

直線図形の認知モデルと自動車用グラフィック・システムへの応用†

岩 田 洋 夫††

本論文では、画像メディアの画面設計を行う際のユーザ・モデルとして、人間の視覚情報処理の特性を定量的に表現する認知モデルの構築を行っている。本研究で提案する認知モデルは、ディスプレイ画面の情報量と、人間の視覚情報処理システムがその解釈を完了するまでに要する時間との関係を表すものである。ディスプレイ画面の情報量は、表示された図形パターンを線索に分解し、その総和を求めることによって表される。画面の情報量と認知所要時間の関係は指数分布に従うと仮定している。このモデルの応用として自動車用のナビゲーション・システムに用いられるグラフィック・ディスプレイをとり上げている。そして、地図画面の最適表示時間を認知モデルによって決定している。

1. はじめに

グラフィック・ディスプレイは人間と計算機の間における情報伝達手段として重要な役割を果たしている。そして、ディスプレイの解像度といったハードウェア面においては、著しい性能向上が見られるようになった。しかしながら、何をどのように表示すれば人間に効率良く情報が伝わるかといった、ソフトウェア面における問題に対する解答はいまだに定まっていないのが現状である。

現在、計算機のユーザ・インタフェースを設計する際に、ユーザをひとつの情報処理システムとしてとらえ、マン・マシン・インタフェースのシステムデザインに役立つような実用的なモデルを構築しようとする試みが行われるようになった。そして、この方法の中で使われる、ユーザの情報処理の仕組みを表現するための実用的なモデルのことをユーザ・モデルと呼ばれるようになった。

本研究では、ディスプレイ画面を設計する際のユーザ・モデルとして、人間の視覚情報処理の特性を定量的に表現する認知モデルの構築を行っている。そして、そのモデルの応用として自動車用のナビゲーション・システムに用いられるグラフィック・ディスプレイをとり上げている。

2. 画像メディアの認知モデル

2.1 ディスプレイ画面の持つ情報量

情報量の定量化はシャノンの情報理論によるものが

† An Application of Cognitive Model of Rectilinear Figure to Graphic System of Automobile by HIROO IWATA (Institute of Engineering Mechanics, The University of Tsukuba).

†† 筑波大学構造工学会

最も著名であるが、人間から見たディスプレイ画面の持つ情報量は、シャノンの情報理論のように生起確率だけで評価するのは不十分である。本研究では、ディスプレイ画面の情報量の評価を、人間の視覚情報処理のメカニズムに従って行っている。

人間の視覚情報処理システムは、知覚システムと認知システムの二つのサブシステムを有する。知覚システムは、目から入力された情報を、いったん目のバッファメモリであるビジュアル・インフォメーション・ストアに格納し、特徴を抽出する。この知覚システムを構成する大脳の視覚中枢細胞は、一般に長方形の受容野を持ち、この受容野に適合する図形刺激に視覚中枢細胞は強く反応し、適合しないものにはほとんど反応しない。このような性質は反応選択性とよばれ、網膜の神経節細胞が現れたすべての図形刺激に反応するのは対照的である。視覚中枢細胞はその反応選択性によって、次の三つの型に分類される¹⁾。

(1) 単純型細胞：中心部にスリット状の受容野を持ち、図形刺激の輪郭の微細な構造に反応する。

(2) 複雑型細胞：単純型細胞よりも大きな受容野を持ち、図形刺激のおおまかな構造に反応する。

(3) 超複雑型細胞：スリットの長さに対する反応選択性を持ち、図形刺激の角の部分に反応する。

これらの細胞は、興奮性入力との相互作用という観点において単純型—複雑型—超複雑型という階層を有することが明らかになっている。したがって、図形の角の部分が、画面の情報量を評価する場合の手掛かりになると予想される。本研究では、図形の角においてパターンを線索に分解して情報量の評価を行っている。

認識システムは、バッファメモリを通じて変換された情報を受け取り短期記憶に格納する。そして、すで

に長期記憶に保存されている情報と参照しながら受け取った情報を解析し、意味の解釈を行う。本研究で提案する認知モデルは、短時間にディスプレイ画面を判読する状況を想定しているため、主として短期記憶における情報処理を対象としている。

