可読性に影響を与える空間要因に関する実験研究

正会員 舟川 政 美 (日産自動車株式会社)

Psychophysical Studies on Legibility and the Crowding Effect

Member Masami Funakawa (Nissan Motor Co. Ltd.)

ABSTRACT

Recognizing letters embedded in other letters is difficult. Framing (boxing) a symbol is thought to make it more conspicuous or easier to distinguish from the background. However, the frame may actually affect the legibility of the symbol adversely. This study evaluates the effects of spatial arrangement and framing on display legibility. One general characteristic of vision is that surrounding objects affect the perception of a central object. This is known as the crowding effect and is a type of spatial-frequency masking effect.

We measured the minimum visual acuity required to distinguish crowded symbols by using the low-pass filtering method and the multi-frame detection task. The results showed that a framed symbol is less legible than an isolated symbol, and that the crowding effect is a function of distance between the symbol and a mask, and of contrast of the mask. The spatial spread of the effect was evaluated quantitatively.

KEYWORDS : legibility, visibility, visual acuity, low-pass filtering, letter

1. 緒言

社会の高齢化・情報機器の高機能化を背景として、情報表示の見やすさ・わかりやすさの向上が、社会的要請となっている。情報表示系の可読性向上のため、表示を構成する文字やアイコン等の要素に関して、コントラスト、大きさ等の最適化が試みられている。本研究では、表示のレイアウトが各表示要素の可読性に与える影響について検討した。具体的には、表示枠の有無(実験1)、表示枠のサイズと強度(実験2)、表示項目間の距離(実験3)が可読性に与える影響を、ローパス・フィルタリング法により定量評価した。また、“crowding”と呼ばれるマスキング現象(典型的には3文字からなる文字列(trigram)の中央文字の認識精度が、文字間距離によって変化したり、単独提示の場合に比べ低下する現象)との関連について議論した。

ローパス・フィルタリング法¹⁾は、形状の読み取りに必要な最も低い空間周波数帯域を測定することによって、形状の可読性を評価するものである。測定された帯域が低いほど、視覚機能の低下や観察条件の劣化に帰因する視力低下の影響を受けにくいという意味で、可読性が高いと考えられる。本研究では、文字や枠線などの表示要素間の空間的配置が、可読性に与える効果を測定するために、本手法を応用した。視覚系は一般に、観察条件や視覚作業の性質によって、最も都合がよい帯域を利用して形状を読み取ると考えられる。文字形状が同じであっても、表示要素間の空間的配置によって利用可能な帯域は変化すると予想できる。

2. 実験1：表示枠の効果に関する実験

2.1 目的

複数の表示項目の中において特定の項目の誘目性を高めたり、背景から図として分離(分節化)するため、表示枠、あるいは、表示窓と輝度反転を組み合わせた表示が、自動車や家電製品等に散見される(図1参照)。特定の数値や文字に枠を設けることが、枠のない他の表示の中で、誘目性を高めたり分節化を促す効果があることは、一つの経験則である。如何なる要因が誘目性や分節

図1 表示枠、表示窓を用いた表示例
Fig. 1 Samples of displays using frames or windows.

化を規定するのは本研究の趣旨ではないが、色度や輝度、大きさや形状、時間的変化など、視覚情報処理過程に則したできるだけ多くの次元で、周囲と異なっていることが重要である。周囲との違いが見える必要がある。従って、表示の誘目性や分節化は、視覚系の空間解像度、即ち、視力に基礎を置く可読性とは独立した別個の概念であり、基本的に可読性に対立するものではない。しかし、ある対象の知覚が周囲にある対象の影響を受けることは、視覚の一般的特性である。読み取らなければならない記号に隣接して表示枠等の輪郭線が存在することは、表示の可読性に負の影響を与えると予想される。ローパス・フィルタリング法によって、表示枠が表示の可読性に与える効果を測定した。

