

多層の座標系構造に基づく空間知覚 視覚誘導運動を例として

近江政雄

ヨーク大学心理学科

4700 Keele Street, North York, Ontario M3J 1P3, Canada

1. はじめに

視覚系の目的は外界の情報を取り入れる事にあるが、その入力機構である網膜は外界に対してではなく眼球に対して固定された座標系（眼球座標系）であり、眼球の運動に応じて眼球座標系そのものが外界の中を動く。眼球は頭部に対して固定された座標系（頭部座標系）であり、頭部の運動に応じて頭部座標系そのものが外界の中を動く。その頭部は身体に対して固定された座標系（身体座標系）であり、身体の運動に応じて身体座標系そのものが外界の中を動く。すなわち視覚系は多層の座標系構造を持っており、網膜に投影された像から外界の情報を得るためには、頭部・身体・外界座標系における眼球・頭部・身体に関する情報を使って眼球座標系から外界座標系への変換が行なわれる必要があり、この過程において他の入出力情報系との協同が不可欠となる¹⁾。

視知覚、特に位置・運動・方向などの空間知覚が多層の座標系構造に基づいている事を示す一つの例として、対象の運動視について考えてみよう。眼球・頭部・身体が静止している状況で対象の像が網膜上を動く時、その対象は動いて見える。これは大脳皮質に存在

する運動検知器の働きであり、眼球座標系による運動視である。しかしながら暗黒中又は一様な背景のもとで運動している対象を眼球を使って追従する時にも、その対象は動いて見える。網膜上では対象の像は静止しているから、この運動視は眼球座標系によるものではなく、頭部座標系における眼球運動の登録に基づくものである。さらに、頭部に固定された対象を見ながら頭部又は身体を動かすときにも、その対象は動いて見える。網膜上で対象の像は静止しており、追従眼球運動も起こっていないから、この運動視は眼球座標系・頭部座標系・身体座標系によるものではなく、外界座標系における頭部および身体的位置の変化の登録に基づくものである。多層の座標系構造のなかでの視覚系の機能についてはこれまで必ずしも十分な考慮が払われてきたわけではなく、そのために得られた結果の解釈に混乱の見られる分野もある。この解説ではそのような分野の一つである視覚誘導運動に関して、それぞれの座標系が果たしている役割の分離に焦点をおいて述べることにする。

外界は背景と対象と自己からなる。背景は常に静止しており、対象と自己は外界の中を

動いていることも静止していることもある。したがって背景は常に静止して知覚され、対象の動きは知覚されることもされないこともあり、自己の動きも知覚されこともされないこともある。視覚誘導運動は対象および自己が静止しているにもかかわらず対象の運動が知覚される現象のうちの一つであり、静止した対象に隣接した誘導領域の運動によって引き起こされ、隣接領域とは反対方向の運動が知覚される²⁾。日常的には雲が流れているときに、月や建物が反対方向へ動いて見えるのが視覚誘導運動の例である。ここで対象および自己が静止しているというのは外界座標系において静止しているという意味であり、したがって視覚誘導運動は外界座標系・頭部座標系・眼球座標系のすべてで起こりうる現象である。

2. 外界座標系における視覚誘導運動

外界座標系において静止している対象が動いて見えるのは、自己が動いている場合である。したがって外界座標系における対象の視覚誘導運動には誘導領域の運動による視覚誘

導自己運動が付随している。自己運動は垂直・水平・回旋の三軸の回転運動と、左右・上下・前後の三方向の直線運動から成るが³⁾、そのすべてについて視覚誘導自己運動が起こる。自己運動はそもそも静止している背景に対する自己の運動であり、視覚誘導自己運動が起こるためには運動している誘導領域が背景として知覚される必要がある。

