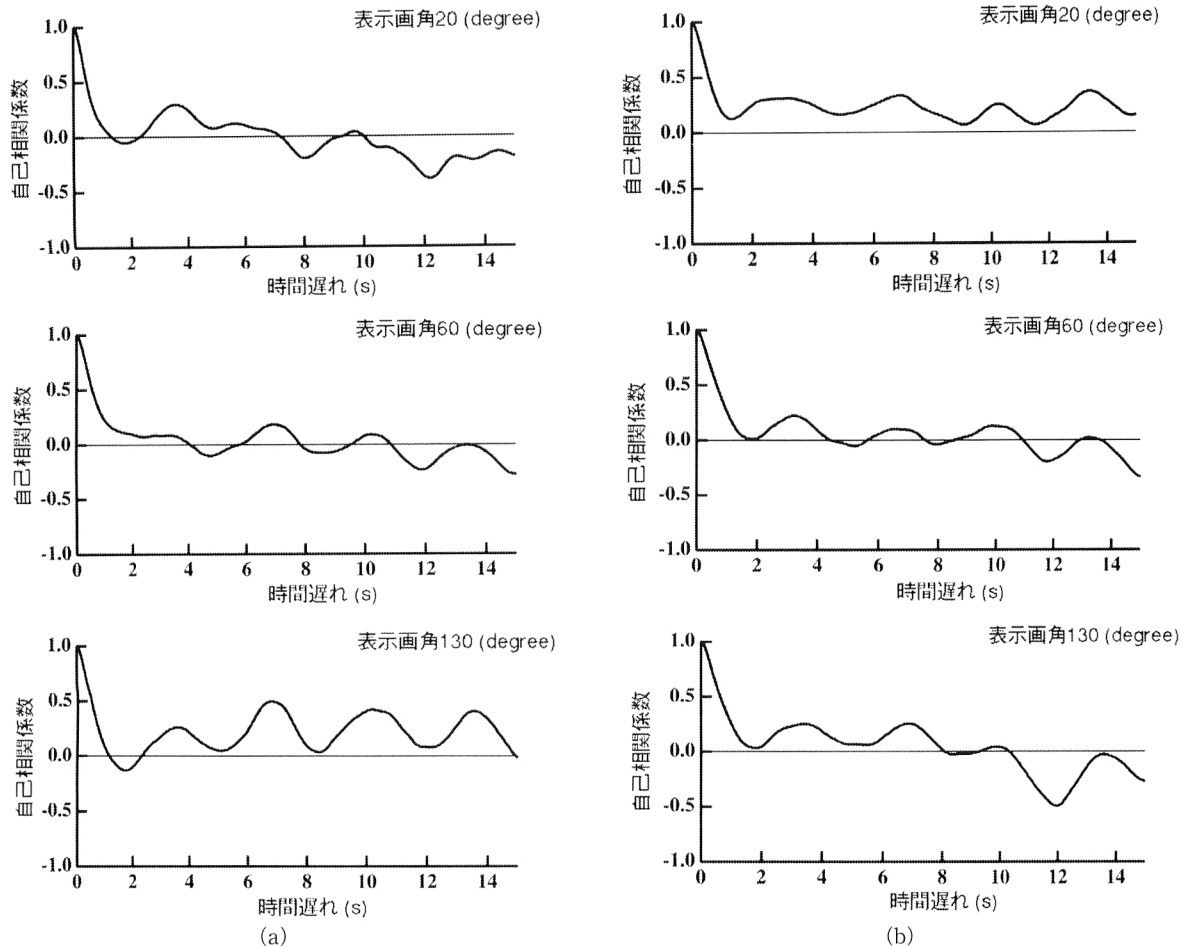


図7 (a) 視覚・聴覚情報が同相の場合の結果, (b) 視覚・聴覚情報が逆相の場合の結果.

