

視覚情報量の算定とその応用

小林富士男 富田将英 坪井始 田中始男 美咲隆吉
福山大学 工学部

人間がものを見る際、どのように、どの程度その対象物が見えているかを評価するには、最終的に視覚実験によることが多いが、人間の感覚は主観的で、心理的要素など不確定で複雑な要素も多く、客観的に評価するにはこれらを定量的に表現する必要がある。本研究では、従来あるデータから網膜の出力分布を仮定することで、視対象が網膜上に結像したときの像の濃度分布と、それに対する網膜の感度分布をもとに確定的な視覚情報量を算定する方法を提案している。また、この方法を実際の視標に適用し、それぞれの視標の持つ視覚情報量を計算機シミュレーションによって計算し、その結果について考察を行った。

Calculation of the Amount of Visual Information and its Application

Fujio KOBAYASHI, Masahide TOMITA, Hajime TSUBOI, Motoo TANAKA
and Takayoshi MISAKI

Fukuyama University, 1 Banchi, Sanzou, Gakuen-cho, Fukuyama-shi,
Hiroshima 729-01, Japan

When we gaze the object, how much the amount of visual information is obtained. When the illumination condition and the object are changed, how the amount of visual information is changed. There is a problem how to decide the relation between these quantitatively. In this paper, the theory to calculate the amount of visual information is proposed. Next, it has been applied to the characters concretely. The various effects on the amount of visual information have been calculated by the computer simulation.

1. まえがき

人間がある物を見るとき、どのように、どの程度見えているかを評価するには視覚実験を行うのが一般的である。しかし観測者が得ている情報量の感覚的な表現を、直接数値に変換して工学的にデータとして取り扱うことはできない。視覚情報を論ずる場合の最も重要な要素の1つは人間の視力の問題である。視力に関する研究は多く報告されている。広義の視力には、(1) 光覚閾、(2) 2点分離能力、(3) 形態の認知能力に関する心理的要素などが関係するが、(3) の条件をコントロールすることは困難であるから、これをなるべく一定にしておいて、2点分離能力を測る立場がとられている。その代表的な物としてランドルト環指標がある。2点間分離の思想に基づいた視力を狭義の視力と考えることにするが、その場合にも測定条件によって視力の値が左右される。たとえば、静止視力と動体視力、中心視力と周辺視力の相違、更に測定時の瞳孔の大きさや、照明の条件、視標図形のコントラスト、指標の提示時間、目の順応状態、運動状態など視力に関する要因は極めて多く、視覚実験値の信頼性、再現性を確保すべくこれらすべての条件をコントロールすることは容易ではない。そこで、視覚系の工学的研究の一課題として、人間がある照明条件の下で、ある視対象を注視するとき、目からどれだけの視覚情報量を得ているかを定量的に決定する必要がある。

人間の目の特性については、生理学、心理学、心理物理学、工学などの立場から多数の研究が報告されている。特に、最近の視覚工学、画像工学において対象となる画質や見えの問題を扱った研究も多くなってきているが、最終的には視覚実験による評価に依存しなければならないという点から、工学的に研究するのに困難を伴う。

本研究では、人間がある視標を見るとき、

網膜の中心窩に結像する視標の像の濃度分布を基に、濃度値の差分から直接視覚情報量を算定する方法を提案している。また、この方法を実際の漢字視標に適用して、計算機シミュレーションにより視覚情報量の算定を行った。

2. 視覚情報量

健康な人間の眼は、一度にかなり広い範囲を見ることができるが、明るい場所で本を読んだり、人や物を認識しようとして一点を注視した場合、細かい部分まで認識でき、情報の取得に寄与するのは主に中心視である。中心視で問題となるのは、網膜上で眼球の光学系のほぼ中心線上に位置する中心窩と呼ばれるくぼみの部分である。また、網膜上には無数の視細胞が存在するが、視覚に寄与する視細胞には大きく分けてかん状体と錐状体の2種類がある。かん状体は光の入力に対する感度が高いが、網膜上の中心くぼみ以外の場所に分布しており、中心視に寄与しない。一方、錐状体はあまり感度は優れておらず、暗所ではほとんど機能しないが、中心窩上に著しく集中して分布しており、明所での中心視に寄与している。本研究では明所での中心視についてのみ議論しているので、今後文中で視細胞といった場合は、特別にことわらない限り中心窩における錐状体を意味するものとする。

