

[光学論文賞受賞記念]



運動差図形の視覚的持続*

塩 入 諭

千葉大学工学部画像工学科 〒263 千葉市稲毛区弥生町 1-33

(1993年4月13日受理)

Visual Persistence of Motion Figures

Satoshi SHIOIRI

Department of Image Science, Faculty of Engineering, Chiba University,
1-33, Yayoi, Inage-ku, Chiba 263

1. はじめに

人間は、実際に網膜に存在する光以上の知覚をする。これは、大脳の処理が物や文字の認識を行っていることを考えれば当然といえるが、もっとずっと単純な視覚処理のレベルについても事実である。例えば、1ミリ秒の提示時間の光刺激に対して知覚されている時間はずっと長く、100ミリ秒以上にも感じられる。網膜上の光刺激の提示終了後も、視知覚が続いているわけである。このような現象は視覚的持続、あるいはアイコニックメモリーとよばれ、網膜上の刺激とほとんど変わらない画像情報を保持する機構であると考えられている。

視覚的持続の存在は Sperling¹⁾ により指摘された。彼は、短時間提示された文字列から何文字読み取れるかという実験に基づいて、刺激提示終了後も文字が読み取れていることを示したが、彼の実験方法(部分報告法)はやや複雑であるので、ここでは触れない。その後多くの研究者により視覚系にこのような記憶過程が存在することが確認された。例えば、Eriksen と Collins²⁾ は、図1に示すような刺激を用いて実験を行っている。図1aと図1bを呈示すると、それぞれの呈示の間の時間間隔が長い場合はそれぞれ無関連なドットが2枚呈示されるのがわかるだけである。しかし、時間間隔が100ミリ秒より短いところでは、視覚的持続により図1aの

ドットと図1bのドットが同時に知覚可能であるため、それを重ねたものが知覚される。この場合両図を重ねると(c)図になり、被験者は「OPT」の字を読むことができる。彼らは、2枚の絵の呈示間隔を変えながら文字の読み取りの正答率を測定している。正答率がある程度の高さを保持している時間間隔が最初の絵に対する知覚が続いている時間であるといえ、視覚的持続時間が推定できるといふわけである。

視覚的持続は、視覚情報の処理に十分な時間を与えるために物理的な刺激に近い画像を一定期間保持するための機能を果たしているとも考えられたが、それについては疑問も多い。そのひとつは、Sakitt³⁾ により展開された視覚的持続を光受容体レベルでの残像で説明できるとの主張である。これは視覚的持続時間に対する分光効率を測定すると(つまり刺激光の波長を変化させて、視覚的持続時間を測定すると)桿体の分光感度と良く一致するというところからの結論である。

しかし、視覚的持続をすべて桿体の残像のためであるとの考えは、容易には受け入れられず、それ以外の要因も存在することを示す反証も出された。例えば、Adelson⁴⁾ は、桿体に対しては同じ効率となるような2波長を選び一方を刺激に、他方を背景にした刺激図形を用いて視覚的持続の測定を行っている。もし桿体のみに視覚的持続が存在するのであれば、この条件では視覚的持続がなくなるはずである。しかし、彼は視覚的持続の存在を確認し、それが錐体の分光感度と良く一致することから錐体系に視覚的持続が存在すると結論づけた。桿体の

* 本稿は平成4年度光学論文賞受賞記念講演(1993年3月30日, 青山学院大学)を中心として、まとめたものである。

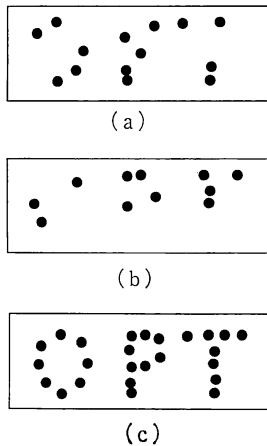


図 1 視覚的持続時間の測定に用いられる刺激の例。a と b をある時間間隔をあけて表示するとき、時間間隔が十分短ければ視覚的持続により、c のように重なって知覚され文字が読める。