認知システムが画面の意味を解釈する場合、図形パターンを持つすべての線素を分析するとは限らない。心理学の実験で行われるような、提示された図形が何に見えるかといった設問に対しては図形のすべての線素を解析する必要があるが、実用的なグラフィック・ディスプレイでは、提示される図形は利用者にとって既知の場合が多い。そのような状況では、図形パターンを持つ線素の一部を解析すれば判読が可能である。本研究ではそのような線素を実質線素と呼び、実質線素の総和をもって画面の情報量と定義する。ビデオテキスト等のように、あらかじめ表示する内容が決定されている画像メディアに関しては、画面設計時に実質線素の数を決定することが可能である。図形パターンから実質線素を抽出する方法については後述の実例にそって説明を行う。

2.2 画面の情報量と認知所要時間

本研究で提案する認知モデルは、ディスプレイ画面の情報量と、視覚情報処理システムがその解釈を完了するまでに要する時間との関係を表すものである。従来の認知心理学における研究では、主としてタキスト・スコープを用いて、知覚システムにおける認識処理時間を測定してきた。知覚システムにおける処理はアイコンック貯蔵と呼ばれ、その時間は数百ミリ秒というオーダーである。それに対して、ディスプレイ画面の判読という作業を認知システムが行う場合、数秒という時間を要するのが通常である。

知覚システムが視覚情報から線素の抽出を行う過程は2次元的な並列処理であるのに対し、認知システムが実質線素の意味の解析を行う過程はシーケンシャルに行われると考えられる²⁾。したがって、認知システムの解析所要時間は、工程管理のシステム・モデルからのアナロジーより指数分布に従うと仮定する。この場合、ロットの到着率に相当するパラメータを、 μ/c とおく。 μ は人間の特性を表す定数であり、実験的に決定される。そして、 c は画面の情報量である。以上の仮定より、画面の情報量が c である時にそれが t 時間以内で正しく解釈される確率は

$$f(t) = 1 - \exp(-\mu t/c) \quad (1)$$

となる (図 1)。

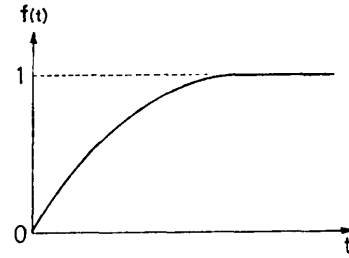


図 1 認知所要時間の確率分布
Fig. 1 Cumulative distribution function of recognition time.

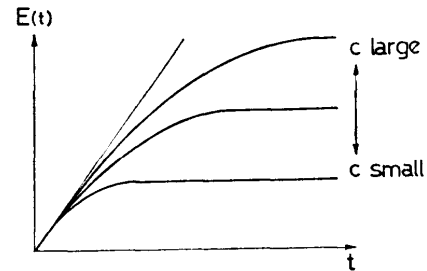


図 2 認識される情報量の期待値
Fig. 2 Expected value of recognized amount of information.

(1)式より、情報量 c の画面が t 秒間ディスプレイされた時に正しく認識される情報量の期待値は

$$E(t) = cf(t) = c(1 - \exp(-\mu t/c)) \quad (2)$$

となり、(2)式から、ある表示時間内にユーザが処理できる情報量を推測することができる (図 2)。

3. 認知モデルを用いた最適表示量の決定

本研究では、画像メディアの実践的な応用例として自動車用ナビゲーション・システムのグラフィック・ディスプレイを想定している。この場合、実用上運転者は走行中にディスプレイを見ることになるが、安全面を考慮すると運転者がグラフィック画面を注視できる時間は限られている (長くても 2 秒)。したがって、表示画面は短時間に効率的な情報伝達を行えるよう設計されなければならない。

本研究では、単位時間に伝達される情報量が最大になるような最適表示量の決定を以下の方法によって行っている。

まず、運転者の注視点の時間的移動を以下の方法によりシミュレートする。運転者の行う仕事は、運転と画面の判読の二つであるから、並列処理されるべきタスク 0 を運転、タスク 1 を画面の判読とする。運転者

