

立体視

奥行きてがかりとしての両眼網膜像差および運動視差

氏家 弘裕

東京工業大学工学部像情報工学研究施設
226横浜市緑区長津田町4259

1. 奥行き知覚の手がかり

私たちがふだん見ているのは、網膜像の情報をもとにして再構成された視空間であり、私たちの生活の場が3次元空間であるのに対応して、知覚される視空間も3次元的である。しかし情報源となる網膜像が2次元であるから、何らかの形でこの失われた次元の情報を補う必要がある。これを網膜像のなかに見るのであれば、きめの勾配 (texture gradient; 近いものほどきめは荒く、遠くなるほどきめが密になる) や、重なり (overlapping; 手前のものが奥のものを覆う)、陰影 (shading; 3次元構造物に一方から光があたった場合などに生じる) あるいは大気遠近法 (aerial perspective; 非常に遠い物体ほど大気の影響を受けてぼやけたり、暗くなる) などがある。しかしこのような日常的な手がかりが使えない場合、例えば小さな点だけが異なる距離に置かれているような場合には別の手段によって、失われた次元の情報を補うことになる。例えば図1aでは、両眼視をすることによって生じる対象の像の左右の網膜上での対応点 (corresponding points) からのずれ、すなわち両眼網膜像差 (binocular retinal disparity) を用いる場合であり、図1bでは、観察者が移動することによって生じる網膜上での対象の相対的なずれ、すなわち運動視差 (motion parallax) を用いる場合である。両者は、異なる観察位置からの対象の方向に関する情報を利用する点で共通する。以下では、両眼網膜像差、あるいは運動視差を用いた立体視について、そ

の基本的な考え方と問題点について述べる。

2. 両眼網膜像差による奥行き知覚

まず両眼立体視の基本事項について述べる。今、図2に示されるように両眼でO点を注視しているとす。このとき左右の網膜上で中心窩から同方向、同距離にある点を両眼の対応点とよぶ (当然、O点は左右の中心窩である対応点に像を結んでいる)。そして観察者までの距離がO点と同じA点はこの対応点に像を結ぶが、O点よりも遠いB点やO点よりも近いC点は対応点から少しずれた点に像を結ぶ。ここでB点の網膜像差は $d_{BL} - d_{BR}$ あるいは $\angle b_L B b_R - \angle o_L O o_R$ で示される。またB点の様に注視点よりも遠い場合非交差性網膜像差 (uncrossed disparity) と言い、C点の様に注視点よりも近い場合交差性網膜像差 (crossed disparity) と言う。このように網膜像差が注視点と対象との間で用いられるとき、これを絶対網膜像差 (absolute disparity) といい、複数の対象間で用いられるとき、これを相対網膜像差 (relative

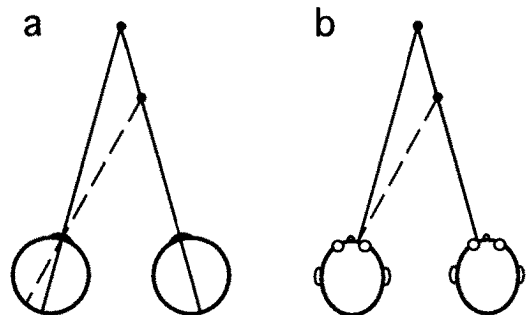


図1 両眼網膜像差 (a) と運動視差 (b)

disparity) という。ところで視覚系は図2に示されているような物理的な関係を利用して、観察者の網膜上に生じる対象の像のずれをもとに奥行きを再構成していると考えられる。しかしこの視覚系のメカニズムを理解するのはそれほど単純なことではない。以下にその主な問題点を述べてみる。