図1は、挿入図に示すように奥行方向に二つの刺激面が呈示されている場合の、垂直軸の周りの回転に関する視覚誘導自己運動の測定結果である³⁾。後側の面に誘導刺激が呈示され手前側の面の刺激が静止している場合には、誘導刺激のみが呈示されている場合と同程度の視覚誘導自己運動が得られる。これに対して手前側の面に誘導刺激が呈示され後側の面の刺激が静止している場合には、視覚誘導自己運動はほとんどみられない。この視覚誘導自己運動の奥行依存性は垂直軸の周りの回転に特有の現象ではなく、他の軸・方向の視覚誘導自己運動についても同様の結果が報告されている^{4,5)}。ところで視覚誘導自己運動が起こる際には手前側にある静止した刺激

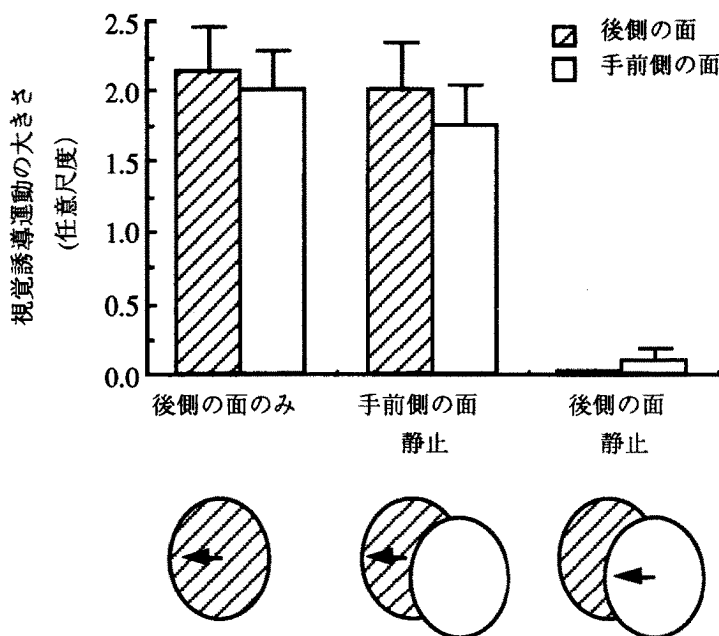


図1 奥行方向に二つの刺激面が呈示されている場合の、垂直軸の周りの回転に関する視覚誘導自己運動

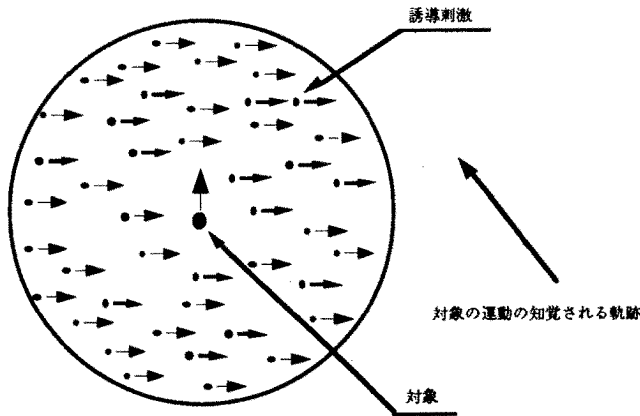
面が自己と共に動くのが知覚される。すなわち外界座標系における対象の視覚誘導運動が、視覚誘導自己運動と連結して起こることになる。この視覚誘導運動の特長は高速の運動が知覚されることであり、垂直軸回転運動に関して誘導刺激の速度が毎秒60度に達するまで視覚誘導運動の速度が増加すると報告されている⁷⁾。

3. 頭部座標系における視覚誘導運動

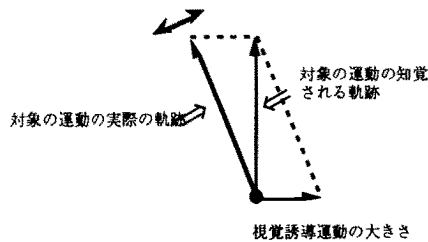
頭部座標系において静止している対象が動いて見えるのは、眼球運動の登録に基づく。眼球運動には自己運動の際に背景の網膜上での像を静止させるために起こる不随意性のものと、対象の像を静止させるための随意性のものとがある。前者が視運動性眼震や耳前庭眼球反射であり、高等動物においては大腦皮質視覚領からの介入があるものの、基本的に

