

視覚探索パラダイムにおける反応時間の数学的モデル

鵜 沼 秀 行*・長谷川 桐**

Mathematical Models of Response-time in Visual Search Paradigm

Hideyuki UNUMA, Hisa HASEGAWA

Abstract

Recent psychophysical and mathematical models for explaining response-time data in visual search paradigm are reviewed. Specifically, models based on similarity-choice theory and on signal-detection theory are compared, and their possibilities for explaining visual attention are discussed. Models include four elements: similarity-representation, attentional weight, stimulus-bias, and response-bias. Authors suggest that these four elements of models should efficiently explain response data in visual search, and that several issues about these elements remain to be clarified. Methodological issues to constrain models of visual search, including analyses of response-time distributions, are also discussed.

Key Words: visual search, response time, similarity, similarity-choice theory, signal detection theory

われわれの身のまわりには、通常さまざまな対象が同時に存在している。そのような環境のなかで人間がどのようにして特定の対象を選択し認識するのかは、認知活動における基本的な問題である。このような対象（物体 object）の選択的処理の問題に関して、四半世紀以上にわたって視覚探索（visual search）課題を用いた研究が重要な知見を蓄積してきた（Logan, 2004; Wolfe & Horowitz, 2004）。本稿は、視覚探索課題における特に反応時間の問題に絞ってその説明モデルを類似性-選択理論（similarity-choice theory）を中心に整理し、さらに今後解決されるべき問題点を示すことを目的とする。

*教授 知覚・認知心理学

**中部学院大学

視覚探索

視覚探索課題においては一般にいくつかの刺激が同時に提示され、観察者の課題は妨害項目 (distractor) の中から目標項目 (ターゲット target) を見つけることである (e.g., Treisman & Gelade, 1980; Wolfe, 1998, 2001)。もしターゲットが視覚系によって注意的処理がおこなわれる前に利用可能な属性をもつならば、そのターゲットは刺激全体の数 (セットサイズ set size) に依存しない反応時間で検出されると考えられる。たとえば、1つの赤い円が10個の緑の円のなかで500ミリ秒で見つかり、さらに20個あるいは30個の刺激に中でも同様に500ミリ秒で検出されるならば、その視覚探索はセットサイズに依存しない探索であり、ターゲットの刺激属性は注意的処理以前に検出が可能であると判断され、探索は「効率的 (efficient)」と定義される。これに対して、刺激を検出するための反応時間がセットサイズの増加にしたがって長くなるならば、その際の視覚探索ではターゲットが見つかるまで各刺激に対する逐次的な注意の移動がおこなわれたと考えられる。この場合、探索は「非効率的 (inefficient)」と定義される。

当初、赤や緑などの色や、線分の方向などの「基礎的」な単一の特徴で妨害項目から区別されたターゲットの探索は効率的であり、これに対して赤と緑、水平と垂直などの組み合わせで構成された刺激セットから、たとえば色と方向の結合で定義される赤い垂直線をターゲットとして見つける探索は非効率的であり、そこには注意による特徴の統合が必要と考えられた (特徴統合理論 Treisman & Gelade, 1980)。しかし後に特徴の結合で定義されたターゲットが効率的に検出される例が報告され、この理論は修正されることになった (e.g., Guided Search 2.0, Wolfe, 1994)。したがって、効率的な探索は、ある刺激属性が視覚システムにとって基礎的であり注意処理以前に利用されることの必要条件ではあっても、十分条件ではないことが示された (Wolfe & Horowitz, 2004)。

そこで、注意以前の処理 (pre-attentive processing) の実験的根拠として、効率的処理にくわえて探索の非対称性 (search asymmetry) が用いられてきた (Treisman & Gormican, 1988; Wolfe, 2001)。探索の非対称性とは、2種類の刺激属性において、一方がターゲットの場合には効率的な探索がおこなわれ、他方がターゲットの場合には非効率的な探索がおこなわれることをさす。これは、ある刺激属性が基礎的であり、注意処理以前に検出されることの基準として用いられてきた (Treisman & Souther, 1985; Wolfe & Horowitz, 2004)。