が画面を注視するのは、事実上運転に余裕のある時に限られるため、注視点の位置は通常タスク0にあり、時折タスク1に到達する(図3)。時間軸上においてタスク1にある注視時間の幅を τ (sec), 注視頻度を到着率 λ のポアソン到着とする(図4)。

ディスプレイ側が表示すべき画面の情報量はトータルで c であるとする。これを、注視点が1回到着するごとに δ ずつ表示を行うとする(図5)。このとき

$$\text{表示回数 } n = c/\delta$$

$$\text{所要時間 } T = n\tau/\lambda = \tau c/\lambda\delta$$

である。

グラフィック・ディスプレイの利用効果を表す指標として、単位時間に正しく伝達された情報量を採用する。1回の表示で正しく認識される情報量の期待値は $\delta(1 - \exp(-\mu\tau/\delta))$

であるから、全画面の表示を行った場合に正しく認識

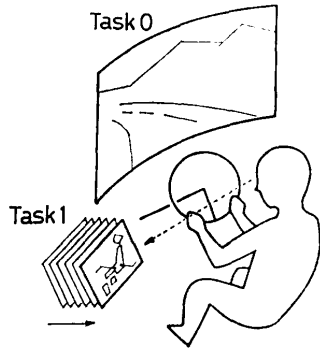


図3 運転者の視作業

Fig. 3 Visual performance of driver.

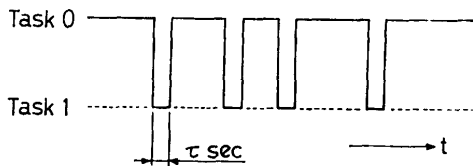


図4 注視点の移動状況

Fig. 4 Transition of fixation point.

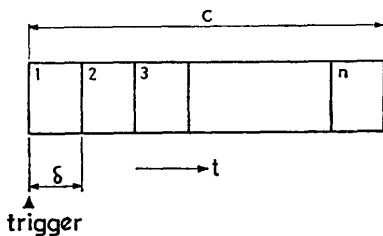


図5 画面の表示手順

Fig. 5 Procedure of displaying.

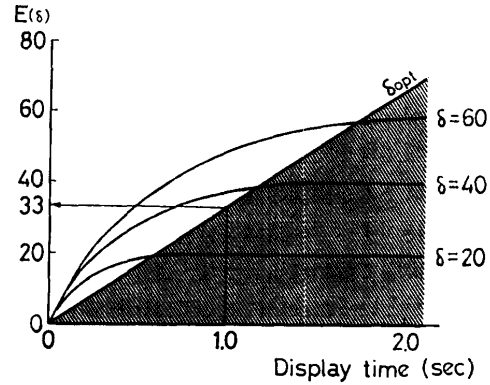


図6 最適表示量の決定方法

Fig. 6 Determination of optimum amount of displayed information.

される情報量の期待値 $I_t(\delta)$ は

$$I_t(\delta) = \delta(1 - \exp(-\mu\tau/\delta))n/T \\ = (1 - \exp(-\mu\tau/\delta))\lambda\delta/\tau$$

同様に、単位時間に誤って認識される情報量の期待値

$I_f(\delta)$ は

$$I_f(\delta) = \delta \exp(-\mu\tau/\delta)n/T \\ = \exp(-\mu\tau/\delta)\lambda\delta/\tau$$

利用効果の評価関数を

$$F(\delta) = I_t(\delta) - I_f(\delta)$$

とすると、

$$F(\delta) = (1 - 2 \exp(-\mu\tau/\delta))\lambda\delta/\tau$$

ここで、 $\mu\tau/\delta = x$ とおくと

$$F(x) = \lambda\mu(1 - 2 \exp(-x))/x$$

したがって、

$$d/dx(F(x)) = \lambda\mu(2(1+x^2)\exp(-x)-1)/x^3$$

この結果から $F(x)$ は一つの最大値を持つことがわかり、最大を与える x は $x=3.0$ となる。

以上より最適表示量 δ_{opt} は

$$\delta_{opt} = 0.33 \mu\tau \tag{3}$$

と決定される(図6)。

図6における斜線の領域は許容表示量を意味している。この図を用いることにより、表示時間が決められた時の最適表示量を求めることができる。図中の例は表示時間が1秒の場合の最適表示量である。同様の方法により、表示量を与えられた場合の、最適表示時間を決定することができる。