は原始的な眼球運動でありその登録を視覚系は有効に使用できないと考えられている。後者としては対象追従眼球運動があり、その登録は眼球座標系から頭部座標系への変換のために視覚系によって使用されている¹⁾。運動している誘導刺激と静止している対象からなる刺激を呈示されたとき、対象を凝視するためには誘導刺激によって不随意的に生起される視運動性眼震を反対方向への対象追従眼球運動によって相殺しなくてはならない。視覚系は対象追従眼球運動の登録のみを使用できるので、誘導刺激と反対方向への対象の運動が知覚されることになる^{1,2)}。

頭部座標系における視覚誘導運動の大きさを精度良く測定するための実験手法として、対象を誘導刺激と直角方向に運動させるという方法がある^{3,7)}。図2-1に示すように水平方向に運動する誘導刺激に重ねた対象を垂直



(1)



(2)

図2 眼球および頭部座標系における視覚誘導運動の大きさを測定するための刺激配置

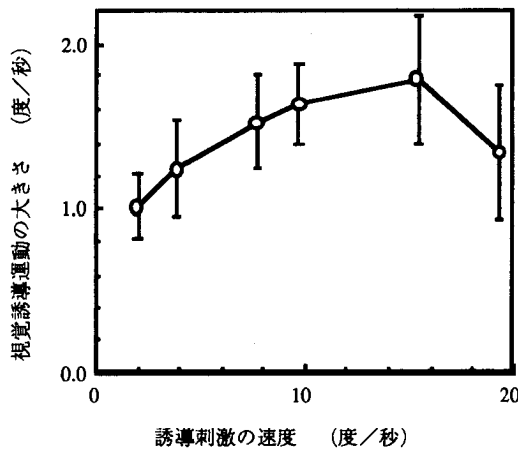


図3 眼球および頭部座標系における視覚誘導運動の大きさ

方向に運動させると、水平方向に生じる視覚誘導運動と加え合わされて、斜方向への運動が知覚される。この傾きの知覚には視覚誘導自己運動の影響がなく、眼球座標系および頭部座標系における視覚誘導運動を分離して求められる³⁾。垂直軸の周りの回転について誘導刺激の速度を変えて視覚誘導運動の大きさを測定した結果を図3に示す⁹⁾。ここでは図2-2に示すように対象を水平方向にも運動

させ、対象が垂直に動いて見えるようにその運動を調整することによって視覚誘導運動の大きさを求めた。眼球座標系および頭部座標系における視覚誘導運動は誘導刺激の速度と共に若干増加するが、毎秒1.0～2.0度程度であり、誘導刺激の運動の10～20%の運動が誘導されているにすぎない。これは外界座標系における視覚誘導運動に比べて顕著に低い速度であり、また、顕著に低い利得であることに注目されたい。

4. 眼球座標系における視覚誘導運動

前節で測定された視覚誘導運動には頭部座標系におけるものばかりでなく、眼球座標系におけるものも含まれている。眼球座標系における視覚誘導運動は、運動検知器による網膜上での対象と誘導刺激の間の相対運動の検知に基づくものである。眼球座標系における視覚誘導運動を分離して測定するためには、頭部座標系および外界座標系における視覚誘導運動が起こらない刺激配置、すなわち視覚誘導自己運動も不随意性眼球運動も生起しない刺激配置を使用しなければならない。視覚