視覚探索を規定する要因と探索の機構

視覚探索における効率的あるいは非効率的探索を規定する要因とその処理を説明するために多くのモデルが提案されてきた (Wolfe & Horowitz, 2004)。処理とメカニズムについての説明は、一定時間内に処理可能な情報量に限界を仮定するか否か、そして処理が並列的か直列（逐次）的かという点で区別することができる。探索を規定する要因という観点からは、具体的刺激属性、刺激間の空間的關係や時間的文脈を整理することができるが (Wolfe & Horowitz, 2004)、それらの共通する刺激間の関係としての類似性 (similarity) が包括的な説明 (Duncan & Humphreys, 1989) として重要であろう。すなわち、直列処理、並列処理の区別や、単一の刺激属性の探索、結合探索のいずれかに関わらず、どのような刺激材料であっても探索の困難さはターゲットと妨害項目間の類似性の増加とともに増大し、妨害項目間の類似性の増加とともに減少する。つまり、ターゲットと妨害項目が類似するほど探索は困難となり、一方で妨害項目間が類似すれば探索は容易となる。その結果、探索効率の連続次元が成立する。

このような類似性にもとづく視覚探索の機構について、Duncan & Humphreys (1992) は彼らの類似性に基礎を置く理論について、「類似性理論 (similarity theory)」とよばれるよりも、むしろ探索についての「注意関与理論 (attentional engagement theory)」とよばれるべきであるとしている。すなわち、この理論は、視覚的注意がいかに制御されて、情報が視野から選択的に処理されるかを説明することに重点がある。具体的には、視野における情報の並列処理による知覚的分凝・分析という初期処理に引き続いて、選択された情報が視覚短期記憶 (VSTM; Visual Short-Term Memory) に転送され、その事態で要求される反応に利用可能となる。VSTM への選択は、複数の要素的対象間の競合的な処理であり、2つの要因に規定される。まず視覚入力各要素は、その事態での反応に必要な前もって用意された情報の記述である「注意の鋳型 (attentional template)」にどれほど適合するかにしたがって重み (weight) を与えられる。視覚探索では、この鋳型は探索されるターゲットに対応してあらかじめ観察者によって内的に準備されることになる。重みの大きな要素は高い確率で選択されて VSTM へ転送され、小さな重みの要素は選択される確率が低いと仮定される。第二に、視覚入力の異なる要素が知覚的群化によって結びつけられる程度にしたがって、ある要素の重みは他の要素の重みに影響をあたえる。この「重みの結合 (weight linkage)」によって、異なる要素間が強く結合するほど、それらは全体として選択されて VSTM に転送される。また逆に、低い重みで結合した要素は転送される確率が低くなる。その結果、ターゲットと妨害項目間の結合は探索の効率を低下させ、一方妨害項目間の結合は効率的な探索を助ける。また、ある妨害項目の重みが低下することは、その重みの低下を他の要素へと拡散させる。これは「抑制拡散 (spreading

suppression)』とよばれる (Duncan & Humphreys, 1992, p.579)。

類似性-選択理論

Logan (2004) は、視覚探索をふくむ注意の諸現象を総合的に説明するモデルとして、類似性-選択理論 (similarity-choice theory) と信号検出理論 (signal-detection theory) にもとづく具体的な数学的モデルを取り上げた。ここではまずそのモデルの要点を Logan (2002, 2004) をふまえて整理する。さらに、視覚探索における反応時間の説明について考察をくわえる。

類似性-選択理論 (Shepard, 1957; Luce, 1959, 1963) の目的は、類似性とバイアスの推定値から選択確率を予測することである。Shepard-Luce の選択ルールによれば、刺激 x が与えられたときに、反応 i が選択される確率は、

$$P(i|x) = \frac{\eta(x, i)\beta_i}{\sum_{j \in R} \eta(x, j)\beta_j}, \quad (1)$$

ここで $\eta(x, i)$ は対象 x と反応カテゴリーの表象 i の間の類似性であり、 β_i は反応 i を生じるバイアスである。たとえば、「赤ならばボタンを押せ、緑なら押すな」という状況で、より赤に類似した刺激が提示されるほどボタンを押す反応の確率は増加する。また試行全体で赤に類似した刺激が多く出現すれば、やはりボタンを押す確率は増加する (β の増加)。また緑の刺激に類似した刺激が提示されれば、ボタンを押す反応は減少する。すなわち、対象 x に対して反応 i を生じる確率は x と i の類似性とバイアス β の増加とともに増加し、 x と反応の集合 R に含まれる他の反応 j の類似性の増加とともに減少する。