4. 図形パターンの実質線素への分解とパラメータ μ の決定

本研究で提案する認知モデルを、ディスプレイ画面

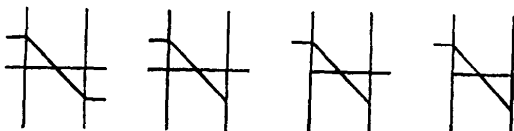


図 7 地図パターン問題
Fig. 7 Displayed pattern of map.

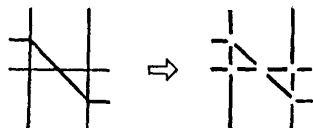


図 8 地図パターンの実質線素
Fig. 8 Essential lines of displayed map.

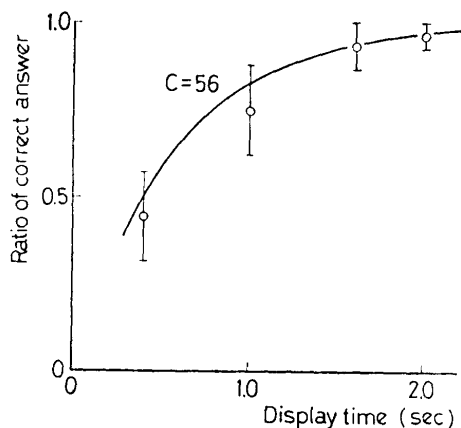


図 9 表示時間と正答率の関係
Fig. 9 Relation between display time and ratio of correct answer.

の設計に応用する場合、(1)式における定数 μ をあらかじめ実験的に決定しておく必要がある。そこで地図パターンの認知能力を測定する基礎実験として、提示された地図の中に含まれる三叉路の数を数えるという課題を設定した。具体的設問としては図 7 に示すような 4 種類の地図パターンをランダムに四つ表示し、どのパターンがいくつの三叉路を持っていたかを解答させた。三叉路の数を数える場合、被験者は提示された地図パターンのすべての線分を判読しなければならないため、この地図パターンの持つ実質線素数は図 8 に示すように 14 になる。したがって、画面全体では地図パターンが四つあるため実質線素の総和は 56 になる。

この実験を行った結果の、表示時間と正答率の関係を図 9 に示す。表示時間は、0.4、1.0、1.6、2.0 秒を選んでいる。被験者は熟練運転者 7 名である。図 9 に

おける曲線は、(1)式に $c=56$ 、 $\mu=100$ を代入して計算した正答率の理論値である。この結果からパラメータ μ の値は 100 が良い近似を与えることがわかる。

5. 認知モデルのナビゲーション用地図への応用

5.1 ドライビング・シミュレータ実験装置

一般乗用車の運転者が未知の土地を走る場合や、宅配便の運転者が配達を行う場合には目的地へのナビゲーションは不可欠である。車載ナビゲーション・システムの開発は従来より試みられており、慣性誘導装置を用いて現在位置を地図上で示すシステムはすでに実用化されている。また、近年 GPS の民生利用が開始されたため、人工衛星からの電波を受信することにより現在位置を割り出し、目的地への経路を表示する実験システムが開発されている³⁾。

このようなナビゲーション・システムの機能は、その最終出力情報が正しく運転者に伝達されて初めて発揮される。特に、経路誘導情報・走行情報等は走行中の運転者に車載機（表示装置）を通じて直に提供される情報であるため、その内容や提供方法等には運転という特殊条件下にある人間の情報処理能力を十分に考慮する必要がある。地図情報を走行中の運転者が利用する場合は、前方の状況判断に余裕がある時に、パネル型のディスプレイに視線を移して見るという形をとる。走行中にディスプレイを注視できる時間は極めて限られているため情報の提供はその短い許容時間内に効率的に行わなければならない。