2.2 方法

被験者

正常視力を有する2名（MF：男性38才，矯正視力1.0，MT：女性28才，矯正視力1.2）

装置

実験装置の構成を図2に示す。刺激文字は、コンピュータ（NEC PC9801）に接続したカラー・ディスプレイ（Victor CM-9G72-PA01）に呈示された。観察者は、ガラス製ローパス・フィルタを通してディスプレイ画面を見た。上記コンピュータによって制御される直線動作型5相ステッピング・モータ上にマウントされたフィルタと画面と間の距離を変化させることによって、表示に対するローパス・フィルタリングのカットオフ周波数をリアルタイムに制御した。観察者の反応は、I/O モジュールを介して反応キーから上記コンピュータへ入力された。（装置の詳細については前報を参照のこと）

刺激

図3に示した自動車の警告用アイコン16種を使用した。アイコンのサイズは、視角で幅0.51—0.75度、高さ0.35—0.76度であり、アイコンの種類によって異なる。枠のサイズは、常に0.82(W)×0.96(H)度であった。刺激条件は、輝度極性として暗背景明文字と明背景暗文字の2条件、枠の有無2条件の組合せで4条件であった。全ての条件で背景とアイコンのコントラストは0.6であった（Michaelson contrast $C = (L_{max} - L_{min}) / (L_{max} + L_{min})$ ， L_{max} ：最大輝度， L_{min} ：最小輝度，最小輝度13.8cd/m²，最大輝度53.7cd/m²）。枠あり・暗背景明文字の場合、枠外の輝度は3.5cd/m²で、枠内と枠外のコントラストは、0.6であった。枠あり・明背景暗文字の場合、枠外の輝度は、アイコンの輝度と等しく13.8cd/m²で、

枠内外のコントラストは同様に0.6であった。

手続き

被験者は、暗室内で、観察距離114cmから、ローパス・フィルタ越しに、ディスプレイ中央の凝視点を見た。被験者の眼は、顎台により固定され、両眼視、自然瞳孔で観察した。

4種の刺激条件毎に可読性評価実験が行われ、各実験では16種のアイコン毎の可読性が測定された。検出すべきターゲット・アイコンが測定の最初に一度だけ呈示され、各試行では、ビープ音の後、ランダムに選択された8個のアイコンがディスプレイに継続的に、1アイコン当たり200msの速さで呈示された（Inter-stimulus interval=0）。アイコンの向きは、常に正立で、位置は、凝視点を中心に1.65(W)×1.93(H)度の矩形領域内でランダムに変化した。被験者は、呈示されたアイコン系列の中にターゲットがあったか否かを判断し（強制選択）、手元の2つの反応キーのどちらかを押した。ターゲット・アイコンが呈示される確率は1/2であった。正答が2度連続した場合、次試行におけるカットオフ周波数は低下し（観察されるほかのの大きさは大きくなり）、誤答の場合は、逆に、カットオフ周波数は上昇した。この手続きを繰り返し（上下法）、正誤の反応の変換点における複数のデータの幾何平均から、正答率約70%に相当する閾値が決定された。

2.3 結果

各アイコン毎に刺激画面とローパス・フィルタ間の距離が測定され、ローパス・フィルタのMTFからコントラストの伝達率1/eを基準にカットオフ周波数が計算され、さらに、視力に換算された（視力 $V = f/30$ ， f ：カットオフ周波数 cycles/degree）。この視力が低いほど、可読性は高い。

結果を図3に示す。枠なしの2条件の結果をみると、形状が単純なアイコンの可読性が高くなっているが（例えば、ハザード、左から7番目）、同時に、他のアイコンとの形状の類似性が低いアイコン（例えば、エンジンオイル左から5番目、温度計右端）の可読性も高い。ローパス・フィルタリング法は形状を特徴付けている空間周波数帯域を測定するが、形状の複雑さなど、その形状自体の性質ばかりではなく、相互に弁別される必要がある他の記号との形状の類似性など、記号セットの性質もまたその帯域を規定しているためと考えられる。なお、記号セット内での類似性が誘目性にも影響を与えることは、多くの視覚探索実験で見いだされている。