類似性-選択理論では一般に対象と反応カテゴリーは多次元空間内の点として表現され、またその間の類似性はその空間内の距離の指数関数であると仮定される (Shepard, 1987) ので、

$$\eta(x, i) = \exp[-s \cdot d_{xi}], \quad (2)$$

s は感度パラメータ、 d_{xi} は多次元空間における x と i の距離であり、

$$d_{xi} = \left(\sum_{h=1}^H |u_{xh} - u_{ih}|^r \right)^{\frac{1}{r}}, \quad (3)$$

ここでは、いわゆるユークリッド空間 (Euclidean space) が、より一般的にはつぎのミンコフスキーの r メトリック (Minkowski's r -metric) が仮定される。すなわち、距離には H 次元

の多次元空間における各次元上の距離からその r 乗が求められ、さらにその r 乗根（幾何平均）が用いられる。 r は距離メトリックを決めるパラメータで、 $r=1$ では市街化計量（city block metric）、 $r=2$ ではユークリッド距離となる。

さて、類似性-選択理論は選択確率を予測はするが反応時間を予測しない。これに対して、独立競争モデル（independent race model）は類似性-選択理論と同様の選択確率を予測すること（Marley & Colonius, 1992; Bundesen, 1993）から、これを利用して類似性-選択理論に時間次元を追加し、選択確率にくわえて反応時間も予測することができる。独立競争モデルでは対立する判断の選択に時間が利用され、もっとも速く競争を終了した選択肢が選ばれる。Bundesen（1990）は注意理論を競争モデルから検討し、選択確率(1)式の要素 $\eta(x, i) \beta_i$ を指数分布の λ パラメータ（rate parameter）として解釈した¹。この場合、“勝者”（winner）が複数の指数分布をもつ選択肢の間の競争を終了する時間も、競争する分布の λ の和である λ パラメータをもつ指数分布となる。平均の終了時間はラムダの逆数である（後注参照）から、ひとつの対象がカテゴリー集合 R からなる競争を終了する時間の平均（ FT ）は、

$$FT = \frac{1}{\sum_{j \in R} \eta(x, j) \beta_j}, \quad (4)$$

となり、これは1を式(1)の分母で除したものである。式(1)が選択確率を与えるのに対して、式(4)は選択に必要な反応時間を与える。

視覚探索と類似性-選択理論

上記の類似性-選択理論を、視覚探索をふくむ視覚的注意の問題に適用した代表的な例として Bundesen（1990）をあげることができる。視覚的注意においては、対象は注意による選択的処理に対応する重み（weight）を与えられ、重みの増加にしたがって選択される確率が増加する（上述の Duncan & Humphreys, 1992, 参照）。特に視覚探索における同一の妨害項目（たとえば、多数の同じ緑円からひとつの赤円を見つける）事態では、対象 x （赤円）を見つける確率は、つぎの式で与えられる。

$$P_{\pi}(x) = \frac{\sum_{k \in S} \eta(x, k) \pi_k}{\sum_{z \in D} \sum_{k \in S} \eta(z, k) \pi_k}, \quad (5)$$

ここで、 $\eta(x, k)$ は対象 x がターゲットを定義する特徴のセット S （赤、円）の中の特徴 k （赤または円）をもつ程度を表し、 D はその試行に提示される対象のセット全体を表す。 π_k は特徴

k をもつ対象に与えられる優先度 (priority) である。なお, Logan (2002) は, π が完全に被験者によって制御されるのに対して, η は刺激画面の対象と, 特徴 k についての被験者の観察履歴によって決定されると仮定した (p.381)。一方, Bundesen (1990) は, π が刺激画面と被験者の両方に規定されると考えた。いずれにせよ, π は刺激セットのなかでの特定の対象の重みを反映する。これに対して, 式 (1) の β は反応セットのなかでの特定の反応バイアスを表現している。また, P_π の総和は 1.0 と仮定され, これはある対象に重みがかかると, 他の対象の重みが減少することを意味する。この制約は, 注意処理における容量限界の仮定に対応している (Logan, 2002)。