2.1 ホロプター

上に述べたように視覚系が網膜像差を利用して奥行きを再構成しているとすれば、像差のない点列の集合について把握しておく必要がある。いま絶対像差について考えよう。注視点に対して像差のない点の位置は、おおまかに言えば観察者までの距離が注視点と等しい位置であるが、幾何学的に求めると水平面上では注視点と両眼の節点 (nodal point) を通る円上 (Vieth-Muller 円) となり、さらに空間全体で考えると注視点を通る垂直な直線をも含むことになる (図3a)。このような両眼の網膜像差のない点、すなわち両眼の対応点に像の結ぶ空間上の位置をホロプター (horopter) といい、特に水平面上の円の方を経線ホロプター (longitudinal horopter)、垂直な直線の方を垂直ホロプター (vertical horopter) という。さらに、こうした幾何学的に求めたものを後に述べる実験的に求めたものと区別するために、幾何学的ホロプター (geometric horopter) ともいう。Vieth-Muller 円に関しては、幾何学で示されるところの同一弧上の円周角の性質を考えれば即座に理

解できる。また垂直ホロプターに関しては、図3aをもとに考えやすい。いま注視点Oに対して Vieth-Muller 円Cがあり、これを垂直方向に延ばしてできる円筒以外の空間の点では明らかに水平方向の像差 (horizontal disparity) が生じるために除外される。さらにこの円筒上の点のうち注視点を通る垂直線V上以外の点 (例えば図中のA) では、水平像差はないがA点と各眼の接点までの距離が異なるために垂直像差 (vertical disparity) を生じ対応点に像を結ばないのである。

幾何学的ホロプターに対して、実際に測定して求めたものを実験的ホロプター (empirical horopter) という。経線ホロプター測定の方法には、両眼での結像点一致するとの観点からノニウス (nonius; 両眼に各々上半分と下半分の線分を提示する刺激) の一致する軌跡を求める場合や、融像領域の中点であるとの観点から対象の像が単一像に見える範囲を求めたうえでその両側の境界線の中点の軌跡とする場合がある。図4はその後者の方法によって求められたものである¹⁾。図中太い破線が測定された実験的ホロプターであり、点線が Vieth-Muller 円すなわち幾何学的ホロプターである。これを見ると両者の間にずれ (Hering-Hillebrand deviation) が見られるが、このずれの形状は注視距離によっても変わることが知られている。このずれに対して、両眼の対応点の分布が相対的に鼻側で拡大しているために生じているとす

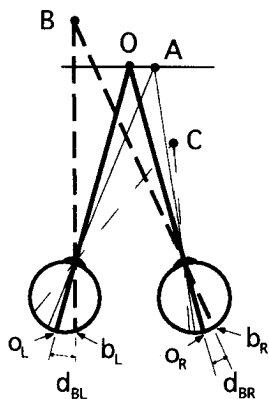


図2 両眼網膜像差による両眼立体視

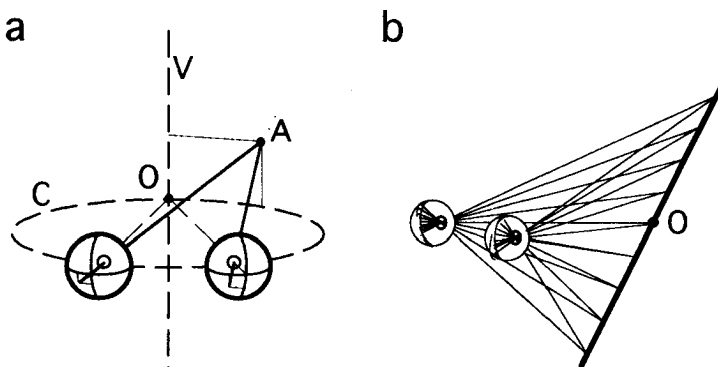


図3 (a) 幾何学的ホロプター (b) 垂直ホロプター

る推測が行われている³⁾。

幾何学的に垂直ホロプターを考えた際に両眼の対応点は碁盤の枡目状に網膜上に整然と配置されていることを暗黙のうちに仮定したが、Helmholtz は垂直方向での両眼の対応点を含む直線は1度程傾いていることを指摘している³⁾。すなわち剪断方向に歪んでいるというのである。近年 Nakayama (1977) が上下方向に60度の範囲で対応点を測定したところ、被験者による差はあるもののほぼ2から5度の傾きのあることが示された⁴⁾。この点を考慮すると実は垂直ホロプターは真に垂直ではなく図3bのように上を奥に下を手前にというように傾くことがわかる。しかもこの傾きは注視点の距離によって異なり、注視距離が遠いほど垂直ホロプターの傾きも大きくなる。