表示枠の存在は、予測通り、アイコンの可読性を低下させた。表示枠によって、警告アイコンの点灯に即座に気付くことができるが、そのアイコンの種類が同定できない（同定し難い）という事態が起こり得ることを示唆している。輝度極性の効果は認められなかった。

3. 実験2：表示枠の大きさとコントラストの効果に関する実験

3.1 目的

実験1の結果が示す通り、表示枠は枠内の記号の可読性を低下させる。これは、ボタンによる空間的、あるいは、同時マスキングであり、その効果は、記号と枠との距離（空間的配置）、及び、枠の見え易さ、即ち、枠内外のコントラスト（マスク刺激の強度）の関数であると予想できる。本実験では、枠の高さを変えて可読性の測定実験をすることによって、マスキング効果と距離との関係を調べ、同時に、可読性の低下を招かない表示枠の大きさについて検討した。また、枠の内と外とのコントラストを変えること

図2 ローパス・フィルタリング法による可読性評価装置図
Fig. 2 Apparatus for estimating legibility of letters by the lowpass filtering method.

図3 実験1の結果。表示枠が可読性に与える効果
Fig. 3 Effects of frames on legibility of warning icons.

によって、マスク刺激である枠の強度を制御し、枠内の記号の可読性に与えるマスク刺激のコントラストの効果を測定した。

3.2 方法

被験者

正常視力を有する2名(MF:男性42才, 矯正視力1.0, MT:女性32才, 矯正視力1.2)

装置

実験1と同一の装置を使用した。

刺激

セグメント型の数字書体(0-8)を使用した(図4参照)。文字サイズは、視角 $0.35(W) \times 0.66(H)$ 度であった。

「表示枠サイズの効果測定条件」 枠の高さは5段階(文字高の1.04, 1.15, 1.51, 2.0, 3.0倍, 視角 $0.68, 0.76, 1.00, 1.33, 1.99$ 度)に変化し、枠の幅は、常に一定(文字幅の4.74倍, 視角 1.65 度)であった。数字と枠内背景とのコントラストは 0.35 で、暗背景明文字と明背景暗文字の場合があった(最高輝度 52.21cd/m^2 , 最低輝度 25.12cd/m^2)。枠外の輝度は、常に暗黒(輝度 0.172cd/m^2)であった。

「表示枠コントラストの効果測定条件」 枠の大きさは、一定で $0.57(W) \times 0.68(H)$ 度であった。数字と枠内背景とのコントラストは 0.33 で、枠内背景の輝度は 14.7cd/m^2 , 文字の輝度は、暗背景明文字の場合 29.1cd/m^2 , 明背景暗文字の場合 7.4cd/m^2 であった。枠外背景の輝度は、 $3.7-58.6\text{cd/m}^2$ の範囲で変化し、その結

図4 実験2の結果。表示枠の高さが可読性に与える効果
Fig. 4 Effects of frame-height on legibility of numerals.

果、枠の内外のコントラストが $-0.6-+0.6$ の範囲で13段階で変化した(負のコントラストは明るい表示窓, 正のコントラストは暗い表示窓を意味する)。

手続き

手続き及び被験者の行う課題は、実験1とほぼ同じであった。「表示枠サイズの効果測定」 呈示速度は 100ms/LETTER 。枠の高さ及び輝度極性条件毎に可読性評価実験が行われ、各実験で0-8の数字について測定が行われた。数字は常に正立で、表示枠の中央、水平方向 1.17 度の範囲で呈示位置がランダムに変化した。「表示枠コントラスト効果測定」 呈示速度は 140ms/LETTER 。数字の向きは、 $0, 90, 180, 270$ 度の4通りからランダムに選択され、表示窓と数字が呈示される位置も、凝視点を中心に水平方向 1.65 度の領域内でランダムに変化した。試行毎にターゲット文

字がランダムに選択・呈示され、コントラスト13条件毎に可読性を測定した。得られた可読性測定値は、0-8の各数字の平均的な値となる。

3.3 結果

表示枠サイズの効果測定実験では、輝度極性2条件の効果が認められなかったため、両条件の平均値を表示枠サイズ条件毎に図4に示す。また、0-8の可読性測定値を文字高に対する枠と文字との距離の関数としてプロットし、回帰直線を当てはめたものを図5に示す。結果は、枠高が高くなるほど、可読性が上昇することを示した。