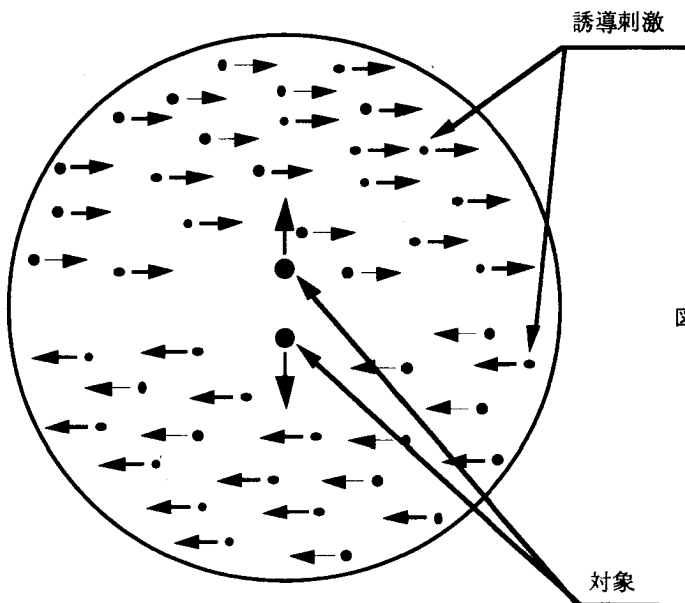


図4 眼球座標系における視覚誘導運動の大きさを測定するための刺激配置

誘導自己運動は網膜上での背景の像の運動によって生じる自己の運動であり、不随意性眼球運動は自己運動の際に生じる網膜上での背景の像の動きを静止させるための眼球運動であるから、いくつかの共通した特性を持っている。その一つとして、身体・眼球の三つの回転軸・三つの方向のそれぞれについては単一の運動しか生じ得ないという事がある。我々の身体は前進しながら、同時に後退することは出来ない。我々の眼球は垂直軸の周りを時計方向に回転しながら、同時に反時計方向に回転することは出来ない。

垂直軸の周りの回転に関して、眼球座標系における視覚誘導運動を分離して測定するために用いた刺激配置を図4に示す⁹⁾。頭部座標系および眼球座標系における視覚誘導運動の測定に用いたもの(図2-1)と類似しているが、誘導刺激は一つの方向に運動する単一の視野ではなく、それぞれが反対方向に運動する二つの視野からなっている。対象はそれぞれの視野の一つずつ呈示され、それぞれ反対方向に運動する。したがって視覚誘導運動が生じれば、対象は斜方向の軌跡に沿って離れていく様に知覚される。この誘導刺激は視覚誘導自己運動も不随意性眼球運動も生起

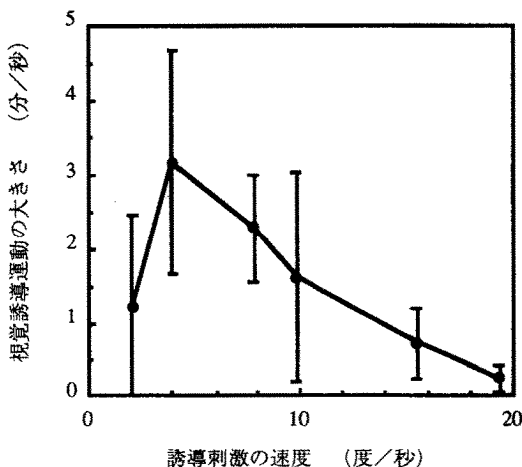


図5 眼球座標系における視覚誘導運動の大きさ

しないから、生起された視覚誘導運動は眼球座標系のみにおけるものである。前節での測定と同様に対象を水平方向にも運動させ、対象が垂直に動いて見えるように水平方向の運動を調整することによって求めた視覚誘導運動の大きさを図5に示す⁹⁾。眼球座標系における視覚誘導運動は毎秒1.0~3.0分程度であり、眼球座標系および頭部座標系における視覚誘導運動のうちの約5%を占めているにすぎない。視覚誘導運動に関して、眼球座標系が果たしている役割すなわち大脳皮質における運動検知器が果たしている役割は主要なものではないと結論できよう。