さらに, Bundesen (1990) は刺激選択と反応選択を説明するために, 式 (5) と式 (1) を掛け合わせた。すなわち, 反応セットにおいて対象 x が選ばれた時に反応カテゴリー i が選ばれるパラメータ $\eta(x, i) \beta_i$ と, 刺激セットにおいて対象 x が選択されることに対応するパラメータ $P_\pi(x)$ が掛け合わされることで, 「対象 x が選択され, かつ反応 i が選択される」確率が求められる。

$$P(x \cap i) = \frac{\eta(x, i) \beta_i P_\pi(x)}{\sum_{z \in D} \sum_{j \in R} \eta(z, j) \beta_j P_\pi(z)}, \quad (6)$$

Bundesen (1990) の類似性-選択モデルは, 視覚探索の初期のモデル (e.g., Treisman & Gelade, 1980; Wolfe, 1994) に基本的に適合する。これらの視覚探索モデルは, 効率的な探索では並列探索が, 非効率的な探索では直列探索が仮定される。類似性-選択理論は, ターゲットと妨害項目の類似性が低く妨害項目が一様な場合の効率的な探索について次のように説明する。ターゲットが刺激画面に提示される試行は, 複数の競合する選択肢間の「競争 (race)」としてモデル化される。妨害項目はターゲットとの類似性が低いのでこの競争に影響を与えない。すなわち妨害項目の数が増減しても反応時間はほとんど変わらない。ターゲットが刺激画面上に提示されない試行では, 探索の打ち切り時間 (deadline) が仮定され, この時間までにターゲットが見つからなければ「なし」と反応される。ただし, この打ち切り時間の仮定には, 必ずしもターゲットなし試行における探索打ち切りの最適な方法ではないという指摘がある (Chun & Wolfe, 1996)。また, Logan (2002) は, さらに被験者が式 (3) に注意の重みを加える Nosofsky (1984, 1986, 1988) を援用して (式 (3)'), 注意の理論を拡張した。

$$d_{xi} = \left(\sum_{h=1}^H w_h |u_{hx} - u_{hi}|^r \right)^{\frac{1}{r}}, \quad (3)'$$

ここで、 w_h は対象の特定の属性次元 h への注意の重みである。すなわち、被験者は類似性の多次元空間におけるターゲットと妨害項目の距離を増大させることで、正答確率と反応時間を事態に適合する方向に改善することができる。一方、Bricolo, Giancesini, Fanini, Bundesen, & Chelazzi (2002) は非効率的探索の説明として、並列探索・限界容量・自動打ち切り (self-terminating) モデルと直列探索モデル・自動打ち切りの両方が可能であることを指摘し、最終的に直列探索モデルを支持している。

類似性の空間的表現と非対称性

類似性が空間的に表現されるという前提は、類似性によって視覚探索における反応時間を説明しようとする際に重要な問題を解決しなければならない。それは非対称性の問題である。すなわち、通常、類似性空間においては対象 i と対象 j の間の距離は、 j と i の間の距離と同一である。しかしながら、類似性判断においては、しばしば i の j に対する類似性判断は、 j の i に対する判断と同一ではない。たとえば「日本はアメリカにどの程度似ているか」という判断は、「アメリカは日本にどの程度似ているか」と同一ではない (Tversky, 1977)。一方、視覚探索においてもターゲットと妨害項目を交代しただけで検出の効率が変化すること (Treisman & Gormican, 1988; Wolfe, 2001) があることから、類似性による説明には非対称な類似性判断の説明が含まれる必要がある (Logan, 2002)。

Nosofsky (1991) は、反応バイアスとは別に刺激バイアスを仮定した。例えば赤に対するバイアスが橙に対するバイアスよりも高いと、被験者は赤を橙と間違えるよりも、橙を赤と混同しやすい、と仮定し、この種の刺激バイアスは刺激の顕著度 (salience) や親近性 (familiarity) と類似していると考えている。またこのバイアスは、先の式 (5) (6) における P_{π} パラメータに対応していると考えられるであろう。ただし、視覚探索における探索の非対称性がこの刺激バイアス P_{π} で説明されるのか、それとも式 (1) における反応バイアス β によって規定されるのか (Logan, 2002, p.386) は、今後検討されるべき問題として残されている。

信号検出理論

視覚探索課題が妨害項目 (ノイズ) をふくむ刺激画面からのターゲット (信号) の検出と見なされることから、信号検出理論 (signal-detection theory) を視覚探索課題の説明に適用しようとする試みがおこなわれてきた (Eckstein et al., 2000; Palmer, 1994, 1998; Palmer et al., 1993)。ここでは、視覚探索における反応時間の説明に信号検出理論を適用することの可能性