垂直ホロプターの傾きによって説明しうる現象の一つに両眼モアレ縞 (binocular moire fringes) がある。Piggins (1978) は、垂直方向からわずかに傾いた縦縞の刺激とその垂直線に線対照な刺激とを左右の各眼に提示したところ、縦縞が階段状に重なって知覚されることを報告している⁵⁾。これは縦縞の両眼での対応が垂直ホロプターにそって生じていることによって説明される。これと同様な階段状の知覚は Nakamizo et al (1995) によっても示されている⁶⁾。彼らは碁盤の枡目状に配置された点列の描かれた紙片を奥行き方向に傾けて観察者に提示した。また紙片の傾きを予測される垂直ホロプターの傾きに等しくしたときには階段状の知覚が消えることから、垂直ホロプターの効果

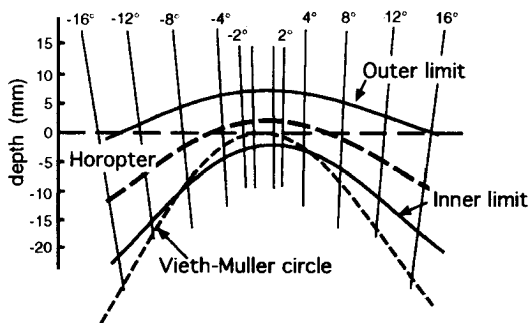


図4 実験ホロプターとVieth-Muller円

を示したといえる。

2.2 Panumの融合域と網膜像差勾配による制限および奥行き量

前節では網膜像差のないホロプターを示したが、単一像が知覚されるのは実はこのホロプター上のみではなくそれを含む広がりを持った領域である。本節では、この領域とさらに視差量にともなう奥行き量の知覚とに関して述べる。網膜像差量が一定以内であれば単一像が知覚される領域として、Panumの融合域 (Panum's fusional area) がよく知られている。この領域の測定結果についてはすでに図4で示されているが、近年この領域内であっても異なる像差の対象が互いに近くに存在する場合には二重像 (double image) となることが指摘された。Burt and Julesz (1980a, b) は、網膜像差勾配 (disparity gradient) を2対象間の相対網膜像差をその視角による対象間の距離で割った値と定義し、この値が1を越える場合にはたとえPanumの融合域内であっても二重像になることを示した^{7,8)}。これが実際にどのような領域になるかを図5に示す。注視点をOとし、斜線の領域を融合域とする。A点のそばにB点とC点が存在するが、A点からみて網膜像差勾配が1を越える領域はA点で交差する2本の線の内側である。ここでこの領域の中にC点が存在するため、A点もしくはC点、あるいは両者が二重像

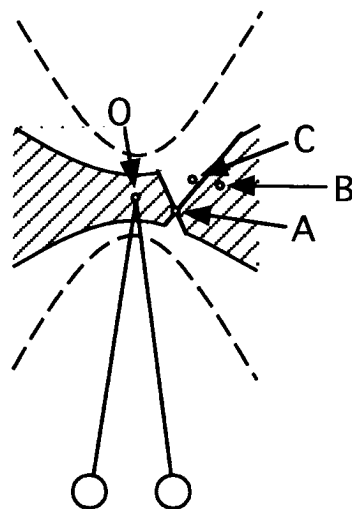


図5 Panumの融合域と網膜像差勾配による制限

に知覚される。一方、B点はこの領域外であるためなら影響もなく単一像として知覚される。

ではこうした融合域に関連して像差量に対する奥行き量の関係はどのようになっているのか。図6は横軸に網膜像差量を示し、縦軸に知覚される奥行き量を模式的に示している⁹⁾。これによれば、像差量が一定量に達するまでは奥行き量も線形的に増加する。このとき二重像であってもある像差量までは奥行きが増加し、しかしあるところから奥行き量はいっきに減少してついには奥行きが知覚されなくなる。Richards and Kaye (1974) は実際に幅のことなる棒を刺激に用いて像差量と知覚される奥行き量との関係を求めた¹⁰⁾。結果は図6と定性的に一致したが、刺激の幅によって知覚される最大の奥行き量は異なり、24分のものを用いたときに最も大きい奥行き量を示した。