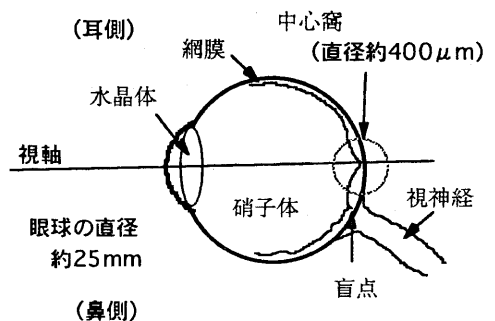


図1. 眼球の断面図 (略図)

2.1 明るさに対する最小視認距離

視覚の最も基本となるのは網膜上に結像した像の照度分布とそれに対する視細胞の応答である。視力は空間的に分離して知覚できる最小の視角 θ の逆数で与えられる。Helmholtzは、近接した2点分離して見分けられること条件として、刺激を受ける2つの視細胞の間に少なくとも1つの刺激を受けていない視細胞が存在することを挙げている。このことから、分離して識別できる最小の視角を θ_c とすると、網膜上での視細胞の有効直径 d は次のように表わすことができる。

$$d = l_i \cdot \theta_c \quad (1)$$

ここで、 l_i は目の結接点から網膜までの距離で、これを約17mmとすると上式は次のように書ける。

$$d = 17 \cdot \theta_c \quad (2)$$

ところで、一般に視標の明るさが変わると画像の細かい部分は見づらくなる。このことから、分離して知覚できる最小の距離は指標の照度によって変化し、視細胞の有効直径 d は視標の明るさによって変化すると考えられる。このような、視力の明るさに対する依存性について、数値的解析に役立つデータとしてはMoon-Spencerのデータがある。これは明るさに対する最小識別角 θ_c を表わしたものであるが、ここで使われている明るさの尺度helios[blondel]はあまり使われておらず、また完全拡散面においては、blondelで表わした値は光束発散度 $M[\text{lm}/\text{m}^2]$ で表わした値と等しくなるので、 M を使うことにすると、次のように表わされる。

$$\theta_c = \frac{118.3 \times 10^{-6}}{M} (0.412 + M^{1/3})^3 \quad (3)$$

この式(3)に式(2)を代入すると、 d は次式のように表わされる。

$$d = \frac{17 \times 118.3 \times 10^{-6}}{M} (0.412 + M^{1/3})^3 \quad (4)$$

図2は式(4)により d と M の関係を示したものである。この図からも視標が暗くなると最小識別距離が大きくなり、視細胞の有効直径が大きくなることから、解像能が落ちることがわかる。

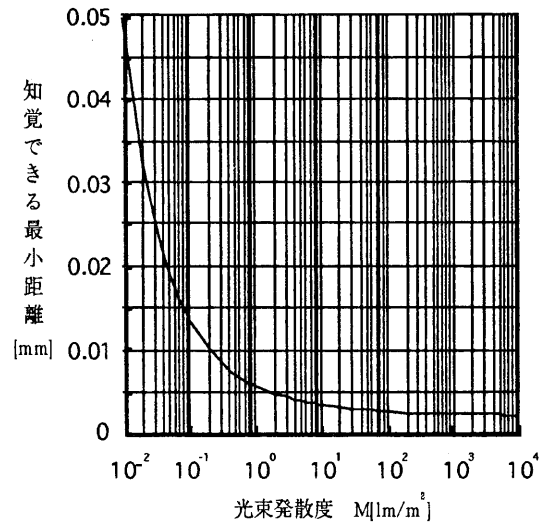


図2. 明るさ M に対する最小識別距離 d

2.2 光学的なぼけと視力

視標面上と網膜上に互いに対応した x - y 座標を設けると、視標面上の画像の濃度分布を $f(x, y)$ と表すことができる。人間の目にはレンズの働きをする水晶体があり、これにより生ずる焦点はずれによる画像のぼけは点広がり関数で表現され、一般にガウス分布になることが多く、次式のように表される。

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \text{EXP}\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

ここで、 σ はガウス関数の標準偏差で、この値が大きくなるほど像のぼけはひどくなる。

$f(x,y)$ に対応した、網膜上に結像した像の濃度分布を $g(x,y)$ とすると、 f と g の関係は次のように表される。

$$g(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x-\xi, y-\eta) \cdot f(\xi, \eta) d\xi d\eta \quad (6)$$

2.3 網膜の感度特性

網膜の受容野における感度分布はDOG関数と呼ばれる、 σ の違う2つのガウス関数の差で表され次式のようにになる。

$$\text{DOG}(x,y) = \frac{K_1}{2\pi\sigma_1^2} \text{EXP}\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_1^2}\right) - \frac{K_2}{2\pi\sigma_2^2} \text{EXP}\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_2^2}\right) \quad (7)$$

