不随意眼球微動と非静止映像

：ブラウン管ディスプレイの影響 (2)[†]

専門会員 佐藤 愛子*

1. 非静止映像

すでに多くの利用者たちがさまざまな視覚障害を訴えているように、マイクロコンピュータ端末機の各種のディスプレイが、視覚にもたらす悪影響ははなはだ多種多様で、かつその症状に重いものも多い。それらの症状の中で現在比較的良好に注目されているのは、(1)ディスプレイ面に表示される文字なり画像なりの読み取りの困難、(2)ディスプレイ面上の輝度分布と、ディスプレイ周辺の輝度分布との差の影響、(3)ディスプレイの色彩あるいは、ポジタイプとネガタイプのタイプ別の読み取りやすさの相違などである。これらの問題を解決する技術的な基礎と、その技術開発の方向はすでに定まっているといえる。

すなわち、(1)の読み取りやすさに関してはドットパターンの細かさ、スキャンの方式つまりランダムスキャンかあるいは従来のスキャンか、(2)についてはディスプレイの輝度変調、コントラスト変調を利用者の要求に応じてできるだけ幅広く対応できるようにしておくこと、ならびにディスプレイを設置してある周辺の作業状況の照明採光条件、作業台の配置、材料（原稿の用紙など）の品質の改良、その他である。(3)に関しては現在すでに、多色カラーディスプレイ、白黒ディスプレイ、グリーンディスプレイと3種類のディスプレイがあり、かつその文字、画像の表示に関しても、ネガタイプとポジタイプの変更可の機種が発売されている。しかも目の疲労に大きな影響を及ぼすとされている短波長部分に関しては、それをカットするためのディスプレイ面上に付けるフィルタが、すでに開発されて市販されているなど、(3)に関しては比較的問題が少ない。以上がディスプレイと視覚疲労に関する諸問題の現状の大勢である。

現在の研究の動向をみると、上述の(1)、(2)、(3)のどれかの範囲に関して、それぞれ着実に障害に関する症状の検討、それに対応する各種の実験などが開始されたように見

受けられるが、これらのほかに人間の視覚系の特色を考えるうえで忘れてはならない大きな神経生理的特徴がある。

それはブラウン管ディスプレイは、非静止映像であるということである。この点に関して、一概にマイクロコンピュータのディスプレイとまとめてしまうことはできない。現在すでに、液晶表示によるディスプレイを持った小型のマイクロコンピュータが市販されている。これは個人的な携帯用の機種である。現在、国内各所の事務所、作業所などで多数使われているディスプレイには、まだ液晶表示は普及していないと思うが、ブラウン管ディスプレイが時間的にも空間的にも静止していない映像であるのに対して、液晶表示は空間的にも時間的にも静止像を作ることができる。その点でこの二つのタイプは、はっきりと区別して考えなければならない。人間の視覚系機能に与える影響は、非静止映像か静止像であるかによって大きく異なるのである。たとえこの非静止映像が、自覚的には時間的にも空間的にも完全に融合域の範囲内にあり、静止像としか見えなくてもである。なぜそのように非静止映像を問題にしなければならないのか。

現在マイクロコンピュータを多数とり入れている各職場でそれぞれ独自に用いている、各種の疲労の自覚症状を検査する検査用紙の質問項目や、自由記述による回答の中に出てくる多数の自覚症状の訴えは、目がちらつく、目がしょぼしょぼする、新聞がはっきり読めなくなる、字がぼやける、頭痛がする、こめかみが痛いなどである。それらは現在の時点では、上述のビジュアルディスプレイのもっている問題点(1)、(2)、(3)のどれかにかかわりのあるものとして解釈されている。多くの場合(2)の輝度分布の違い、過大な明暗コントラストがもたらす過度な瞳孔反射の要求、あるいはドットの細かさの程度と、日本の文字の画数の多い複雑さとの相互作用からくる解読力にかかる過度の負担などで解釈されている。それらの現在の研究の動向については68巻3号「オフィスオートメーション特集号」に詳しく論じられていたとおりである。

しかし上述の多種多様な自覚症状を上述の(1)、(2)、(3)のどれかの原因にあてはめて解釈し、その改善策を提供した

[†] Flickering Figure on the Surface of a Cathode-ray Tube Terminal: Interference with Small Rapid Eye Movement