みが視覚的持続に関わるわけではないことが明らかにされた。

さらに、多くの研究者は視覚的持続が網膜レベルの現象ではなく、大脳の視覚野のものであると主張する⁵⁻⁷⁾。そのようなものの一つは、視覚的持続時間が空間周波数に依存する事実を根拠にする⁸⁻¹⁰⁾。異なる空間周波数に選択的に感度を持つ多くの細胞が大脳での視覚処理の初期に存在することが知られているので、そこに視覚的持続の要因があると考えればよいことになる。しかし、これはそれほど明確な根拠となりえない。網膜レベルでも少なくとも 2 種類の異なる空間周波数に感度を持つメカニズムが存在するし、また単一のメカニズムでも空間周波数に依存した感度は持ちうる。もちろん光受容体での説明は困難であるため、視覚的持続をすべて桿体の残像で説明しようとの考えの反証にはなる。

いずれにしても、視覚的持続に関わるメカニズムとして網膜レベルの残像効果に加え、さらに高次のメカニズムを考える必要があるであろうというのが一般的な見解である (さらに詳細については Coltheart⁶⁾ や Long¹¹⁾ の総説を見ていただきたい)。しかし、大脳レベルに視覚的持続が存在することをはっきりと示せるような研究はほとんどなされていない。そのような状況の中で、Shioiri と Cavanagh¹²⁾ は運動刺激を用いることで大脳レベルでの視覚的持続の存在を示した。彼らの研究は網膜上の細胞は運動に対して選択性はなく、運動情報の処理が大脳レベルの処理であることを利用している。

2. 運動情報により形成された図形

近年、大脳生理学の発達により、大脳視覚野での視覚情報処理機構の解明が進んでいる。特に重要な知見としては、機能的な並列処理が挙げられる¹³⁾。これは、大脳での視覚情報が、いくつかの画像属性別に異なる部位で処理されるというものである。大脳視覚野は、解剖学的な特徴からいくつかの異なる領野にわけられている。この領野数は研究が進むに従い細分化される傾向にあるが、大まかには、V1, V2, V3, V4 に視覚連合野の MT (V5 と呼ぶ研究者もいる) を加えた 5 領野が初期レベルの視覚処理に関わる領野として頻繁に言及される。これらのうち V1 は網膜からの情報を受け取っている部分であるが、その後 V4 へ向かう信号は主に色情報の処理を行っているといわれ、また MT では主に運動情報の処理が行われているといわれる。このような処理の分化は V1 以降に生じているため、もし運動情報のみで形が形成できるとすれば、それにより大脳の運動情報を処理する経路での特性を評価できることになる。もちろんこれは主にサルの上肢の生理学的な研究から得られた知見であり、そのまま人間の知覚処理に置き換えられるかについては問題はある。しかし、例えば運動知覚が形状や色の知覚と独立になされていることを示す現象は少なからず報告されている。Anstis は刺激図形を移動し、同時にコントラストを反転すると (白地に黒の円を少し移動し黒字に白の円にする) 実際の移動方向とは、逆方向の運動が知覚されることを報告している¹⁴⁾。もちろん円の位置は移動の前後実際の移動と同じ場所に知覚される。この現象は、運動知覚と形状の知覚の空間周波数特性の違いで説明できるが、形状の認識と運動の知覚が独立に処理されていることを示唆する現象である。また Shioiri と Cavanagh はコントラストの反転がなくとも、視覚系の時間的抑制効果によるコントラスト反転で、逆方向の運動が知覚されることを報告している¹⁵⁾ が、やはり形状認識と独立な運動処理過程の存在を示唆する。また色と形状の独立性についても同様の現象が知られている¹⁶⁾。

運動情報処理過程を独立に刺激するためには、ランダムドットパターンを用いた仮運動刺激、ランダムドットキネマトグラムを用いる必要がある。図 2 はそのような刺激の例である。図 2 に示す 2 枚のランダムドットパターンは同一のドット配列を持つが、図形になる部分のみ左右像において少しだけ左に移動している。この 2 枚を併置し観察することから同一ドット配列部分を探した

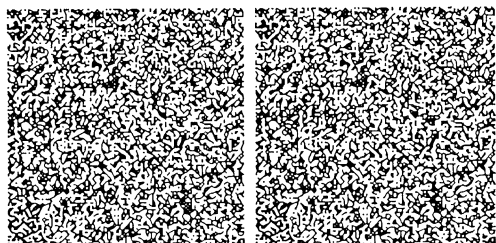


図2 視覚の運動検出機構を選択的に刺激するのに用いられる刺激画像の例(ランダムドットキネマトグラム)。aとbを空間的に同じ位置に順番に提示するとドットのずれにより動きが知覚され、しかも動いた領域が逆方向に動く背景から切り出されてみえる。