垂直軸の周りの回転については、外界座標系・頭部座標系・眼球座標系のすべてが関与しているときには視覚誘導運動の大半は視覚誘導自己運動と連結して生じており、登録されない不随意性眼球運動の信号が残りの部分を担っている。しかし他の水平・回旋の二軸の回転運動と左右・上下・前後の三方向の直線運動については同様の事が成立しない可能性がある。それぞれの軸・方向の運動に関する知覚は、例えば視覚誘導自己運動が背景として知覚される面によって制御されているような共通した面もあるが、基本的に異なる面もある。外界座標系における視覚誘導自己運動は、重力との関係ですべての軸・方向で同一の特性を持つことが出来ない。水平・回旋の二軸の周りの自己運動の際には、回転につれる重力の効果の変化により耳石器が反応する。しかし視覚誘導自己運動では耳石器からの反応が伴わないので、身体が回転しているにもかかわらずその傾きが一定のままであるという矛盾した知覚を通常生じる¹⁰⁾。頭部座標系における不随意性眼球運動は三つの回転軸でそれぞれ異なった機構によって制御されている上に、前後方向の直線運動については付随する眼球運動がそもそも存在しない。眼球座標系における運動検知器

は、回旋軸の周りの回転運動について独立した運動検知器が考えられているし¹¹⁾、前後方向の直線運動に対応する膨張刺激に特異性を持った機構の存在も示されている¹²⁾。ここでは回旋軸の周りの回転に関する視覚誘導運動について若干述べることにする。

5. 回旋軸の周りの回転に関する視覚誘導運動

回旋軸の周りの回転に関しては、垂直軸の周りの回転のように対象を誘導刺激の運動と直交する方向に運動させてその見かけの傾きを測定するという方法で、頭部・眼球座標系における視覚誘導運動を測定することは出来ない。なぜならば回旋軸の周りの回転に直交

するのは同心円の膨張であり、傾きに関する情報をもっていないからである。ここでは外部座標系における視覚誘導運動の影響を除去するために、視覚誘導自己運動を生起しないようにそれぞれの眼に反対の方向に回転する誘導刺激を呈示した。この誘導刺激によってそれぞれに眼に反対方向の回旋眼球運動が生じ、垂直軸の周りの眼球運動の場合にならって回旋輻輳眼球運動と呼ばれる。図6に示す織物地様の誘導刺激を正弦波状に数度程度の振幅で振動させたときに、顕著な回旋輻輳眼球運動が生起されることが報告されている¹³⁾。ここで図6に示す様に誘導刺激の中心部を覆い線分対象をそれぞれの眼の上下の視野に呈示すると、視覚誘導運動によって上下