表示枠コントラストの効果測定実験の結果を、回帰直線と併せて図6に示す。結果は、マスク刺激である表示枠のコントラストの絶対値が増加するほど、枠内の数字の可読性が低下することを示した。また、枠外背景が枠内背景より明るい方が暗い時よりも、可読性を低下させる割合が大きい。言い換えれば、周囲より暗い表示窓に表示される文字の方が周囲より明るい表示窓に表示される文字より読みにくい。さらに、結果は、暗背景明文字の方が明背景暗文字より、一般的に可読性が高いことを示した。

両条件の結果は、表示枠が記号の可読性に与える効果が、距離とコントラストの関数であることを示した。視覚パターンは複数の空間周波数チャネルによって符号化されると考えられるが、表示枠の近接性及び表示枠の強度が、文字認識を媒介するチャネルにおけるS/N比に影響を与えると推測できる。

周囲より暗い表示窓より明るい表示窓に呈示された方が可読性が高いことは、いかに説明されるのだろうか。本実験では、コントラスト条件毎に枠外背景の輝度が異なり、明暗順応状態も異なっていると予想できる。しかし、明暗順応とそれに伴う空間分解能の変化²⁾からの予測(順応輝度が高い方が視覚の空間分解能は高い)とは一致しない。明暗順応レベルの高低よりも、順応レベルと視感度のダイナミック・レンジの位置関係の問題であろう。一般に、視感度のダイナミック・レンジは、順応レベルを中心に対称的にあるのではなく、順応レベルより高い範囲により大きな応答範囲を割り当てている。順応レベルより暗い表示窓に呈示さ

図5 実験2の結果
Fig. 5 Results of Exp.2 replotted as a function of space/letter-height.

図6 実験2の結果。表示枠のコントラストが可読性に与える効果
Fig. 6 Effects of frame contrast on legibility.

れた記号の可読性が低いのは、応答範囲が狭いためと推測できる。

4. 実験3：表示項目間の距離の効果に関する実験

4.1 目的

実験2において、表示枠が枠内の記号の可読性に与える効果は、視覚マスクングであることを示したが、視覚マスクングは、表示枠に限らず表示項目間でも生じる。本実験では、複数の文字を呈示し、文字間距離を制御しながら文字の可読性を測定することによって、実験2の表示枠サイズと同様の効果を確認した。

4.2 方法

被験者

正常視力を有する2名(MF：男性38才、矯正視力1.0、MT：女性28才、矯正視力1.0)

装置

実験1と同一の装置を使用した。

刺激

図7に示した大文字の英字書体(A-Z)を使用した。文字サイズ

図7 実験3の結果。表示項目間距離が可読性に与える効果
Fig.7 Effects of spacing on legibility.

は、高さ0.48度、幅は0.08度('I')から0.58度('W')まで文字種により変化した。常に暗背景明文字で呈示した。背景輝度は、0.17 cd/m²、文字の輝度は、52.2cd/m²で、コントラスト0.99であった。手続き

手続き及び被験者の行う課題は、実験1とはほぼ同じであった。ただし、3文字ずつ横並びで呈示され、被験者は、ターゲット文字が3文字列の中央に呈示されたか否かを判断した。3文字はランダムに選択され、1試行に同じ英字が複数呈示されることはなく、また、ターゲット文字が呈示される時は、常に中央であった。呈示位置は、凝視点を中心に水平方向1.65度の領域内でランダムに変化した。呈示速度は100ms/LETTER。3文字の間隔は、0、0.05、0.15、0.46度の4条件であった。実験は、文字間隔条件毎に行われ、各英字毎の可読性が測定された。