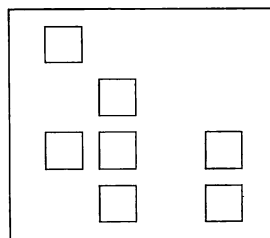
すことは非常に時間のかかる作業であり不可能に近い。しかし、この2枚を同じ位置に交互に提示すると、瞬時にして図形部分が分離して見える(2枚を両眼融合することでも図形が見える、交差法で観察すると「光学」の2文字が浮かぶ)。動きの情報をもとに形の認識がなされていることになる。

次節ではランダムドットキネマトグラムを刺激とし、運動情報のみでできた形の視覚的持続を測定した Shioiri らの実験¹²⁾について説明する。

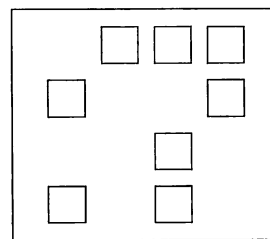
3. 運動差図形を用いた視覚的持続時間の測定

視覚的持続の測定法はいろいろあるが、2枚の画像を連続的に提示してそれらにより同時的な知覚がなされたかを調べるのが一般的である。図1の刺激はその一例であるが、Shioiri ら¹²⁾は Di Lollo が開発した方法¹⁷⁾を用いて測定している。刺激は図3に示すように正方形を4×4のマトリックス形式に並べたものであり、計16の正方形をランダムに8ずつに2分して2枚の画像を作る(図3aと図3b)。さらに、そのいずれかからひとつの正方形を取り除き、被験者には欠けている正方形の位置を応答してもらう(図3aと図3bを重ねたものが図3cであるが、正方形が欠けているのがわかる)。もし2枚が重ねて同時に提示されれば、被験者の応答は正確なものとなり100%の正答率が期待できる。しかし、2枚の画像の提示がある程度時間的に離れていると非常に難しい課題となる(図3aと図3bから欠けている正方形の位置を見つけるのはある程度の時間がかかり、もしそれぞれが非常に短時間のみ提示された場合、正答するのは非常に難しい)。

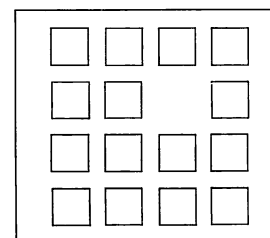
二つのパターンの時間間隔(ISI, interstimulus interval)を-67ミリ秒から467ミリ秒の間で変化させ、それ



(a) Frame 1



(b) Frame 2



(c)

図3 視覚的持続時間の測定に用いられる刺激の例。aとbをある時間間隔をあけて提示したとき、視覚的持続により同時に知覚された場合cのように欠落する正方形の位置がわかる。正方形の欠落位置に対する正答率から視覚的持続時間が推定できる。

それぞれの ISI に対して 32 回の試行から求められた正答率が測定された。3名の被験者に対する結果を図4に示す。データ点は各 ISI に対する測定値で、実験は最小二乗法による3本の直線による近似を示す。ここで負の ISI は二つのパターンに重なりがあることを意味し、ISI が-67 ミリ秒の条件はすべての正方形が同時に提示された条件である。

どの被験者においても、ISI が-67 ミリ秒の条件では高い正答率を示し、-30 ミリ秒程度から正答率の低下が始まり130 ミリ秒を越えると一定値に落ち着くことがわかる。視覚的持続が刺激の提示後130 ミリ秒程度存在することが明らかにされたことになる。すでに述べたように運動差図形は脳での処理であるといえることから、視覚的持続が脳視覚野に存在することが確認できたことになる(もちろんこのことは網膜レベルに視覚的

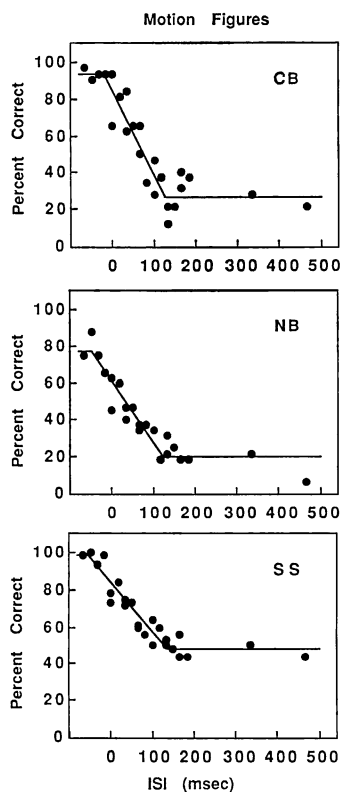


図4 時間間隔 (ISI) の変化に伴う正答率の変化 (Shioiri と Cavanagh¹²⁾ の書き改め). 実線は、測定値を3直線で評価するために最小2乗法で回帰した結果。