と問題を、類似性-選択理論と比較しながら整理する。

信号検出理論は、知覚的な弁別における感度 (sensitivity) をバイアスから分離することに主眼をおいている。そこでは内的ノイズ (internal noise) によって類似した刺激が重なり合う表現 (分布) をもつと仮定されている。古典的な信号検出理論では、信号が提示されたかどうかについての Yes-No の弁別反応が被験者に求められる。入力刺激に対して心理的表現の連続次元上で成立した知覚像 (percept) が決定基準 (β) を超えていれば被験者は Yes と反応し、基準に達しないときは No と反応すると仮定される。信号を含む事態の反応の分布と、ノイズのみに対する反応の分布の重なりが、被験者の感度をあらわす (d')。両者の重なりが大きくなれば、感度 d' は低下する。信号を含む事態の分布において基準を超える割合が、正しい Yes 反応 (ヒット hit) の確率に対応し、ノイズのみの事態の分布において基準を超える割合が、誤った Yes 反応 (誤警報 false alarm) の確率に対応する。古典的な信号検出理論は 1 変量の正規分布で信号を含む分布とノイズのみの分布が等分散である仮定から出発したが、その後、他の分布や分散の仮定に拡張されることになった (Wickens, 2002)。

信号検出理論は、類似性-選択理論と同様に類似性を多次元空間における距離として表現するが、その距離は確率的である。すなわち、対象は空間内の点として表現されるのではなく、分布として表現される。たとえば、Ashby & Perrin (1988) は類似性を分布の重なりとして解釈した。そこでは、類似度の高い対象ほど分布の重なりが大きい。また、Nosofsky (1992) は、多変量正規分布において分散と共分散が等しい場合に、分布の重なりによって定義される類似度が、それらの平均値という点の間の距離によって定義される類似度と等価であり、点間の距離による類似性の定義が分布の重なりによる定義の特殊ケースとみなすことができることを示した。

古典的な信号検出理論は、刺激が弱いか混同を起こしやすい事態を問題としたので、反応の正確度 (accuracy) すなわち正答率が主要な従属測度であった。したがって、注意一般の問題に信号検出理論を適用しようとする場合、刺激の持続時間を制限するか、マスキングをおこなうなどして反応の正確度を分析対象としてきた (Palmer, 1994)。これに対して、反応時間を知覚像と基準 (β) の距離 (D) の関数であると仮定することで、注意と反応時間の関係を説明しようとする立場がある。たとえば、Maddox & Ashby (1996) は知覚像と基準の距離 (D) と反応時間の間に指数関数を仮定するモデルとベキ関数を仮定するモデルを、Garner (1974) の speeded-classification 課題で比較検討している。

信号検出理論と視覚探索

視覚探索についての信号検出アプローチは、一般に知覚的な容量限界を仮定せず、また直列探索による逐次的な処理も仮定する必要がない (Eckstein et al., 2000; Palmer, 1994, 1998; Palmer et al., 1993)。Eckstein et al. (2000) では、刺激入力に対して、視覚系が刺激次元に対応する次元でノイズをふくむ内的表現を形成する。さらに複数の次元の表現が総合されることで単一の決定次元での値が得られ、この値の最大値を生じた刺激が反応を決定すると仮定される。このような容量無限と並列探索を仮定する信号検出理論による説明は、特徴統合理論 (feature integration theory) や誘導探索 (guided search) モデル (Wolfe, 1994) には適合しないが、先に述べた類似性にもとづく注意関与理論 (Duncan & Humphreys, 1989; Heinke & Humphreys, 2003) などの並列処理モデルには矛盾しない。

視覚探索課題の信号検出理論による説明は、課題遂行の精度 (accuracy) すなわち正答確率を数量的に予測する点で優れたものである (Eckstein et al., 2000)。ただ、反応時間をモデル化し通常の視覚探索課題を説明しようとする観点からは、未可決の問題を指摘できる。まず、反応時間を信号検出理論に組み入れる試みは、先にあげた Maddox & Ashby (1996) で speeded-classification 課題についておこなわれたが、視覚探索課題においては充分におこなわれていない (Logan, 2004)。その理由は、信号検出理論が仮定する内的ノイズと、対象を表現する複数の表現 (分布) の重なりを実現するために、一般に刺激画面の短時間提示事態における正答率が従属測度となるからであろう。くわえて、短時間提示事態におけるターゲットの検出が、通常の視覚探索課題において被験者の反応まで刺激画面が提示される事態のターゲット検出と同様にモデル化できるかどうかは、未解決の問題である。