しながら、背景は動くはずはないと考え、動くはずのない背景が動くということは、自己が動いているとしか考えざるを得ない。したがって、自己自身が動いていると知覚しているために、姿勢の変動が生じ、重心動揺の総軌跡長比が大きくなったと考えられる。

このことは、従来の広視野の映像ディスプレイがスクリーン上のみで、奥行き情報に関しては、主に絵画的な要因による映像表示のみであったが、両眼視差による立体映像により、明確な奥行き情報の提示によって、大きな「臨場感」を提示できる可能性があることが示唆される。

### 3. 視覚情報と音響情報の相互作用による臨場感

これまで、視覚情報による映像表示に伴う身体動揺、ここでは主に重心動揺を指標とした実験的な検討結果を述べたが、他の感覚情報との相互作用の働きも考えられることである。一般には、バクシオンは視覚情報のみならず、音響情報、触覚情報でも生じることが確認されている<sup>1)</sup>。本稿では、視覚・音響情報による協調効果を重心動揺を指標として、検討した結果を述べる<sup>10)</sup>。

実験では、図2に示したドームスクリーンを用い視覚情報を与え、音響情報として白色雑音を用い、ヘッドフォンにより音像の定位をシミュレーションし、与えた。映像はRDSであり、計算上は視距離1.5mで、間隔11.4cm(周期では22.8cm)で飛び出し量が26cmである。なお、表示画像は表示画角が20度、60度、130度であり、垂直軸から左右にそれぞれ10度、0.29Hzで正弦波状に反復回転運動する。また、音響情報は、視覚情報、すなわちRDSの動きと同相、もしくは、逆相で反復回転運動をする。運動軌跡は距離2mの前額平行面上、かつ、半径3m上部半円の円周上にそって水平位置までである。白色雑音の大きさは、半円の円周上の最上部に音像が定位したときに、被験者の右耳の位置で75dB(A)となるように設定した。

この条件下で測定した重心動揺の左右方向の成分の自己相関関数を図7(a), (b)に示す。図7(a)が視覚情報と音響情報が同相の場合の結果であり、同図(b)逆相の場合の結果である。この結果から理解されるように視覚情報に対して音響情報が、同相、逆相の場合にかかわらず、表示画角が大きいほうが、明瞭な周期性を示している。つま

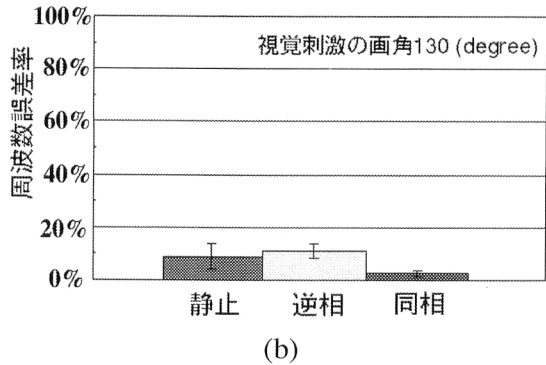
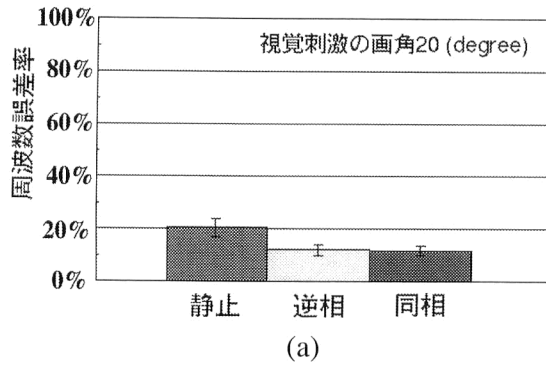


図8 周波数誤差率.