持続がないことを意味しない)。

実験結果についてさらに説明が必要な点が2点ある。まず、ISIが130ミリ秒以上の正答率である。もし被験者が最初のパターンを完全に忘却し、応答が2枚目のパターンの欠けている正方形からひとつをランダムに選択することでなされているならば、正答率は1/8か1/9 (12.6%か11.1%)となる。しかしすべての被験者でその値は20%以上となっている。これについては、視覚的持続と異なるさらに高次の記憶 (short-term visual memory) と考えられる視覚系の記憶^{18,19)}が関与していると考えられることで理解できる。もう一点は、1枚目と2枚目のパターンが実際に時間的に重なりをもって提示されても正答率は同時提示に比べ低下している点である。これは、輝度パターンの視覚的持続に対して知られている、刺激の提示終了から一定時間続くのではなく刺激の提示開始 (オンセット) と同期して働くものであるとの知見を考えれば説明できる。つまり、同時的に知覚されるためには、2枚のパターンのオンセットがある時間内に生じる必要があり、1枚目の刺激の終了に先だって2

枚目の刺激提示が開始されたとしても、オンセットの間隔が十分短くなければ同時的な知覚はなされないということである。後述するように、運動差図形に対しても視覚的持続が刺激のオンセットのずれ (SOA, stimulus onset asynchrony) に依存するとの実験結果が得られている。

Shioiriら¹²⁾の実験結果は、時間ずれをもつ刺激画像に対する同時知覚の原因が大腦視覚野に存在することを示すが、それが視覚的持続のためであるかについては考えておかなければならない点がある。それは実験結果が運動残効により説明できないかという点である。運動残効とは、一定方向の動きを観察し続けたあとに静止刺激に対して生じる錯視的な運動知覚である。運動残効があれば刺激提示終了後も動きが知覚されることになり、それによる形状の認識も可能かも知れない。つまり、もし、運動残効により動きが知覚されているうちに2枚目のパターンが提示されれば、ISIは0ミリ秒と同じになり、実験結果は運動残効時間を測定していることになる可能性があるということである。運動残効を得るためには数十秒程度の刺激提示が必要であることを考えるとこの可能性は低いだが、検討に値する問題である。Shioiriら¹²⁾はこの点に対して、ISIにおいてランダムドットパターンを一定方向に運動させることで、運動残効の影響をなくした条件で実験を繰り返した。その結果は、静止したISI条件と同様であり運動残効で実験結果を説明することはできないことを確認している。

4. 輝度差図形と比較

運動差図形で得られた視覚的持続時間130ミリ秒というのは、過去の報告にある輝度差でできた刺激に対する視覚的持続時間に比べ長いのであろうか短いのであろうか。この答えは簡単ではない。視覚的持続は、その刺激の形状、測定方法、また定義の仕方で異なるからである (図3においても、最高値から落ち始めたところや最高値と最低値の間になる点を取るなどの決め方が考えられる)。Shioiriら¹²⁾は、同じランダムドットパターンを用いてマトリックスの正方形部分の輝度を上げることで各正方形の提示を行い、運動差図形の場合と同一の実験を行っている。得られた結果は、運動差図形の場合と同様に3本の実線で近似され、正答率の低下がなくなるISIが視覚的持続時間として求められた。

運動差図形の場合と輝度差図形の場合の3名被験者に対する視覚的持続時間は、表1に示すとおりである。いずれの被験者も運動差図形において長い視覚的持続時間

表1 運動差図形と輝度差図形の視覚的持続時間 (ミリ秒)

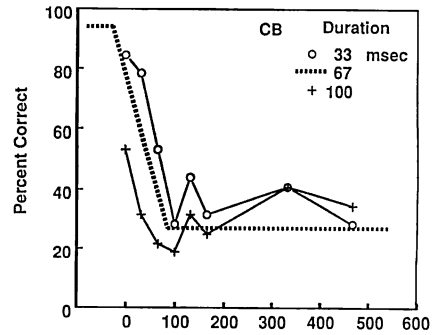
被験者	CB	NB	SS
運動差図形刺激	128.1	123.7	136.3
輝度差図形刺激	85.1	50.2	62.6