信号検出理論が理論的には視覚探索課題における同時並列処理をモデル化しようとすることは、短時間提示事態におけるターゲット検出の時間範囲が眼球運動や注意の移動をとまなわなないとすれば自然なことかもしれない。しかし、たとえば Duncan & Humphreys (1992) における特定の項目への「重み」の処理として内的注意が特定の項目へ向けられることを許容するならば、信号検出アプローチは特徴統合理論や誘導探索モデルの直列処理に近いものとなるであろう。いずれにしても、複数の項目の競合と特定の項目へのバイアスをどのようにモデル化するかが、より具体的に検討される必要があるだろう。

モデルの検証における問題

最後に、視覚探索課題における反応時間のモデルを検証する方法について、これまで軽視さ

れてきた方法論上の問題を取り上げておきたい。視覚探索における反応時間のモデルを実際に検証する場合、一般にターゲットの検出に要する反応時間を項目数（セットサイズ set size）の関数として分析し、探索の効率性が検討されてきた。この場合、条件（ターゲットの有無×セットサイズ）別の反応時間の処理では、被験者ごとに代表値（算術平均、幾何平均、あるいは中央値）が求められ、さらに被験者間で代表値化されることがほとんどであった（e.g., Treisman & Souther, 1985）。ここでの処理の前提は、もとの反応時間の分布、あるいは（対数変換、あるいは外れ値を除くなどの）処理された分布の正規性であるが、いずれの場合もその前提が満たされない可能性が指摘されてきた（Luce, 1986; Miller, 1988, 1991）。また、ストループ課題のような視覚的注意に関連したいくつかの実験変数の操作が、反応時間の分布における平均値、標準偏差、歪度に別個の影響を与える可能性が指摘され（Heathcote, Popiel, & Mewhort, 1991）、さらに分布全体の分析が他の知覚・認知課題の反応時間についても試みられるようになった（Gottlob, 2004）。

視覚探索課題についても、反応時間の分布全体を利用して視覚探索のモデルを評価する方法が提案されている（Bricolo, et al., 2002; Palmer, Horowitz, Torralba, & Wolfe, in press; Wolfe, Palmer, Horowitz, 2010）。たとえば、Palmer et al. (in press) は ex-Gaus 分布をふくむ4つの分布をとりあげ、視覚探索課題の反応時間の分布への適合度を検討した。4つの分布とそのパラメータは、いずれも従来の知覚・認知実験において各種モデルの諸要素と対応づけが試みられてきたものである。ex-Gaus 分布は正規分布と指数分布の畳み込み（convolution）によって定義され、Burbeck & Luce (1982) によって名づけられた。McGill (1963) は、この分布の正規分布部分が決定過程（decision process）の分布に対応し、指数分布部分が残りの知覚と反応生成過程の分布に対応するとした。一方、Hohle (1965) は決定過程が指数分布をなし、その他の部分が正規分布をなすとした。ex-Gaus 分布に関しては、その要素がどの仮説的過程に対応するのかについて議論の余地がある（Luce, 1986）が、このように合成された分布関数の要素を心理過程の特定の部分に対応づけて説明しようとするアプローチは有効であろう。Palmer et al. (in press) においては、検討されたいずれの分布でも、その指数分布部分が非決定過程に対応し、反応時間の平均値のパターンをとらえていることが示唆されている。

結語

本稿は、視覚探索課題における反応時間を説明するための数学的モデルを、類似性-選択理論を中心に整理し、その可能性と問題点を指摘した。モデルは、刺激項目間の類似性、注意に

よる重み, および刺激バイアスをふくむ知覚過程と, 反応バイアスをふくむ反応・決定過程からなり, これらによって刺激選択と反応選択が説明された。さらに, 視覚探索課題における反応時間データを説明するための具体的な仮定とモデル, そして残された問題が指摘された。