本研究では運転者が走行中に注視点を前方からディスプレイ画面に切り替えるという実験を行うため、実車で行うと危険が伴う場合があると考えられる。そこで、ナビゲーション用地図の判読実験は、ドライビング・シミュレータを利用して行っている。著者は運転者が走行中にビデオテックス等の画像メディアを利用する場合に必要なヒューマン・インタフェースの開発を行っており⁴⁾、本研究ではその装置を使用している。図 10 にシステム構成を示す。 $\mu com 1$ はドライビング・シミュレータ用であり、ステアリングやペダルからの入力を検知し、前方の風景を表示する。 $\mu com 2$ は運転者の視線観測を行うための画像処理用計算機で、CCD カメラの撮った運転者の顔画像を解析することにより、注視点の判定を行う。 $\mu com 3$ はナビゲーション用地図を表示するためのグラフィック画面を生成

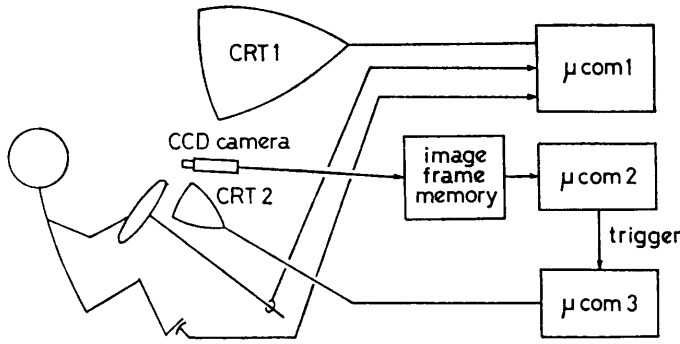


図 10 ドライビング・シミュレータのシステム構成
Fig. 10 System configuration of driving simulator.

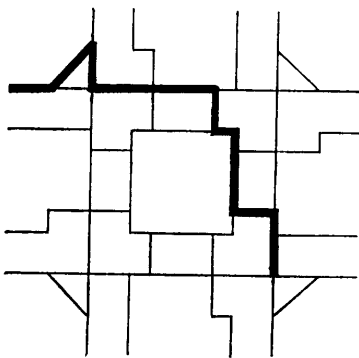


図 11 経路の表示方法
Fig. 11 Method of presentation of path.

する。表示の開始は、 $\mu\text{com}2$ が運転者が画面を注視したことを判定した時に同期してトリガされる。表示時間は $\mu\text{com}3$ の内部タイマによって測定される。

5.2 ナビゲーション用地図の利用実験

本研究では、実際のナビゲーションを想定した地図情報の利用実験を、ドライビング・シミュレータの市街地モードを用いて行っている。ディスプレイ画面には市街地の全体を示した地図を表示し、走行経路はこの地図上の太線で示すことにより運転者に提示する(図 11)。運転者は、初めの直線を走行中にディスプレイ画面を見て経路の判読を行う。

走行経路の提示を行う場合、運転者がいくつ先まで交差点の情報を記憶できるかをあらかじめ把握しておく必要がある。地図上に提示された走行経路の情報は、運転者の短期記憶に格納されるが、短期記憶の容量に関しては、これまでに実験心理学において研究されており、文字ならば 7 ± 2 字まで覚えらるという知見が得られている⁸⁾。そして、このあたりが短期記憶の容量と考えられており、これを直接記憶範囲あるいはメモリー・スパンと呼ぶ。 7 ± 2 という容量は必

ずしも文字に限ったものではなく、単語や文章でも 7 個ぐらい記憶するのは可能であると言われている。しかしながら、これらの知見はあくまでも文字によって表現される情報しか対象にしていなかったため、地図上の経路といった図形パターンの記憶を直接説明することはできない。そこで、本研究では運転者に提示する経路の長さを変えた場合に、いくつめの交差点まで正確に追従できるかをドライビング・シミュレータにおける実験により調べた。被験者は熟練運転者 7 名 (21~25 歳の男子学生) で、実験は室内の通常照明の下で行った。7 人の被験者に対し 2 秒間ずつ経路の提示を行った結果を図 12 に示す。これは、提示した交差点の数と運転者が正しく通過できた交差点の数の関係をプロットしたものであり、この結果は 10 個程度まで

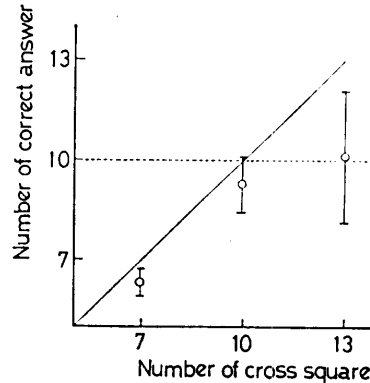


図 12 記憶された交差点の数
Fig. 12 Memorized number of cross squares.