り、表示画角の大きいほうが、重心動揺の測定結果から心理的な効果が大きいと推測可能である。

ところで、重心動揺の周期性については、重心動揺への誘導効果が大きい場合は、表示情報の運動周期に近づくと予想される。そこで、重心動揺の波形に対して、要素波解析を施した。得られた各要素波は、重心動揺の波形中の各構成周波数成分(2次自己回帰モデル)を示す。ここで、得られた各要素波の中心周波数のうち、情報の提示周波数(0.29 Hz)に最も近い中心周波数を選択し、次式により周波数誤差率  $\Delta f$  を求めた。周波数誤差率  $\Delta f$  は

$$\Delta f = \frac{1}{f'} |f_c - f'| \quad (1)$$

で示され、 $f_c$  は選択した重心動揺の中心周波数、 $f'$  は表示画像の反復回転周波数を表す。この誤差率  $\Delta f$  が表示した情報により重心動揺を誘起する程度とした場合の結果を図8(a)(b)に示す。図8(a)が表示画角が20度、同図(b)が表示画角が130度の場合の結果である。なお、図中に示す「静止」は視覚情報のみ運動し、音響情報は静止している場合の結果である。

この結果によると、表示画角が130度であれば、画角20度に比べて、誤差率が全体的に小さな値を示している。また、同図(a),(b)から音響情報が静止の場合に比べて、同相のときの誤差率のほうが小さい。表示画角20度

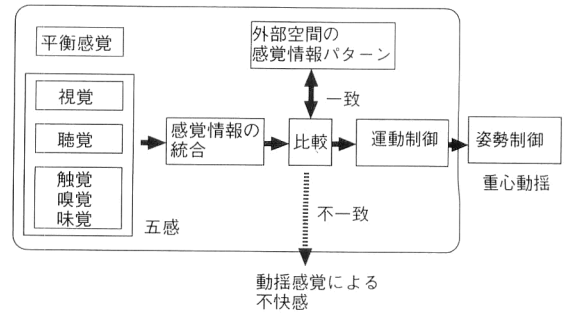


図9 感覚受容と動揺感覚の生起.

では、誤差率は、逆相、同相の条件でほとんど変わらない。しかしながら、表示画角130度では、同相の場合のほうが逆相の場合に比べて、誤差率は小さい。これらの結果から、音響情報と視覚情報の組み合わせでは、視覚情報の表示画角が大きく、視覚情報と音響情報が同方向の場合に大きな「臨場感」が特に得られると考えられる。当然のことであるが、音響情報と視覚情報の組み合わせでは効果はあるが、視覚情報の表示画角に関して、非線形で協調効果があるということが理解される。

#### 4. 視覚受容系と前庭迷路系の機能差

これまでに述べたように、広視野かつ立体画像は臨場感が大きいことが、主観評価実験ばかりでなく、画像の動きに伴う重心動揺の測定からも客観的に明らかにすることができる。しかしながら、ヒトが外界とのかわりにおいて自己定位を獲得するには、視覚情報、あるいは、音響情報のみに依存しているわけではない。前述したように、自己定位はヒトの五感とよばれている感覚器からの情報の他に、平衡感覚器等からの情報も重要な役割を担っている。

特に、映像表示を前提とすれば、自己定位は機能的には視覚受容系、前庭迷路系、体性感覚系からの情報を統合することによってなされていると考えてよい。音響情報を考慮しなければ、TVシステム等での映像情報による自己定位、あるいはこの場合の「臨場感」の情報は、視覚受容系のみによるもので、前庭迷路系、体性感覚系からの情報が欠如している。このため、他の前庭迷路系、体性感覚系等に感覚情報をさらに付加すると「臨場感」はどう受容・生成されるのかということと、他の感覚情報がない視覚受容系のみで問題はないであろうかという問題が生じる。

図9に示すように、姿勢制御を考えると記憶パターンと統合された感覚情報との照合等で不整合が生じると、いわゆる動揺病、あるいは、動揺病的な不快感に陥る可能性が考えられる。特に、本稿で紹介しているようにベクションと比較的整合性のある重心動揺を評価の指標としている実