注意一般については, これまで視覚探索のほかにも, ささまざまな課題において実験的な検討とモデル化がおこなわれてきた。例をあげれば, 1950年代から60年代における選択的聴取 (selective listening), 70年代の二重課題 (dual task), そして80年代以降の視覚探索, 負のプライミング (negative priming), 手がかり課題 (cueing paradigm), 注意の瞬き (attentional blink) などを経て, 近年の課題切り替え (task switching) にいたるまで, 種々の課題が取り上げられてきた。これらについての知見は注意研究の急速な発展と広がりを示すものではあるが, 一方でこれらの個別の現象はそれぞれが無関連に取り上げられる傾向があり, それらの一貫した説明が提案されることは少なかった (Logan, 2004)。しかし, 本稿が取り上げた視覚情報の選択的処理に関する数学的モデルは, すでに視覚探索課題以外にも, 手がかり課題や分類・カテゴリー判断をふくむ, より広い課題に適用可能であることが示唆されている (Bundesen, 1996; Logan, 2004)。人間の認識活動における選択的な処理としての注意についての総合的モデルが, 本稿で論じられたような定式化の方向 (Bundesen, 1990, 1996; Posner, 1982) で今後さらに進展することが期待される。

謝辞

本研究は, 第一著者に対する平成22年度川村学園女子大学教育研究奨励「視覚特徴と物体知覚の総合的モデル化と教育場面における活用」による補助を受けた。

注

- 1 指数分布の確率密度関数は

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x},$$

と書ける。ここで $\lambda > 0$ は分布のパラメータで, しばしば rate parameter とよばれる。この分布は, 平均 $1/\lambda$, 分散 $1/\lambda^2$ をもつ。

引用文献

Ashby, F. G., & Perrin, N.A. (1988). Toward a unified theory of similarity and recognition. *Psychological*

- Review*, 95, pp.124–150.
- Bricolo, E., Gianesini, T., Fanini, A., Bundesen, C., Chelazzi, L. (2002). Serial attention mechanisms in visual search: a direct behavioral demonstration. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14, pp.980–993.
- Bundesen, C. (1990). A theory of visual attention. *Psychological Review*, 97, pp.523–547.
- Bundesen, C. (1993). The relationship between independent race models and Luce’s choice axiom. *Journal of Mathematical Psychology*, 37, pp.446–471.
- Bundesen, C. (1996). Formal models of visual attention: a tutorial review. In *Converging Operations in the Study of Visual Selective Attention*, ed. A. F. Kramer, M. G. H. Coles, G. D. Logan, pp.1–44. Washington, DC: American Psychological Association.
- Burbeck, S. L., & Luce, R. D. (1982). Evidence from auditory simple reaction times for both change and level detectors. *Perception & Psychophysics*, 32, pp.117–133.
- Chun, M. M., & Wolfe, J. M. (1996). Just say no: How are visual searches terminated when there is no target present? *Cognitive Psychology*, 30, pp.39–78.
- Duncan, J., & Humphreys, G.W. (1989). Visual search and stimulus similarity. *Psychological Review*, 96, pp.433–58.
- Duncan, J., & Humphreys, G. W. (1992). Beyond the Search Surface: Visual Search and Attentional Engagement. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, pp.578–588.
- Eckstein, M. P., Thomas, J. P., Palmer, J., & Shimozaki, S. S. (2000). A signal detection model predicts the effects of set size on visual search accuracy for feature, conjunction, triple conjunction, and disjunction displays. *Perception & Psychophysics*, 62, pp.425–451.
- Garner, W. R. (1974). *The Processing of Information and Structure*. New York: Wiley.
- Gottlob, L. R. (2004). Location cuing and response time distributions in visual attention. *Perception & Psychophysics*, 66, pp.1293–1302.
- Heathcote, A., Popiel, S. J., & Mewhort, D. J. (1991). Analysis of response time distributions: An example using the stroop task. *Psychological Bulletin*, 109, pp.340–347.
- Heinke, D., & Humphreys, G. W. (2003). Attention, spatial representation, and visual neglect: simulating emergent attention and spatial memory in the selective attention for identification model (SAIM). *Psychological Review*, 110, pp.29–87.
- Hohle, R. H. (1965). Inferred Components of Reaction Times as Functions of Foreperiod Duration. *Journal of Experimental Psychology*, 69, pp.382–386.
- Logan, G. D. (2002). An instance theory of attention and memory. *Psychological Review*, 109, pp.376–400.
- Logan, G. D. (2004). Cumulative progress in formal theories of attention. *Annual Review of Psychology*, 55, pp.207–234.
- Luce, R. D. (1959). *Individual Choice Behavior*. New York: Wiley
- Luce, R. D. (1963). Detection and recognition. In R. D. Luce, R. R. Bush & E. Galanter (Eds.), *Handbook of Mathematical Psychology*, pp.103–189. New York: Wiley
- Luce, R. D. (1986). *Response times: Their role in inferring elementary mental organization*. New York: Oxford University Press.
- Maddox, W. T., & Ashby, F. G. (1996). Perceptual separability, decisional separability, and the identification-speeded classification relationship. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 22, pp.795–817.