この刺激の幅と奥行き量の最大量との関係については受容野の大きさとの関連から考えることが可能である。すなわち大きな受容野は大きな像差量を検出し、小さな受容野は小さな像差量を検出すると考える。Schor et al (1983) はDOG (difference of Gaussian) を刺激に用いて奥行き量の知覚閾を測定し、このことを調べている¹¹⁾。彼らによれば、もし視覚系が刺激のサイズによらず像差量を検出しているのであれば、奥行き量の閾は刺激のサイズによって変化しないはずであるが、結果は刺激のサイズの影響を受けるものであった。従って、刺激の大きさあるいは空間周波数に依存する像差検出のメカニズムが示唆される。

2.3 対応問題

ここまでは、網膜像差を考えるうえで左右の網膜像における対象の像の対応は明らかなものとして話を進めてきたが、実はこの対応を求めるメカニズムを考察することが両眼立体視を考えるうえで最も大きな問題であり、これは対応問題 (correspondence problem) として知られている。

両眼の網膜像差から導かれる奥行きに関して

実験的に調べられたのは、Wheatstoneの実体鏡を用いた実験あたりからといわれているが、Helmholtz などによって像差による立体視には対象の輪郭線の一致が重要であることが主張された。すなわち両眼立体視の処理は単眼情報に基づく輪郭線抽出後に行われると考えられたのである。しかし近年、Julesz (1960) のランダムドットステレオグラム (random-dot stereogram: RDS) はこの主張を否定した¹²⁾。すなわち各単眼に提示されるランダムドットでは、像差を検出するための対応を決めるべき形の情報 (いわゆる輪郭線) をあらかじめ抽出することができないにもかかわらず、両眼で融合することで明確な奥行きを形状を知覚することが可能である。しかしこのことによって立体視のメカニズムに関し、単なる輪郭線の対応ではなく点と点との対応を考えなくてはならなくなり、非常に難しい問題であることが明らかになった。

例えば図7に示されるケプラーのモデル (Keplerian model) で考える場合、点と点との対応可能な組み合わせの数は単純に考えて単眼に提示された点の数の二乗分だけ存在するが、実際に知覚されるのは提示されたもとの要素の数の分だけである。従って、対応問題を考えることはこの組み合わせを絞り込むアルゴリズムを考えることである。Marr (1982) はこれを解くためのアルゴリズムを提案した¹³⁾。これはもとの像に複数の異なる周波数フィルタをかけそのゼロ交差に応じて対応を求め、さらに3つの

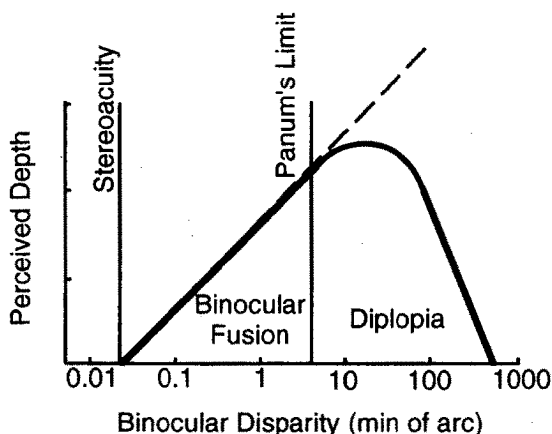


図6 像差量と奥行き量の模式的関係図

制約，すなわち適合性（compatibility；特徴の一致するものどうしが対応する），一意性（uniqueness；各網膜像の一点ずつ対応する），連続性（continuity；対応する点の網膜像差は滑らかに変化する）の制約を設定して唯一の対応を求めるというものである。シミュレーション結果から，このアルゴリズムによる立体視が可能であることが示された。しかしこうした制約に対して心理物理学的な知見と必ずしも一致しないことが示されている。例えば連続性の制約に関しては，面と面との境界においては必ずしも成立しないし，また一意性の制約に関しても Panum の限界事例（Panum's limiting case）の場合でも奥行きが知覚されることから成立するとはいえない。一方，最近は両眼立体視のメカニズムを単なる点と点との対応問題としてとらえるのではなく，面を形成する過程との関連からとらえようとする試みが行われてきている^{14, 15)}。