* 浜松医科大学医学部心理学研究室

Aiko Satow

としても、これらの自覚症状は完全になくなるとは考えられない。なぜならば、このような形で利用者から提供された疲労の内容にはなおかくされた問題があるのである。それが何であるかを明らかにするために、まず次章で眼球の不随意微動について述べる。この不随意眼球微細運動と非静止映像との関係が問題なのである。

非静止映像をわれわれが初めて見るようになったのは映画である。しかし映画は瞬間的にはフィルムのひとこまひとこまが呈示されているのである。そのひとこまは、その瞬間にはスクリーンの占めている面積全体の中に、1枚の画を呈示している。この点がブラウン管ディスプレイの映像と異なる。

2. 不随意眼球微動

人間の目は動いているものを追視しているときは、その対象の動く方向に向かって目が動いていく。その場合は、本人が意識しているところから、これは随意の眼球運動と呼ばれている。それに対して静止している対象をじっと注視しているとき、本人は自分の目をその対象に向けて静止させているつもりでも、実際には絶えず非常に微細な運動を続けていることが、アイカメラによる撮影からあきらかになった。この注視している場合の眼球の微動は不随意であるところから、動くものを追視しているときの随意の眼球運動に対して、不随意の眼球微動として区別されている。この微動は、なにかある対象を注視している人のその目を、近くにいる他人がじっとのぞきこんで見ていても、動いているとは見えない。この不随意の眼球微動が何らかの原因で病的に亢進することがある。その症例はその人の目が主として水平の往復運動をしているのであるが、その場合には眼球振盪（がんきゅうしんどう、Nystagmus、眼振）と名付けて、正常な場合の眼球運動とは区別して取り扱われる。病的な場合には近くから他人が、その人の目を見てその眼球振盪を肉眼で確認することができる。

注視時に行なわれている不随意眼球微動には、大きくわけて3種類あるとされているが、それらのいずれのタイプにせよ、上述のように肉眼では確認できない。その微細な程度は、1秒あたり30回から100回の振動（研究者によって最高の振動数が50, 60, 70, 80回などともいう）で、視角にして、中央値で17.5秒、最大値は研究者により2, 4, 6秒などとされている^{以上1)2)3)}。

この眼球の微動が、図形や文字の読み取りに重要な役割を果たしていることが明らかになったのは、この微動をキャンセルする実験装置が考案されたことによる。

3. 静止網膜像

図1に静止網膜像を作る実験装置の原理⁴⁾を示した。この装置では、注視する対象はプロジェクタからコンタクトレンズにはめ込まれた平面鏡へ投映され、鏡面で反射してスクリーン上に映る。その目で補償回路を通して対象を見ると、眼球の回転は相殺されて目が回転しても対象の網

図1 静止網膜像装置の原理の模型図
(Riggs, 1953⁴⁾)
詳細は本文参照。

膜像は網膜上では同じ位置にとどまる。日常では目が回転すれば見ている対象の網膜像の位置は回転につれて移動する。しかしこの装置では水平面上の回転は相殺されるが、垂直面上での回転は十分には打ち消されない。また中心部での眼球の回転は水平垂直に限らず、ねじれ方向に生じる場合があるので、この場合にもまた完全な静止は保たれない。

しかしその後改良を加えた装置の報告が、この装置の考案者のひとり Cornsweet と Dwelley⁵⁾ によって報告されている。装置の技術面については文献(6), (7)および(1)を見られたい。ところでこのような装置を用いて対象を注視していると、注視後まもなくその対象が見えなくなるということが発見された⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾。このことから眼球微動の役割が確認されたのである。

4. 形の知覚

この分野の研究が飛躍的に進歩したのは、微小針電極が開発されて、1本の神経繊維から活動電位を記録することに成功したからであった。1950年代以降、各種の動物の眼球や視神経から活動電位が記録され、それらの実験に基づいて視覚系の機能的な構造が明らかになった。ここでは現在までに判明した実験結果、およびその結果に基づいて構成された神経生理に関する概念について簡単に述べる。この分野の多数の研究をとりまとめた単行本として文献(8)がよく利用されている。

視覚系の情報伝達の概略

(1) ON型・OFF型・ON-OFF型応答

網膜を構成している神経細胞の、光に対する応答にはON型（光が照射されたときに神経が発射しているパルスの頻度が増加する）、OFF型（光が消えたときに神経パルス頻度が増加する）、ON-OFF型の3種類のあることが動物の眼球で発見された。この実験的事実は現在では他の研究者らによって確認され、現在では視覚の情報伝達に關