- Marley, A. A. J., & Colonius, H. (1992). The "horse race" random utility model for choice probabilities and reaction times, and its competing risks interpretation. *Journal of Mathematical Psychology*, 36, pp.1-20.
- McGill, W. J. (1963). Stochastic latency mechanisms. In R. D. Luce, R. R. Bush & E. Galanter (Eds.), *Handbook of Mathematical Psychology*, 1, pp.309-360. New York: Wiley.
- Miller, J. (1988). A warning about median reaction time. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 14, pp.539-543.
- Miller, J. (1991). Reaction time analysis with outlier exclusion: bias varies with sample size. *Quarterly Journal of Experimental Psychology A*, 43, pp.907-912.
- Nosofsky, R. M. (1984). Choice, similarity, and the context theory of classification. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, 10, pp.104-114.
- Nosofsky, R. M. (1986). Attention, similarity, and the identification - categorization relationship. *Journal of Experimental Psychology: General*, 115, pp.39-57
- Nosofsky, R. M. (1988). Exemplar-based accounts of relations between classification, recognition, and typicality. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, 14, pp.700-708.
- Nosofsky, R. M. (1991). Stimulus bias, asymmetric similarity, and classification. *Cognitive Psychology*, 23, pp.94-140.
- Nosofsky, R. M. (1992). Similarity scaling and cognitive process models. *Annual Review of Psychology*, 43, pp.25-53
- Palmer, E. M., Horowitz, T. S., Torralba, A., & Wolfe, J. M. (in press). What are the shapes of response time distributions in visual search tasks? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*.
- Palmer, J. (1994). Set-size effects in visual search: the effect of attention is independent of the stimulus for simple tasks. *Vision Research*, 34, pp.1703-1721.
- Palmer, J. (1998). Attentional effects in visual search: relating search accuracy and search time. In R. D. Wright (Ed.) *Visual Attention*, pp.348-388. New York: Oxford Univ. Press.
- Palmer, J., Ames, C. T., & Lindsey, D. T. (1993). Measuring the effect of attention on simple visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19, pp.108-130.
- Posner, M. I. (1982). Cumulative development of attentional theory. *American Psychologist*, 37, pp.168-179.
- Shepard, R. N. (1957). Stimulus and response generalization: a stochastic model relating generalization to distance in psychological space. *Psychometrika*, 22, pp.325-345.
- Shepard, R. N. (1987). Toward a universal law of generalization for psychological space. *Science*, 237, pp.1317-1323.
- Treisman, A., & Gelade, G. (1980). A feature integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 12, pp.97-136.
- Treisman, A., & Gormican, S. (1988). Feature analysis in early vision: Evidence from search asymmetries. *Psychological Review*, 95, pp.15-48.
- Treisman, A., & Souther, J. (1985). Search asymmetry: A diagnostic for preattentive processing of separable features. *Journal of Experimental Psychology: General*, 114, pp.285-310.
- Tversky, A. (1977). Features of similarity. *Psychological Review*, 84, pp.327-352.
- Wickens, T. D. (2002). *Elementary Signal Detection Theory*. New York: Oxford Univ. Press.
- Wolfe, J. M. (1994). Guided Search 2.0: A Revised Model of Visual Search. *Psychonomic Bulletin & Review*, 1, pp.202-238.

- Wolfe, J. M. (1998). What can 1 million trials tell us about visual search? *Psychological Science*, 9, pp.33–39.
- Wolfe, J. M. (2001). Asymmetries in visual search: An introduction. *Perception & Psychophysics*, 63, pp.381–389.
- Wolfe, J. M., & Horowitz, T. S. (2004). What attributes guide the deployment of visual attention and how do they do it? *Nature Reviews Neuroscience*, 5, pp.1–7.
- Wolfe, J. M., Palmer, E. M., & Horowitz, T. S. (2010). Reaction time distributions constrain models of visual search. *Vision Research*, 50, pp.1304–1311.