4.3 結果

各英文字毎の測定結果を文字間隔4条件毎に図7に示す。文字の組み合わせが、中央文字の可読性に影響を与えると予想できるが、各可読性評価値は200回以上の試行に基づいており、この効果は相殺されると考えられる。文字間隔が最大の条件で、大文字英字26文字の可読性を比較すると、平均して、“CAUM”の可読性が高く、“FEPHNB”の可読性が低い。しかし、結果は、可読性の良し悪しが文字間隔条件によって大きく変化することを示しており、一般的に特定の文字が他より可読性が高いと述べるのは難しい。また、本実験は、英文の読書における文字間隔の効果に関するものではない。表示項目間の距離の問題と解釈すべきである。

図8に、文字幅に対する文字間隔の割合の関数として可読性測定結果を示す。文字間隔が増加するほど、可読性が高くなった。実験2における表示枠サイズの効果測定の結果と、基本的に同じ傾向が認められた。

5. 考察

実験3の様な状況、3文字からなる文字列(trigram)の中央文字の認識精度が、文字間距離によって変化したり、単独呈示の場合に比べ低下することは、“crowding”と呼ばれるマスキング現象

図8 実験3の結果
Fig.8 Results of Exp.3 replotted as a function of space/letter-width.

である。ここに報告した3つの実験は、crowdingが起こるためには、隣接するマスク刺激が文字である必要はなく、輪郭線で十分であること、crowdingの効果は、記号とマスク刺激との距離、マスク刺激のコントラストによって変化することを示した。また、crowdingは、アイコンでも英数字でも、形状を読み取らなければならない条件で共通に生じることを示した。

視覚パターンは複数の空間周波数チャネルによって符号化されると考えられ、crowdingも空間周波数マスキングの一種である³⁾。ホワイト・ノイズのマスク刺激を文字パターンに重ね合わせて得られる一般的なマスク効果とは、重ね合わせの必要がない点で異なっている。即ち、crowding効果は空間的に伝播するものであり、マスク効果に空間周波数選択性が期待できる³⁴⁾。crowdingは隣接する輪郭線によって生じる効果であり、基本的には、記号の読み取りに必要な空間周波数帯域とマスク刺激を構成する空間周波数とが類似しているために生じる効果である。文字形状を特徴付けている空間周波数帯域(最低視認力)を測定した本研究に則して云えば、crowdingは、輪郭線が近接することによって、読み取りに必要な空間周波数帯域(読み取りに必要な視力)が上昇する効果である。

3文字のひらがな文字列の中央文字の読み取り速度を測定し、crowdingを検討した研究で、文字間隔の増大によって、臨界文字サイズ(文字を大きくしてもこれ以上読み取り速度が向上しない限界文字サイズ)が小さくなることが報告されている⁵⁾。crowdingが起こるのは、文字が臨界文字サイズ以下の時で、言い換えると、crowdingが臨界文字サイズを決める要因の1つとなっている。文字サイズと呈示時間を制御して臨界文字サイズを測定することは、見方を変えれば、読み取り時間が最も短くて済む空間周波数帯域を測定していると解釈できる(文字サイズ拡大によって、読み取りに利用されている空間周波数帯域を、読み取り時間が最も短くて済む帯域まで移動させている)。そして、臨界文字サイズが小さいことは、大きい場合に比べ、読み取りに利用している空間周波数帯域を文字サイズ当たりに換算した時(あるいは、同じ文字サイズで比較した時)、逆に低いこととなり、従って、可読性が

高いことを意味する。即ち、視覚系において時間分解能と空間分解能は trade-off の関係にあるから、文字の読み取り時間が最も短くて済む空間周波数帯域を測定することは、本実験で行った読み取りが可能な最も低い帯域を測定することと高い相関があると考えられる。周辺視より中心視で臨界文字サイズが小さくなる⁶⁾、書体によって臨界文字サイズが異なる⁷⁾という報告は、臨界文字サイズが、読み取りが可能な最も低い空間周波数帯域を反映するものであり、可読性評価の指標となることを示唆している。