験パラダイムでは、刺激として表示する画像は動き画像であり、その傾向に拍車をかける<sup>11)</sup>。

一般に、ヒトが自己自身の動きを受容するときには、前庭迷路系も大きな役割を果たす。前庭迷路系では、3次元での空間での各軸方向への動きおよび、各軸での回転方向の動きの検出が可能である。前者は耳石、後者は三半規管が検出センサーとなる。ただし、視覚受容系と異なり、その構造から加速度検出器の役割でしかない。したがって、視覚情報をもたらす以上の「臨場感」を得ることを目標とする場合や動揺病、あるいは、動揺病的な不快感の生じるメカニズム、またはこれを防止するための方法を得るためには、視覚受容系と前庭迷路系の機能を知ることは重要な課題となる。本稿では、例として、視覚受容系と前庭迷路系、特に、半規管系での情報受容の場合を述べる。したがって、対象とした運動は回転運動である<sup>12)</sup>。

実験は図10のように、半規管系に対してはターンテーブルにより、角加(減)速度を刺激として与える。この角加速度を検知して、自己の回転の向きを知る。一方、視覚系には、頭上に設置されたカメラからの映像がHMDに表示され、同様に、この映像から自己の回転の向きを知る。被験者は、常時、自己の回転の向きを、ポテンショメーターを操作することによって示し、その値が記録される。映像を得る立体カメラと回転角加速度を与えるターンテーブルは、ともに同じ方向、あるいは、逆の方向に回る。なお、角加速度は、前庭迷路系(半規管)の検知の閾値以上に設定してある。

実験の結果の一例を図11(a),(b)に示す。図11は、 $x$ 軸がターンテーブルに与えた角加速度である。 $y$ 軸はターンテーブルの回転角を示している。図11(a),(b)での黒丸はターンテーブルの角加速度と回転角の関係を示している。すなわち、「身体の正しい方向」をも示すことになる。



図10 視覚・前庭迷路系による方向知覚の実験。

一方、白丸は被験者が知覚した方向である。なお、同図(a)ではカメラの回転方向は、常に時計方向210度である。同図(b)では、逆に常に反時計方向210度である。したがって、図(a)では第1象限がカメラとターンテーブルの回転方向が同じ方向の場合の方向知覚である。さらに、同図第3象限では、逆方向である。同図(b)では、カメラ、ターンテーブルの動きが同図(a)と逆である。

この結果には、前庭迷路系と視覚の情報が異なる場合は、視覚がかなり優位に働くことが示されている。また、前庭迷路系と視覚受容系が同方向の場合、視覚情報がより大きく与えられると、前庭迷路系の情報もやや過大評価さ

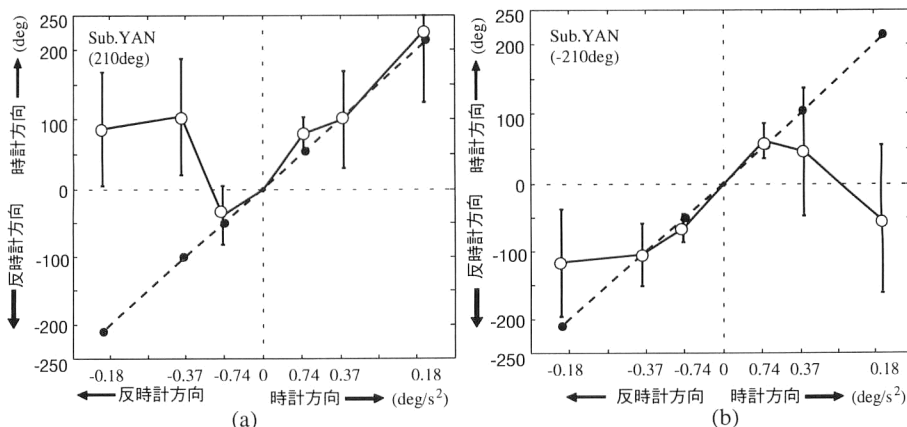


図11 視覚・前庭迷路系による方向知覚。

れることが理解できる。さらに、視覚情報と前庭迷路系での耳石との関係で方向知覚を調べた研究結果も視覚系の優れた結果が示されている<sup>13)</sup>。このように、自己定位機能には視覚受容系のみならず、他の感覚器官からの情報も寄与していることが示されている。「臨場感」を考える上で、このような仕組みは十分解明される必要があると思われる。