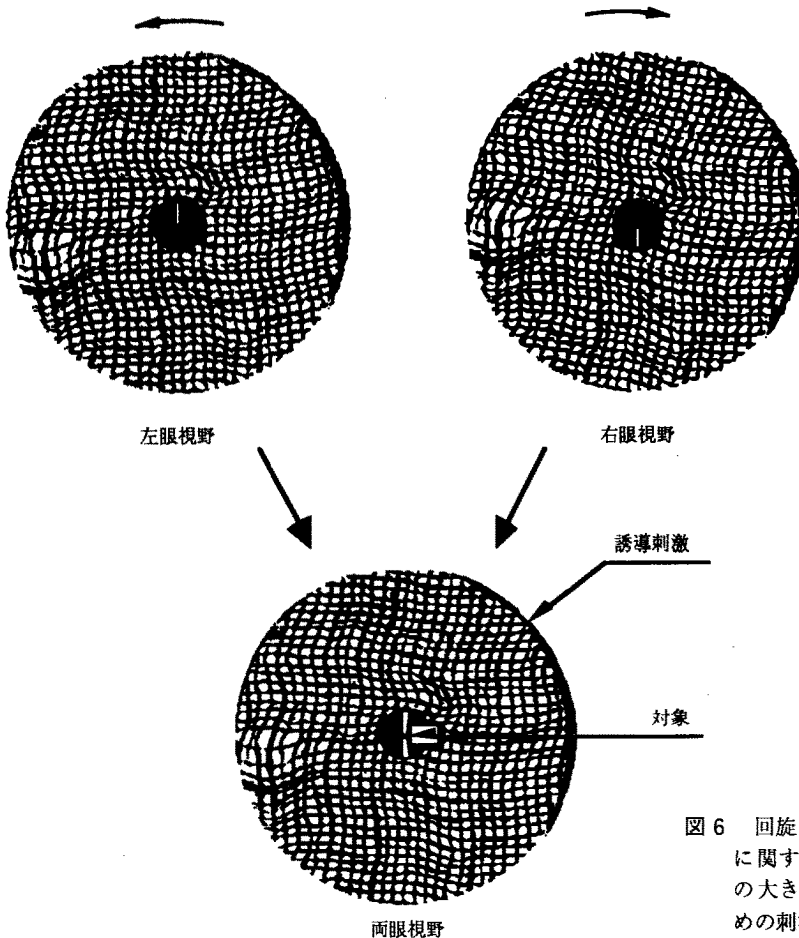


図6 回旋軸の周りの回転に関する視覚誘導運動の大きさを測定するための刺激配置

二つの線分対象が互いに反対方向に振動するのが知覚される。誘導刺激と同期して線分対象を振動させ、静止して見えるようにその振動を調整することによって視覚誘導運動の大きさを求めた結果が図7の○印である⁹⁾。回旋軸の周りの回転に関する視覚誘導運動は振動周波数の増加につれて減少するが、振幅が3度の誘導刺激の25~60%の運動が誘導されており、垂直軸の周りの視覚誘導運動に比べて顕著に高い。この視覚誘導運動には頭部座標系におけるものと眼球座標系におけるものの両方が含まれている。

ここで用いた誘導刺激によって生起される回旋輻轉眼球運動は不随意性のものであるから、その登録を視覚系は利用できないと考えられる。したがって回旋輻轉眼球運動の大きさが頭部座標系における視覚誘導運動の上限となる。同一の誘導刺激に対して測定された回旋輻轉眼球運動の振幅を図7の■印で示す¹³⁾。視覚誘導運動は回旋輻轉眼球運動より大きく、回旋軸の周りの回転運動については眼球座標系における視覚誘導運動が顕著な貢献をしていることがわかる。高い周波数、すなわち運動信号が十分に大きい場合、では視

覚誘導運動の約半分が眼球座標系におけるものである。これに対して低い周波数では眼球座標系における視覚誘導運動は見られないが、これは回旋輻轉眼球運動が運動信号ばかりでなく両眼視差信号によっても生起されていることと関係していると考えられる。

回旋軸の周りの回転に関しては、誘導刺激が対象を取り囲んでいる場合に大きな視覚誘導運動が生起されるが、その逆の場合にはほとんど視覚誘導運動は生起されない²⁾。これは回旋軸の周りの視覚誘導自己運動が奥行きに依存するばかりでなくむしろ視野に依存する¹⁴⁾ことを示唆しているが、十分な検討がなされてきたわけではなく、今後の報告が待たれる。

6. おわりに

視覚誘導運動を例にとり、多層の座標系構造のなかでの視知覚について述べてきた。視覚誘導運動の他にも、視方向・身体の方角・身体の進行方向の知覚、自己および対象の傾きの知覚、運動視差による奥行の知覚を知るという作業を行ないながら、同時に外界における対象の位置・運動・属性を知ると