本実験、及び、crowding に関する以上の議論の結果、crowding による可読性低下を回避するための方策として、(1)隣接する輪郭線を記号からできるだけ遠ざけること、(2)マスク刺激のパワーを最小化すること、(3)記号の読み取りに必要な空間周波数帯域とマスク刺激を構成する空間周波数帯域の重なりを最小にすること、が考えられる。誘目性を高めるための表示枠などでは、方策(2)は誘目性が損なわれるため意味がない。実験2の結果は、コントラスト0.1でも crowding が起こることを示している。方策(1)に関して言えば、マスク刺激と記号との適正な距離は、文字の読み取りに関わる空間周波数帯域によって決まることから、文字種や書体、網膜部位によって変化すると考えられる。実験2、3の結果から言えば、中心視で英数字の場合、crowding を回避するために必要なマスク刺激との間隔は文字サイズの1/2以上である。方策(3)は、crowding は記号の読み取りに必要な空間周波数帯域とマスク刺激を構成する空間周波数とが類似しているために生じる効果である、という認識から導出される。周波数領域の重なりを空間的なデザインで解決しなければならず、解を得るのは簡単ではないが、デザイン手法として新奇な表現をもたらす可能性がある。

文字や記号の読み取りに利用可能な情報は、空間周波数の広い帯域にわたって存在していると考えられ、実際に読み取りに利用される帯域は、観察条件や視覚系の状態、視覚作業の性質によって、常に変動していると予想できる。読み取りに利用される帯域としては、S/N 比が高いところ、読み取り速度が高いところ、空間周波数が低いところなどが、候補として考えられる。読み取りに利用される帯域がいかにか決まるのか、今後の大きな研究課題であるが、crowding がその規定要因の1つであることを、本研究は示している。

6. むすび

特定の表示項目の誘目性を高めたり、背景から表示を分節化する工夫である表示枠が、枠内の記号の可読性を低下させるという問題を指摘し、それが crowding と呼ばれる空間周波数マスキングの現象であることを述べた。crowding は、隣接するマスク刺激が文字でなくとも、輪郭線だけで起こること、crowding の効果は、記号とマスク刺激との距離、マスク刺激のコントラストによって変化することを示した。そして、crowding による可読性低下

を回避するための方策を提案した。

参 考 文 献

- (1) 舟川, 小田: ローパス・フィルタリング法による形状の視認性評価, 照学誌, 81, pp.438-445 (1997).
- (2) A. von Meeteren and J. J. Vos: Resolution and contrast sensitivity at low luminance, Vision Res., 12, pp.825-833 (1972).
- (3) S. T. L. Chung and D. M. Levi: Crowding: a tale of spatial-frequency masking, IOVS Abstract Book, 40, p. S972 (#5120) (1999).
- (4) M. Palomares, M. C. LaPutt and D. Pelli: Crowding is unlike ordinary masking, IOVS Abstract Book, 40, p. S351 (#1864) (1999).
- (5) H. Kawashima and K. Oda: Crowding effect on letter recognition in central and peripheral vision, IOVS Abstract Book, 40, p.34 (#178) (1999).
- (6) S. T. L. Chung, J. S. Mansfield and G. E. Legge: Psychophysics of reading. XVIII: The Effect of print size on reading speed in normal peripheral vision, Vision Res., 38, pp.2949-2962 (1998).
- (7) J. S. Mansfield, G. E. Legge and M. C. Bane: Psychophysics of reading. XV: Font effects in normal and low vision, Investigative Ophthalmology & Visual Science, 37, pp.1492-1501 (1996).

(受付日1999年11月19日/採録日2000年7月6日)

舟川 政美 (正会員)

日産自動車株式会社総合研究所車両交通研究所

1956年4月生まれ。1981年千葉大学人文学部人文学科卒業。1988年北海道大学大学院文学研究科博士後期課程単位取得退学。同年北星学園大学文学部助手。1990年日産自動車株式会社中央研究所基礎研究所入社。視認性・視界研究等に従事。現在(財)人間生活工学研究センター(〒305-0046 つくば市東1-1 生命工学工業技術研究所内)へ出向。産業技術基盤研究開発プロジェクト「人間行動適合型生活環境創出システム技術」に従事。放送大学非常勤講師。文学博士。日本視覚学会、日本心理学会、基礎心理学会、ARVO、日本色彩学会会員。