画像技術は計算機ネットワークと結び付き、多様な形態での利用が生活のすみずみまで入ってきている。今後は携帯電話での表示から計算機の画面、家庭での情報端末としてのTVまでの画面でシームレスなサービスが行われると考えられる。

この中で、視覚情報が表示される空間、もしくは、ディスプレイが作り出す環境に着目すると、必然的に映像環境での状態を利用者の立場にたって考えなければならない。環境を考慮すれば、最も重要な研究課題のひとつに自己定位の問題があげられる。画像システムから考えると自己定位を測るということは、かなり、画像システムのもたらす「臨場感」を測ることに等しいと考える。したがって、自己定位の評価のために、重心動揺等を評価することは、画像システムを対象とする場合、「臨場感」の定量的な評価の試みと考える。

本稿では、臨場感の評価を姿勢制御、特に、重心動揺を指標として検討した実験結果について述べたが、全体的にも、詳細な部分でも、まだ課題は多く残っており、今後も視覚環境と自己定位、あるいは自己定位と臨場感にかかわる研究の継続の必要があると思われる。

一方、広視野の画像では、「臨場感」が大きいことがうかがえるが、過大な「臨場感」は必ずしも快適な映像システムを提供しない。映像システムとしてのシミュレーターシステムでは負の効果としてシミュレーター酔いが知られている。

「動揺病」の発生メカニズムに関しては、すべてが明確になっているわけではないが、感覚受容器からの入力信号

と記憶パターンに違いが生じた場合に生じていると考えることも可能である。特に、広視野映像の動き画像のように「視覚」刺激が非常に大きく、「動き」を検知することが可能な「前庭迷路系」「体性感覚系」等に感覚入力がない場合に相当するテレビ映像に関しては、今後さらに研究を進める必要があると考えられる。

## 文 献

- 1) I. P. Howard: *Human Visual Orientation* (John Wiley & Sons, 1982) pp. 93-119.
- 2) 狩野千鶴：“自己運動知覚と視覚系運動情報”，心理学評論，**34** (1991) 240-256.
- 3) S. Yano: “Experimental stereoscopic high-definition-television,” *Display Technol. Appl.*, **12** (1991) 58-64.
- 4) 清水俊宏，三橋哲雄：“広視野立体画像の提示画角と姿勢制御系における空間認知機構の関係”，電子情報通信学会論文誌 A，**J80-A** (1997) 1014-1021.
- 5) 尾島修一，矢野澄男：“両眼融合画像における奥行き感が重心動揺に与える影響”，電子情報通信学会論文誌 A，**J70-A** (1996) 1390-1396.
- 6) 宇和伸明，金子寛彦，金次保明：“視差・視覚変化刺激観察時の重心動揺と奥行き運動知覚”，映像情報メディア学会誌，**53** (1999) 1300-1307.
- 7) 矢野澄男，尾島修一：“両眼融合視での視標が自己定位に与える影響”，テレビジョン学会誌，**50** (1996) 1390-1396.
- 8) M. Ohmi, I. P. Howard and L. P. Landolt: “Circularvection as a function of foreground-background relationships,” *Perception*, **16** (1987) 17-22.
- 9) 北崎充晃，佐藤隆夫：“自発的注意が決定する視覚性自己運動知覚”，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，**4** (1999) 505-510.
- 10) 清水俊宏，矢野澄男：“広視野視覚刺激と聴覚刺激の同期提示による重心動揺への誘導効果”，電子情報通信学会論文誌 A，**J83-A** (2000) 912-919.
- 11) 中川千鶴，大須賀恵美子：“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学会論文誌，**3** (1998) 31-39.
- 12) 矢野澄男：“前庭迷路系・視覚情報系による回転方向の認知機能”，電子情報通信学会技術研究報告，**97-156** (1998) 89-94.
- 13) L. Telford, I. P. Howard and M. Ohmi: “Heading judgements during active and passive self-motion,” *Exp. Brain Res.*, **104** (1995) 502-510.

(2000年12月19日受理)