る機能的な概念としても、各種の心理・生理実験の結果の説明や、実験時のシミュレーションモデルとして広く用いられている。

(2) 受 容 野

神経細胞は神経繊維に連結しているが、その細胞と繊維の連結は一対一ではなく、いくつかの細胞が1本の繊維に連結している。かつ神経繊維には側枝があり、その側枝を通じて付近の繊維に影響を及ぼすこともできる。その側枝を通じて付近の繊維に影響を及ぼすこともできる。この収斂的（しゅうれんてき、あるいは集約的）構造は網膜を構成している細胞層の各層間の関係にも存在している。視床の外側膝状体や大脳皮質の視覚領野の細胞群と、そこに達している神経繊維との関係にも成立していることが判明しつつある。この連結関係を神経繊維の受容野（receptive field）と称している。この関係を概念的に示す場合は受容域ともいう。1本の神経繊維の受容野の、細胞上での位置やそれが占めている面積は、光が視細胞1個を照射している限り上述のように簡単である。しかし現実には光は複数の細胞を照射しているので、実際の受容野の構造は複雑である。実際の受容野は次に述べる側抑制の構造との関係で定まる。

(3) 側 抑 制

ある面積をもった光のパターンが、網膜上に投射されたとする。その場合、その光を受けているすべての神経細胞が一様に同じ程度の興奮を示すのではない。互いに隣りあう2個の細胞の一方が興奮すると、他方は興奮せず、むしろ抑制されることがある。どちらが興奮し、どちらが抑制されるかは、光の強度、光の占める面積とそれに対応する各細胞の位置関係などにより相対的に定まる。この現象は、かぶとがにの複眼を構成している個眼の光応答特性か

ら発見されたが¹⁰⁾、その後の多くの実験で確認された。図2に受容野の構造の模型図⁸⁾を示した。

(4) 特徴抽出機構

上述(1)~(3)までは光に対する応答の機構であったが、日常生活でわれわれのしているのは、図形や物体などのある対象である。形の知覚が成立するためには、上述の(1)~(3)の機構だけでは不十分である。微小電極による活動電位の記録から、形を形成している線分の方角、角（エッジ）、輪郭などに選択的に応答する細胞群のあることが判明しつつある。これらの細胞群は網膜、視床の外側膝状体、大脳皮質の視覚野などのそれぞれに存在していることが判明しつつある。このような細胞群の働きを特徴抽出機構と称している。図3に特徴抽出作用を模型図で示した⁸⁾。

図3 図形刺激に対する特徴抽出機構のはたらきを説明する模型図（Kuffler & Nicholls, 1977⁸⁾）
大きな横むきの長方形は、網膜上に投射された光のパッチを示す。小型の4個の円形と8個の長方形は、受容野の形を表わす。短い放射状の線でかまれている受容野は、他の受容野よりも神経パルスの発射が著しく増加していることを示す。このように網膜上に図形の像が結ばれると、図形の輪郭線や角の部分によく応答する細胞群がある。これらの細胞群はある面積内が一様に照らされたときよりも輪郭や角によく応答する。

上述の(1)~(4)の機構によって、図形や文字が網膜上に投影されたときその刺激を受け入れた細胞群は、各自の神経生理的性質に応じた興奮と抑制の作用をいとなむ。その結果、図形や文字の知覚が成立する。

以上の知見と、本稿でとりあげた不随意眼球微動が形の知覚になぜ役に立つかという問題とは、いかなる関係にあるのか。結論をさきに述べれば、眼球を微動させることによって、ある図形の網膜上の位置は微妙な移動をくり返すことになる。その結果、上述の特徴抽出機構の作用が一層効果的に働くのであらうとされているのである。触覚でいえば物体の表面や縁を指でなでて、そのきめ細かさや縁の形を知るように、目が微細な運動をすることにより、ある輪郭線がある瞬間には ON 中心領域の中にはいり、また次の瞬間には OFF 領域の位置にはいる。その結果、その輪郭線の特徴抽出が一層有効に行なわれると解釈されている。このことが単なる解釈にとまらないことは、前節に述べた静止網膜像の実験が明らかにしているところである。