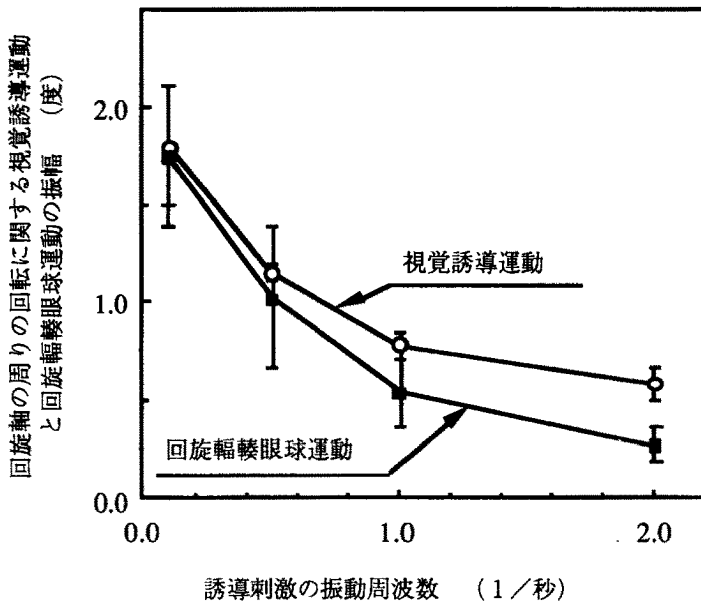


図7 回旋軸の周りの回転に関する視覚誘導運動と回旋輻轉眼球運動の大きさ

いう別個の作業を行なう二重性の機構である。進化の過程において対象を知るための機構が必要となった時点で、新たな機構を構築する代わりに、原初より存在していた自己を知るための機構に対象を知るための機構がつぎはぎ細工された結果であろうが、そのため多層の座標系の間を無視して視覚系を理解することは出来ない。この解説では眼球座標系・頭部座標系・身体座標系・外界座標系の間が物理的関係とそれぞれの座標系の運動の登録をいう生理的關係によって連合されているように述べてきたけれども、むしろ見かけの距離・見かけの方向・自己運動の知覚といった知覚的關係を重視するべきであるとの考えもある¹⁹。多層の座標系を構造づけるために視覚系がどの場合にどの情報を使い、どの情報を使わないのか、また互いに矛盾する情報が存在する場合にどのように処理をしていくのかを今後明確にしていく必要がある。そこには何らかの基本的原理が存在するであろうし、その解明は視覚系全体の構造を知るために重要なばかりでなく、より人間的で、より効率的な画像表示方式・入出力方式の開発のためにもないがしろにされてはならないことである。

文 献

- 1) I. P. Howard: *Human visual orientation*. Chichester, John Willy and Sons, 1982.
- 2) A. H. Reinhardt-Rutland: Induced movement in the visual modality: An overview. *Psychological Bulletin*, 103, 57-71, 1988.
- 3) T. Heckmann and I. P. Howard: Induced motion: Isolation and dissociation of egocentric and vection-entrained components. *Perception*, in press, 1991.
- 4) M. Ohmi, I. P. Howard and J. P. Landolt: Circular Vection as a function of foreground-background relationships. *Perception*, 16, 17-22, 1987.
- 5) M. Ohmi and I. P. Howard: Effect of stationary objects on illusory forward motion induced by a looming display. *Perception*, 17, 5-12, 1988.
- 6) I. P. Howard and W. Simpson: Human optokinetic nystagmus is linked to the stereoscopic system. *Experimental Brain Research*, 78, 309-314, 1989.
- 7) R. B. Post and L. A. Lott: Relationship of induced motion and apparent straight-ahead shifts to optokinetic stimulus velocity. *Perception and Psychophysics*, 48, 401-406, 1990.
- 8) L. Matin: Visual localization and eye movements. K. R. Boff, L. Kaufman and J. P. Thomas (eds): *Handbook of perception and human performance, Vol.1 Sensory processes and perception*, New York, John Willy and Sons, 1990.
- 9) M. Ohmi and I. P. Howard: Induced visual motion: Dissociation of oculocentric and headcentric (oculomotor) components. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 32, 1272, 1991.
- 10) I. P. Howard, B. Cheung and J. Landolt: Influence of vection axis and body posture on visually-induced self rotation and tilt. *Proceedings of the AGARD Conference on Motion Cues in Flight Simulation and Simulator Sickness*, 100, Brussels, 1987.
- 11) J. J. Koenderink: Optic flow. *Vision Research*, 26, 161-179, 1986.
- 12) D. Regan and M. Cynader: Neurons in cat visual cortex tuned to the direction of motion in depth. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 22, 535-550, 1982.

- 13) I. P. Howard and J. E. Zacher: Human cyclovergence as a function of stimulus frequency and amplitude. *Experimental Brain Research*, in press, 1991.
- 14) T. Brandt, T. Dichgans and E. Koenig: Differential effects of central versus peripheral vision on egocentric and exocentric motion perception. *Experimental Brain Research*, 16, 476-491, 1991.
- 15) W. C. Gogel: A theory of phenomenal geometry and its applications. *Perception and Psychophysics*, 48, 105-123, 1990.