3. 運動視差による奥行き知覚

運動視差に関しては，「観察者の頭部運動によって生じる対象網膜像の相対的なずれ」としてとらえる見方と，それに加えて「対象物体の運動によって生じる対象網膜像の相対的なず

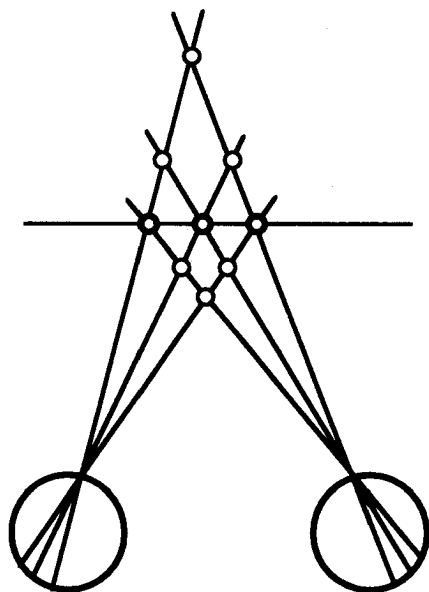


図7 ケプラーのモデルによる対応の組合せ。左右の眼に各々3つの点を提示すると対応の組合わせはその二乗の9通りになる。

れ」をも含めてとらえる見方とがある。ここでは運動視差を前者の立場で定義し，主にそのような状況での奥行き知覚について考えていく。

運動視差の奥行き知覚に対するてがかりの独立性は，Rogers and Graham (1979) によって示された¹⁶⁾。彼らはCRT上にランダムドットを提示しその左右方向の速度を空間的に縦方向に正弦波状としその移動量を観察者の左右方向の頭部運動に対応させた。その結果観察者は正弦波状の奥行き面を知覚した。そして彼らは，運動視差はそれのみで奥行き知覚の十分なてがかりとなること，また奥行き量の十分な情報源となることを結論している。このRogersらの方法は両眼網膜像差の奥行き知覚に対するてがかりの独立性を示した Julesz (1960) の方法に対応する。運動視差に関する研究はその性質の類似性から両眼視差と対応づけて行われることが多い。その具体的な例として等価像差（equivalent disparity）を上げることができる。

等価像差は運動視差量を与える一つの方法で，頭部が両眼間距離（inter-ocular distance）に相当する距離だけ移動した時に生じる対象網膜像のずれ量で定義される。すなわち運動視差における網膜上でのずれ量を両眼網膜像差に置き換えた量と考えることができる。本来の運動視差量は対象の奥行き量が一定であっても頭部運動の量に応じて変化してしまうが，この等価像差を用いることで奥行き量に幾何学的に一意に対応した運動視差量を考えることができる。

ここではまず，運動視差と両眼網膜像差との関連性についての知見を述べた後，運動視差に関するその他の知見について述べる。

3.1 運動視差と両眼網膜像差

この領域については，RogersとGrahamとで盛んに研究を行っている。彼らは二つのメカニズムがどの程度関連しているのかを様々な立場で研究してきた。Rogers and Graham (1982) は，先に述べたランダムドットの刺激を用いて運動視差と両眼像差とで奥行き絶対閾を奥行き空間周波数ごとに比較した¹⁷⁾。その結果，運動視差による閾の方が等価像差にして約2倍ほど

両眼像差によるものより高かったものの、空間周波数に対する変化では、0.2~0.4 c/deg で閾値が最も低くその両側で上昇するという傾向は同じであった。Graham and Rogers (1982) は奥行き継時コントラスト効果 (successive contrast effect; 一定時間奥行きを観察した後に平面が逆向きの奥行きに知覚される) あるいは同時コントラスト効果 (simultaneous contrast effect; 周囲の奥行きによって中心部の平面が逆向きの奥行きに知覚される) を打ち消すのに必要な逆向きの奥行き量を、各々運動視差による奥行きと両眼像差による奥行きとで調べた¹⁹⁾。その結果、継時コントラスト効果を打ち消すには最大70%の奥行き量を必要とし、同時コントラスト効果を打ち消すには最大50%の奥行き量を必要としたが、その量は運動視差と両眼像差とではほぼ等しかった。この2つの報告から、基礎的な性質は運動視差および両眼像差と同様であることがわかった。