ただし、 σ_1 、 σ_2 は興奮性領域と抑制領域の広がりを表す、ガウス分布の標準偏差で、 K_1 、 K_2 はそれぞれの強さを表す係数である。このDOG関数によって網膜上に結像した像の輪郭が強調され、その結果得られる画像 g に対する網膜からの画像の出力の濃度分布 $Z(x,y)$ は次のように表される。

$$Z(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \text{DOG}(x-\xi, y-\eta) \cdot g(\xi, \eta) d\xi d\eta \quad (8)$$

画像は網膜上で2次的に標本化されているので、視細胞が格子状に並んでいると考え、これに離散的な番地記号 (x_i, y_j) をつけると、網膜からの出力画像 Z の濃度分布は $Z(x_i, y_j)$ と表現できる。ある番地 (x_i, y_j) の濃度値 $Z(x_i, y_j)$ とその隣の濃度値 $Z(x_{i+1}, y_j)$ の差は、

$$Z(x_{i+1}, y_j) - Z(x_i, y_j) \quad (9)$$

で表される。

2.4 識別できる明度段階数

人間の眼が識別できる明度の段階数は、視標の明るさにより異なる。光束発散度の差の絶対値から識別し得る明度差段階数への変換を T_M とし、次式で表す。

$$T_M = \frac{M}{0.0123 (0.808 + M^{1/2})^2} \quad (10)$$

図3は視標の明るさに対して人間の眼が識別できる明度段階数を示したグラフである。

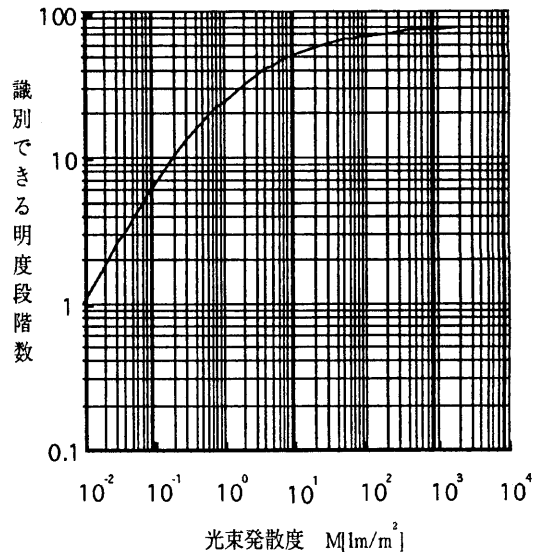


図3. 明るさと明度知覚の関係

2.5 視覚情報量

眼の明度差識別段階数を導入し、網膜の中心くぼみからの出力に対して濃度の差分値の自乗和の平方根をとり、これを H とすると次の(11)式のように書ける。

$$H = \left[\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} \left\{ T_M \left[\left| Z(x_{i+1}, y_j) - Z(x_i, y_j) \right| \right] \right\}^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} \left\{ T_M \left[\left| Z(x_i, y_{j+1}) - Z(x_i, y_j) \right| \right] \right\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

この式のH を網膜の出力から得られる、画像の視覚情報量とする。ここで、n は出力画像の濃度値の最大番地である。

3. 計算機シミュレーション

上述の算定方法を実際に視標に適用し、計算機シミュレーションにより視覚情報量を算定した。以下のような手順によってシミュレーションを行った。

3.1 観測条件と視標画像の入力

シミュレーションを行うため、実際に人間が本を読んでいるような場合を想定して様々な観測条件を設定する。まず視標であるが、今回は国内の出版物に多く用いられている8ポイントの明朝体から、画数の異なる数種の漢字を採用した。8ポイントの漢字の高さは約2.8mmである。これらの視標を観測する距離は250mmとし、本を読むのに十分な明るさとして1000 lm/m²を視標の明るさとした。ここで目の結節点から網膜までの距離を17mmとすると、網膜上に結像した漢字の高さは約0.1904mmとなる。さらに式(4)より、明るさ1000 lm/m²の場合の視細胞の有効直径が約2.26μmとなることから、網膜上での視標の高さは視細胞約84個分に相当することがわかる。このことから、白紙に印刷された各漢字をイメージスキャナより白黒、256階調で入力した後、視標の高さが84

画素に相当するように画像の拡大、または縮小を行った。なお、様々な処理の段階で画像の端の部分は僅かずつではあるが切り捨てられてゆくことを考慮して、視標がなるべく画像の中心に位置するように注意しながら入力を行った。

3.2 光学的ぼけの再現

網膜に結像する画像は観測者の視力によってぼけ具合が変化するので、視力に対応した画像の光学的ぼけを、式(5)により再現した。式中のσの値を変化させて、想定した観測者の視力に対応したガウス分布を求め、その数値を配列に記憶しておき、これを入力画像に処理することで、ぼけ画像を得た。