が得られており、輝度差図形とは差があることがわかる。これは、運動知覚において時間分解能が低いことを示す他の研究²⁰⁾と一致する。視覚的持続が輝度差図形の処理過程と運動差形状の処理過程で異なる特性をもち、それがそれぞれの過程の時間特性に依存することは十分に考えられる。しかし、視覚的持続時間が時間特性に依存するとしても、視覚的持続によるパターンの統合については、輝度差図形も運動差図形も同一のメカニズムでなされている可能性もある。

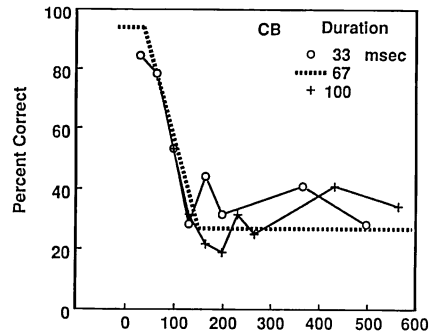
輝度差図形と運動差図形の比較として興味深い点ももうひとつある。前述のように輝度差における視覚的持続の特徴として、持続時間が刺激呈示のおわりではなく刺激の呈示開始に同期して決定されているというものがある。もし視覚的持続が刺激呈示終了から一定時間の刺激の見えであるとすれば、呈示時間を変えて測定しても同じ持続時間が得られることになる。しかし実際は、呈示時間が長くなると呈示終了からの持続時間は短くなることが知られている。この同じデータを2パターンでの呈示開始時間の差 (SOA) で表現すると呈示時間に依存しない結果となる。この視覚的持続の SOA への依存性は、運動差図形でも同様であることが、塩入と Cavanagh によって報告されている²¹⁾。前節で述べた Shioiri ら¹²⁾の実験と全く同じ刺激と被験者を用いて呈示時間のみを変化させた時の視覚的持続時間を測定している。図5は一名の被験者の結果である。正答率を ISI の関数として表す (図5a) と呈示時間が長くなるに依り、視覚的持続時間が短くなる傾向にあるが、SOA の関数として表す (図5b) と呈示時間に依存しないデータが得られていることがわかる。この点で、運動差図形の視覚的持続は、輝度差図形のものと同様であり、その時間特性の違いはあるがメカニズムとしては同種のものであることを示している。

5. ま と め

最後に視覚的持続の機能的な意味についてもう一度考えてみたい。視覚的持続の研究は1960年ごろに始まり、1980年の前半までに多数の研究報告がなされた。そして本稿で述べたように、それが大脳レベルの処理に関わる



(a) ISI (msec)



(b) SOA (msec)

図5 呈示時間の正答率への影響。測定値を ISI の関数としてプロットした図(a)と SOA の関数としてプロットした図(b)。

ことまでは明らかにされている。しかし、刺激の画像をそのまま保存するような情報保持過程の積極的な意味付けについての疑問が提出され、そのような側面からの研究は減少した。この疑問とは、通常の視覚処理過程で100ミリ秒程度の情報保持が必要なことはありえないという点に基づく²²⁾。静止しているシーンについての眼球運動を考えると、眼球がある一点を注視する時間は200ミリ秒から500ミリ秒程度であり、その間視覚系は同一のシーンの情報を獲得し続けることが可能である。したがって、ここでは視覚情報の保持は必要でない。そして、眼球運動がおり、注視位置を移動したときには視覚系が必要とするのは、新しい情報となるため、前の注視位置の情報は必要でなくなる。この場合、視覚的持続は、積極的に視覚情報過程に関与するものではなく、むしろ邪魔になる機構といえる²³⁾。例外は、例えばテレビを見る場合であり、視覚的持続がなければテレビは光点の走査のみがみえることになる。しかし、視覚系の進化がテレビを見るためになされたというわけにはいかない。

視覚的持続が網膜レベルの特性であると考えるかぎり、この点について反論の余地はないように思われる。

視覚的持続が脳レベルの特性である場合は、その保持機構が網膜座標系ではなく外界の空間座標系をとる可能性があり、注視点の移動によっても情報を保持する意味はありうる。しかし、眼球運動の前後での視覚刺激の足し合わせの研究を見るかぎり、この考えは否定されることになる。眼球運動の前と後に、図1aと図1bのようなパターンを呈示しても、それらが統合されて一枚の絵に見えることはないのである²⁴⁾。