彼らはさらに二つのメカニズムの相互作用についても調べている。Rogers and Graham (1984) は一方のてがかりによる奥行き面の順応が、他方のあいまいな奥行きに影響を与えるかを調べた¹⁹⁾。例えば両眼視差による奥行き面を10秒間観察した後、観察者は静止した状態で奥行き面をシミュレートした刺激の運動を提示する。その結果観察者は順応時の奥行き方向とは逆向きの奥行きを知覚することが示された。またRogers and Collett (1989) は両眼像差と運動視差とを同時提示したときの奥行き知覚について報告している²⁰⁾。そして運動視差による奥行きに両眼像差ゼロを同時提示した場合、知覚される奥行き量は運動視差単独提示のときの半分で、さらに奥行き量の減少に応じて、奥行き面の回転が観察されたとしている。こうしたことから、二つのメカニズムは奥行きの統合が起こる前の段階で相互作用していることが考えられる。

3.2 奥行き知覚の頭部速度依存性と運動知覚およびトレードオフ

前節では、運動視差と両眼像差との関連性に

ついて述べたが、後者は異なる方向からの情報を同時に取り込むのに対して、前者は時間的なずれをとまって取り込む。従ってこの時間的な性質の相違が両者に何らかの相違を与えていることが考えられる。Ujike and Ono (1992) は、奥行きの絶対閾が頭部速度の影響を受け、頭部速度約15 cm/s を境にしてそれよりも大きい場合には等価像差一定、小さい場合には網膜相対速度一定で示されることを報告した²¹⁾。またOno and Ujike (1993) は知覚される奥行き量についても同様の傾向があることを示すとともに、等価像差が一定以上になると奥行き量が減少し対象の運動の知覚が生じることを報告した²²⁾。

この知覚される奥行き量の減少と対象の運動知覚の増加は、Ono and Steinbach (1990) によっても報告されており²³⁾、奥行き知覚と運動知覚のトレードオフとして考えられている。すなわち、運動視差による網膜像の相対的な運動が何らかの理由によって奥行き知覚に完全には変換されない場合に、その残りの網膜上での運動成分が運動として知覚されるというものである。

3.3 運動視差に関するその他の知見

Ono et al (1986) は運動視差による奥行き量が提示位置までの距離の逆数の二乗に比例することを示した²⁴⁾。彼女らは、奥行き面をCRT上でランダムドットによってシミュレートし、CRTの提示位置を40, 80, 160, 320 cmとしたときにいわゆる逆二乗則に従って奥行き量が増加することを報告している。この点に関しては、さらにRivest et al (1989) が、提示距離を物理的な値ではなく見かけの距離によって補正されていることを示している²⁵⁾。

Ono et al (1988) は運動視差と動的遮蔽 (dynamic occlusion; 手前の物体が奥の物体を観察者の頭部運動に応じて遮蔽すること) とで知覚される奥行きについて調べた²⁶⁾。その結果、2つのてがかりが相反する場合には知覚される奥行きの方向はシミュレートされる奥行き量に依存し、等価像差にして25分より大きい場合動的遮蔽によって決まり、25分より小さい

場合運動視差によって決まることが示された。

4. 結び

以上、両眼像差と運動視差とに関わる奥行き知覚について述べてきたが、最後に今後の問題点について一言触れておきたい。両眼像差に関しては、先にも述べたように点对点の対応問題としてとらえるのではなく、面形成の過程の一部として考えていく必要がある。また運動視差に関しては、奥行き形成のための統合時間の問題を含めた時間的影響について考えていく必要があると思われる。また日常的に知覚される奥行きは様々なてがかりが存在するもとで生じるものであり、各てがかり間での相互作用や奥行きの統合についてもさらに明らかにされていく必要があると思われる。