3.3 網膜の応答特性

網膜の感度分布を式(7)で表す。σ₁は興奮領域、σ₂は抑制領域の広がりであるが、人間の網膜の場合、これらの比率は1:1.6となる。このDOG関数の値を計算して配列に記憶しておき、前項までに得られた画像にこの値を処理して得られる画像を、網膜上で得られる像の濃度値とした。

3.4 濃度段階数の変換

ある明るさに対して人間の網膜が識別できる濃度段階数は、式(10)より得られる。このシミュレーションでは視標の明るさを1000 lm/m²としているので、識別できる濃度段階は77段階である。前項までの処理で得られた画像は初めは256階調で入力されているが、様々な処理を施される過程で有効な濃度範囲は変化しているため、これを77階調に変換した。

3.5 計算範囲

3.1でも述べたように、この観測条件の下では視細胞の有効直径は約2.26μmである。

また、網膜の中心くぼみの直径は約400 μm であるので、これは視細胞約177個分の高さに相当する。これまでに得られた画像において中心視に関係のある部分についてのみ論ずるという目的から、視覚情報量を算定する際、計算の対象とする範囲を視標画像を中心とする177 \times 177画素の正方形内に限定した。本来ならばこの限定範囲の形状も網膜の中心くぼみの形状に合わせ、直径177画素の円形であるべきだが、画像の余白部分はほとんど情報量を持っておらず、視標が範囲からはみ出していない限りこれらの範囲の形状の違いが視覚情報量に及ぼす影響は少ないと判断したので、計算の簡便性をとって正方形を採用した。

3.6 視覚情報量の算定

以上のようにして得られた画像から、式(11)に従い、その濃度値の差分の自乗和の平方根を求め、視覚情報量を算定した。

4. 結果と考察

図4は実際の漢字に視覚情報量Hの式を適用した計算結果のグラフである。この図からもわかるように、観測者の視力が低下するとそれともなって視覚情報量も減少し、視力が上がると視覚情報量も増加している。これは焦点はずれにより像の濃度分布が拡散され、濃度値は全体的に小さくなりその差分値も小さくなるからである。また、漢字の字画数が増えたり、形が複雑になるにつれ視覚情報量は増加する傾向にある。このことは視覚情報量Hが画像の濃度地の差分を基にしており、濃度変化が大きい部分、即ち像の輪郭線が長いほど情報量が大きくなるからである。このように、計算機シミュレーションにより得られた結果は、感覚的にも妥当なものと思われ、視覚の経験則とも一致している。

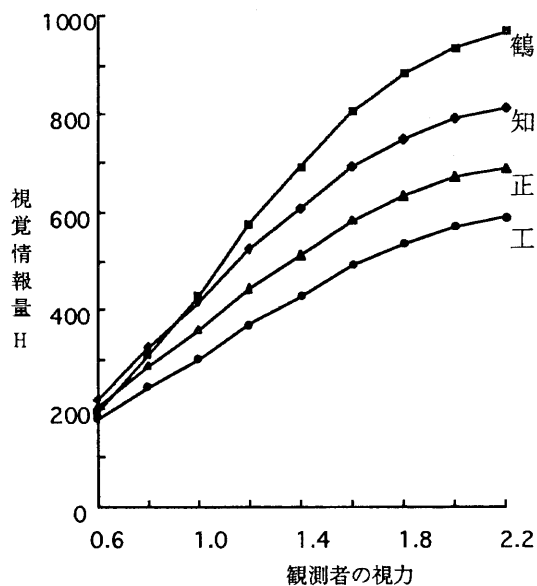


図4. 視力と視覚情報量

5. むすび

人間の目の網膜の明るさに対する明度差識別特性を模した、網膜の中心くぼみの電子モデルを仮定し、網膜上での像の濃度分布と受容野の感度分布から、網膜上に結像した像の濃度値の差分に重点をおいた確定的視覚情報量を算定する方法を提案した。その算定方法を実際に8ポイントの明朝体の漢字視標に適用し、計算機シミュレーションによりそれぞれの視標に対する視覚情報量を求めた。この視覚情報量Hは確率論的な情報量ではなく、視対象と観測条件が定めれば一意的に定まり、計算により確定的に求めることができる。また、この視覚情報量は、視覚の経験則とも一致しているので、視覚の問題に関する評価や、設計問題等の応用などに役立つものと思われる。本論文では、視標として白黒画像のみを採用しているが、今後はカラー画像への対応、視標の複数化などの拡張をしていくべきであると考えている。