それでは視覚的持続は、時間特性の反映以上の意味はないのであろうか。筆者は、前節で触れたように、視覚的持続は情報の統合に役立っているのではないかと考える。初期視覚では、輝度形状、色、運動、両眼立体視などが並列に処理されていることは述べた。だが、われわれが知覚するのはひとつの統合的な視覚像である。並列処理されたそれぞれの画像属性はどこかで統合されているはずである。処理時間等を考えると、統合に際して各属性の情報が同時に得られるとは限らない。むしろずれが生じる場合が多いであろう。そのときにそれぞれを同じものの属性であると知覚するためには、ある時間範囲に得られた情報は同時に生起した事象であると判断する必要があるであろう。視覚的持続はそのようなメカニズムの特性を反映している可能性もある。今後の大きな検討課題といえよう。

文 献

- 1) G. Sperling: "The information available in brief visual presentations," *Psychol. Monogr.: General Appl.*, **74** (1960) 1-29.
- 2) C. W. Eriksen and J. F. Collins: "Some temporal characteristics of visual pattern recognition," *J. Exp. Psychol.*, **74** (1967) 476-484.
- 3) B. Sakitt: "Iconic memory," *Psychol. Rev.*, **83** (1976) 257-276.
- 4) E. H. Adelson: "Iconic storage: The role of rods," *Science*, **201** (1978) 544-546.
- 5) E. H. Adelson and J. Jonides: "The psychophysics of iconic storage," *J. Exp. Psychol.*, **6** (1980) 486-493.
- 6) M. Coltheart: "Iconic memory and visible persistence," *Percept. Psychophys.*, **27** (1980) 183-228.
- 7) G. M. Long: "The varieties of visual persistence: Comments on Yeomans and Irwin," *Percept. Psychophys.*, **38** (1980) 381-385.
- 8) A. Bowling, W. Lovegrove and B. Mapperson: "The effect of spatial frequency and contrast on visual persistence," *Perception*, **8** (1979) 529-539.
- 9) G. E. Meyer and W. M. Maguire: "Spatial frequency and mediation of short-term visual storage," *Science*, **198** (1977) 524-525.
- 10) T. Ueno: "Visible persistence: Effects of luminance, spatial frequency, and orientation," *Vision Res.*, **23** (1983) 1687-1692.
- 11) G. M. Long: "Iconic memory: A review and critique of the study of short-term visual storage," *Psychol. Bull.*, **88** (1980) 785-820.
- 12) S. Shioiri and P. Cavanagh: "Visual persistence of figures defined by relative motion," *Vision Res.*, **32** (1992) 943-951.
- 13) 例えば, S. Zeki: "The visual image in mind and brain," *Sci. Am.*, September (1992) 43-50.
- 14) S. M. Anstis: "Phi movement as a subtraction process," *Vision Res.*, **10** (1970) 1411-1430.
- 15) S. Shioiri and P. Cavanagh: "ISI produces reverse apparent motion," *Vision Res.*, **30** (1990) 757-768.
- 16) 例えば, S. Shioiri and P. Cavanagh: "Achromatic form perception is based on luminance, not brightness," *J. Opt. Soc. Am. A*, **9** (1992) 1672-1681.
- 17) V. Di Lollo: "Temporal characteristics of iconic memory," *Nature*, **257** (1977) 241-243.
- 18) W. A. Phillips: "On the distinction between sensory storage and short-term visual memory," *Percept. Psychophys.*, **16** (1974) 282-290.
- 19) T. Kikuchi: "Temporal characteristics of visual memory," *J. Exp. Psychol.: Human Percept. Perform.*, **13** (1987) 464-477.
- 20) D. Regan and K. I. Beverley: "Figure-ground segregation by motion contrast and by luminance contrast," *J. Opt. Soc. Am. A*, **1** (1984) 433-442.
- 21) 塩入 論, P. Cavanagh: "動きの差により分離された図形に対する視知覚の時間的統合特性", 第51回応用物理学学会学術講演会予稿集 (1990) p. 767.
- 22) R. N. Haber: "The impending demise of the icon: A critique of the concept of iconic storage in visual information processing," *Behav. Brain Sci.*, **6** (1983) 1-54.
- 23) G. B. Breitmeyer: "Unmasking visual masking: A look at the "why" behind the veil of the "how,"" *Psychol. Rev.*, **87** (1980) 52-69.
- 24) J. K. O'Regan and A. Levy-Schoen: "Integrating visual information from successive fixation: Does trans-saccadic fusion exist?," *Vision Res.*, **23** (1983) 765-768.