文 献

- 1) K. N. Ogle: *Researches in Binocular Vision*. Hafner, New York, 1964.
- 2) C. W. Tyler: The horopter and binocular fusion. *D. Regan (ed): Binocular Vision*. CRC Press, Boca Raton, 1991, 19-37.
- 3) H. von. Helmholtz: *Treatise on Physiological Optics*. Dover, New York, 1962.
- 4) K. Nakayama: Geometrical and physiological aspects of depth perception. *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrument Engineers*, 120, 1-8, 1977.
- 5) D. Piggins: Moires maintained internally by binocular vision. *Perception*, 7, 679-681, 1978.
- 6) S. Nakamizo, H. Ono and H. Ujike: Subjective staircase: a multiple wallpaper illusion. 原稿準備中.
- 7) P. Burt and B. Julesz: A disparity gradient limit for binocular fusion. *Science*, 208, 615-617, 1980a.
- 8) P. Burt and B. Julesz: Modifications of the classical notion of Panum's fusional area. *Perception*, 9, 671-682, 1980b.
- 9) C. W. Tyler: Cyclopean vision. *D. Regan (ed): Binocular Vision*. CRC Press, Boca Raton, 1991, 38-74.
- 10) W. Richards and M. G. Kaye: Local versus global stereopsis: Two mechanisms? *Vision Research*, 14, 1345-1347, 1974.
- 11) C. M. Schor, I. L. Wood and J. Ogawa: Spatial tuning for static and dynamic stereopsis. *Vision Research*, 24, 573-578, 1984.
- 12) B. Julesz: Binocular depth perception of computer-generated pattern. *Bell System Technical Journal*, 39, 1125-1162, 1960.
- 13) D. Marr: *Vision*. W. H. Freeman and Company, New York, 1982.
- 14) 中沢 仁, 竹市博臣, 下條信輔: 面の知覚的形成と両眼立体視. 鳥居修晃, 立花政夫 (編): *知覚の機序*. 培風館, 1993, 155-193.
- 15) 乾 敏郎: 視覚計算理論と心理物理学. 甘利俊一, 酒田英夫 (編): *脳とニューラルネット*. 朝倉書店, 1994, 26-48.
- 16) B. Rogers and M. Graham: Motion parallax as an independent cue for depth perception. *Perception*, 8, 125-134, 1979.
- 17) B. Rogers and M. Graham: Similarities between motion parallax and stereopsis in human depth perception. *Vision Research*, 22, 261-270, 1982.
- 18) M. Graham and B. Rogers: Simultaneous and successive contrast effects in the perception of depth from motion-parallax and stereoscopic information. *Perception*, 11, 247-262, 1982.
- 19) B. J. Rogers and M. E. Graham: Aftereffects from motion parallax and stereoscopic depth: Similarities and interactions. *L. Spillmann and B. R. Wooten (eds): Sensory Experience, Adaptation, and Perception*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, 1984, 603-619.
- 20) B. J. Rogers and T. S. Collett: The appearance of surfaces specified by motion parallax and binocular disparity. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 41A, 697-717, 1989.
- 21) H. Ujike and H. Ono: Two different limits of parallax depth. *Perception*, 21 (supplement 2), 86, 1992.
- 22) H. Ono and H. Ujike: Equal-depth contours as a function of direct velocities of head movement. *Perception*, 22 (supplement), 81, 1993.
- 23) H. Ono and M. J. Steinbach: Monocular stereopsis with and without head movement. *Perception and Psychophysics*, 48, 179-187, 1990.
- 24) M. E. Ono, J. Rivest and H. Ono: Depth perception as a function of motion parallax and absolute-distance information. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 12, 331-337,

1986.

- 25) J. Rivest, H. Ono and S. Saida: The roles of convergence and apparent distance in depth constancy with motion parallax. *Perception and Psychophysics*, 46, 401-408, 1989.
- 26) H. Ono, B. J. Rogers, M. Ohmi and M. E. Ono: Dynamic occlusion and motion parallax in depth perception. *Perception*, 17, 255-266, 1988.