では、見ている対象が微細な揺れ動きをしているならば、そのとき眼球はいかにすれば、その対象の特徴抽出ができるのか。人間の目が現在のような構造をもつに至って

図2 受容野のはたらきの模型図（Kuffler & Nicholls, 1977⁸⁾）
ねことさるの網膜では、ON 中心型の受容野と OFF 中心型の受容野がある。両受容野に種々の光刺激が与えられた場合の応答の型を示した。

からすでに長い長い歴史がある。その間、人間の目はつねに静止像——ここでいう静止とはあくまで上述の意味の微細な領域での静止である。走っている自動車や歩いている人を見るという、巨大なオーダーでの運動のことではない——に対応する眼球微細運動であった。もしも対象が微動しているならば、眼球的微動は必要なくなるという解釈が当然出てくる。対象と眼球のどちらもが微動していたら、微動の効果は倍増するのではなく、相殺されることになるのではないか。

極端ないい方をすれば、輪郭が不明りょうになることもありうる。そこでその微細な揺れ動きを続けている対象の形の特徴を明りょうに抽出しようとするならば、眼球微動を抑制する必要があるが、この微動は前節で述べたとおり不随意運動である。当人が意識していることは、いま自分はディスプレイの面上に出てきた文字や数字を読み取っているということだけである。他人からみると、そのときの当人は顔をディスプレイ面に近づける。目を細めたり、逆に大きく見開いたり、通常の場合以上にじっと注視したりなどのことをしているにすぎない。

眼球運動の研究は多数あるが、本稿が問題にしている非静止像と不随意微動との関係を問題にした実験はまだ見あたらない。技術的には測定可能なのであるが、しかしブラウン管ディスプレイ使用者の人数が日々増大するにつれて、それらの使用者から出されている各種の自覚症状を詳細に分析するならば、非静止映像と不随意眼球微動との関係が、いかなる結果をもたらしているかがそこに現われていることがわかるであろう。その一例はさきに報告した¹¹⁾。

しかし、すでに指摘したとおり(68巻7号)¹¹⁾ 自覚症状調査には、質問項目の妥当性、回答の信頼性、調査結果の処理、解析の方法などをめぐっていくつかの問題点がある。そのうえ、自覚症状と他覚検査結果との関係もしばしば議論のまとなになってきた。しかしディスプレイ問題にとどまらず、今後発生するかもしれない未知の職業上の障害の早期発見と予防法研究のために、自覚症状調査は不可欠

の手段である。自覚症状調査に関する上述の問題点を改善し、精度が高く、信頼性も高い調査データの収集につとめること、およびそれらの調査データの解析と利用の方法を進歩させることが望まれる。

参 考 文 献

- (1) 青島文夫：運動様相による眼球運動の分類(和田陽平，大山正，今井省吾編，感覚知覚ハンドブック，減信書房)(昭44) 675～678
- (2) Gaarder, K. R.: Eye movements, vision and behavior. New York: Wiley 1975
- (3) Yarbus, A. L.: Eye movement and vision. New York: Plenum. 1967
- (4) Riggs, L. A., Ratliff, F., Cornsweet, J. C. & Cornsweet, T. N.: The disappearance of steadily fixated visual test objects. J. of Optical Society of America **43** (1953) (In C. H. Graham ed. Vision and Visual Perception p. 343 New York: Wiley 1965)
- (5) Cornsweet, T. N. & Dwellley, D.: Perfectly stabilized retinal images. J. of Optical Society of America **52** (1962) 598
- (6) Riggs, L. A.: Visual Acuity (in C. H. Graham ed. Vision and Visual Perception (1965) 321～349
- (7) 鳥居修晃：静止網膜像(和田陽平，大山正，今井省吾編，感覚知覚ハンドブック)(昭44) 496～498
- (8) Kuffler, S. W. & Nicholls: From neuron to brain. Massachusetts: Sinauer Associates (1977)
- (9) Kuffler, S. W.: Discharge patterns and functional organization of mammalian retina. J. of Neurophysiology **16** (1953) 37～68
- (10) Hartline, H. K., Wagner, H. G. & Rattiff, F.: Inhibition in the eye of limulus. J. of General Physiology **39** (1956) 651～673
- (11) 佐藤愛子：目に関する自覚症状と他覚検査：ブラウン管ディスプレイの影響(1) 照学誌 **68-7** (昭59) 305～310

(受付1984年3月12日)