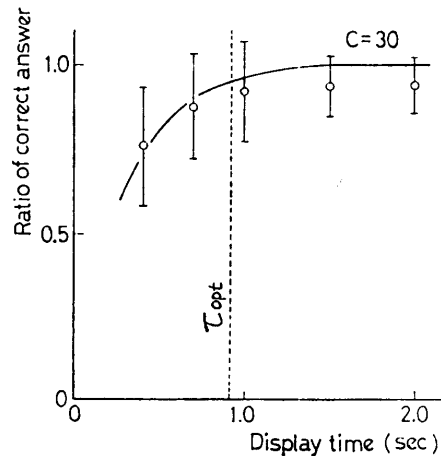


図 13 表示時間と正答率の関係
Fig. 13 Relation between display time and ratio of correct answer.

追従できることを示している。

この知見をふまえ、10個の交差点を含む走行経路の表示を行うために必要な表示時間を調べる実験を行った。図13に走行経路の表示時間と運転者が正しく通過できた交差点の数の関係を示す。表示時間は、0.4, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0秒を選んでいる。この結果は、表示時間が1秒よりも短くなると正答率が低下し始めることを示している。図中の曲線は(2)式を用いて計算した正答率の理論値である。この地図画面の持つ実質線素数は、次の方法によって数える。運転者が走行経路の判読を行う場合は、図中の太線にそって交差点の通過状況を認識する。そのため、太線の経路以外の線素は実質線素ではない。各交差点を通過する際に運転者は直進・左折・右折の判読を行うため、交差点一個につき三つの実質線素が存在する。したがって、経路全体の实質線素数は30となる。(1)式に $c=30$, $\mu=100$ を代入するとこの曲線が得られる。

$c=30$ の画面の最適表示時間は(3)式より0.91秒であり、この実験結果と整合していることが分かる。

6. 結 論

本研究では、まず第一に画像メディアの認知モデルとして、ディスプレイ画面の複雑さと人間がそれを認識するのに要する時間の関係を定量的に表現するモデルの構築を行った。そして、第二に認知モデルの実際的应用として、自動車用ナビゲーション・システムをとりあげ、地図画面の認識に要する時間の評価を行った。

今後は一般のワークステーションに用いられる画像メディアに应用を広げるとともに、実質線素の自動抽出の方法について検討を進めていきたい。

謝辞 本研究において、適切な御指導と御助言を賜わった東京大学工学部石井威望、井口雅一両教授に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 池田光男: 視覚の心理物理学, p. 248, 森北出版, 東京 (1975).
- 2) スペアー, K. T., レムクール, S. W.: 視覚の情報処理, p. 342, サイエンス社, 東京 (1986).
- 3) 藪田啓一郎: 自動車の移動体通信について, *Human Interface N & R*, Vol. 1, No. 1, pp. 21-28 (1986).
- 4) 石井威望, ほか: 画像解析を利用した自動車ヒューマン・インタフェース, 計測自動制御学会論文集, Vol. 22, No. 11, pp. 1183-1188 (1986).
- 5) ナイサー, U.: 認知心理学, p. 448, 誠信書房, 東京 (1982).

(昭和62年1月29日受付)

(昭和62年5月13日採録)



岩田 洋夫 (正会員)

昭和32年生。昭和56年東京大学工学部機械工学科卒業。昭和61年同大学院工学系研究科産業機械工学専門課程博士課程修了。同年筑波大学構造工学系助手。工学博士。グラフィック・インタフェース, 画像処理, 生体情報の研究に従事。計測自動制御学会会員。