

心理物理計測の工学的応用

中易 秀敏*

森 みどり**

• Application for Engineering Problem by Psychophysical Measurement

Hidetoshi NAKAYASU*

Midori MORI**

1. 緒言

人を対象とする心理や挙動の計測研究には

(i) アンケートやヒヤリングに基づく主観的計測

(ii) 人間の性能と特性の心理物理量や生理信号の計測

の二通りのアプローチが良く用いられている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾. このうち(i)に関する研究は、比較的多くなされ⁽²⁾⁻⁽⁴⁾. この分野の重要性が認識され始めている. これに比べ(ii)の分野の研究は、これまで主として医学や生理学および心理学の分野で盛んに研究されているが⁽⁵⁾, 人間の特性を評価し工学的に応用した研究は少ない.

こうした中で、1980年代から始まる Norman が提唱した認知工学研究⁽⁷⁾は、(ii)に関与する研究として特筆される. たとえば、Card らによる研究⁽⁸⁾では人間の認知・理解・反応プロセスをそれぞれ分離して、コンピュータ内のプロセッサを模擬した人間情報処理過程のモデル化がなされている. 一方、Rasmussen ら⁽⁹⁾、Reason⁽¹⁰⁾、Hollnagel ら⁽¹¹⁾による人間信頼性モデルは、人間行動をモデル化しヒューマンエラーの原因究明と防止に貢献している. しかしながら、このモデルも人間固有の非線形性や心理的要因に支配される人間の非線形性挙動を取り入れておらず、そのモデル化には限界がある⁽¹²⁾.

本稿ではこうした状況を鑑みて、著者らがこれまで前述(ii)の事柄に寄与することを目的に進めてきた一連の研究を紹介する. その研究の主な応用対象は外観検査や欠陥検査であり、工業生産プロセスのうちの検査工程に相当する作業である. この作業は生産工程の中では製品価値を左右する重要な工程であるため、今日でも検査作業の最終判定は人間の知覚能力に委ねられているケース

が多い. 一方、外観検査など視覚情報に基づく判定では、検査の速度と精度が検査員の疲労などの要因によって変動するため、工程全体の中でボトルネックになっている⁽¹³⁾⁻⁽¹⁵⁾.

こうした現状にあつて、画像処理や人工知能を援用した画像理解などの新しい技術を検査の自動化・機械化に導入しようとする試みも盛んに行われている. しかし、現段階においては人間による検出能力レベルに到達している自動検査法は極めて少ない. そのため、視覚情報からの判別能力の客観的評価法の研究は、検査員の技量の評価のみならず、人間の判別機構を知的機械へ移転する研究においては不可欠である. かかる見地から、本稿では視覚から得た情報を知識や経験を加えた反応として計測評価する方法を紹介する.

2. 心理の計測

2.1 精神物理学

ある人にとって「物がどのように見えるか」、「音がどのように聞こえるか」は感覚と知覚の問題である. 感覚においては情報の受容と伝達が中心の問題であるのに対し、知覚はその人の感覚を基礎に「見えるものが何であるか」、「聞こえるものが何を意味しているか」を意味する. そのため知覚は、その人の知識とこれまでの経験や好み、価値観を幅広く含んだ認知・認識の問題である. 感覚の研究は古くから心理学の分野で発展し、生得説と経験説などのように今日でも盛んに論争が続けられている⁽¹⁶⁾. ところで、感覚と知覚の研究には二つの側面がある. 一つは研究者が自分自身の感覚・知覚経験に基づいて行う主観的方法であり、他方は光や音などの刺激に対する他人または他の動物の行動を観察し、そこに介在する感覚・知覚過程を研究する客観的方法である.

客観的方法の中でも、物理的現象とそれに対応する心理的事象との間の関係を数量的に評価する精神物理学

*教授 経営工学科

Professor, Dept. of Industrial Engineering and Management

**助教 経営工学科

Research Associate, Dept. of Industrial Engineering and Management

(psychophysics)は特筆すべき方法である。それは、この方法に基づく感覚・知覚の測定法は、刺激強度 x が観察できるかどうか、あるいは2種類の刺激 x_1 , x_2 が主観的に同じかどうか、という質的判断と、 x_1 と x_2 のもたらす感覚の大きさや差はどのくらいかといった量的判断が測れるからである。精神物理学という名称はG. T. Fechner によるものであり、G. T. Fechner はそれまでに E. H. Weber により提唱されていた「われわれは物の間の差異そのものを知覚するのではなく、物の大きさに対する差異の比率を知覚する」とした法則に基づいて、自身の理論を展開し、感覚尺度を作ることを試み、この分野のその後の発展に寄与している⁽¹⁷⁾。

2.2 心理測定曲線

2.2.1 刺激と反応

ある刺激強度 x 以上では感覚を生じ、ある刺激強度以下では感覚をもたささないという境界を刺激閾 (stimulus threshold) と呼ぶ。しかしながら、実際には、刺激強度 x の物理量を小さい方から大きい方へ漸増させてゆく場合、 x を検出できたりできなかったりする境界は非連続なステップ関数型のように明確なものではなく、一般に連続的な単調増加の曲線を描く。すなわち刺激強度 x が強くなるにつれて、その検出確率を P と表すと人間の反応は確率的変動を伴いながら徐々に上昇していく累積分布関数の形状を示すことが知られている⁽¹⁸⁾。

人間の知覚に対する刺激強度を考えるため、物理量 x で刺激強度が表わされるとき、その刺激強度を検出できる確率を P とすると、次の関係がある。

$$P = f(x) \quad (1)$$

式(1)の関数は、心理測定関数 (psychometric function) と呼ばれ、 x を横軸に、 P を縦軸にとって描かれる図1のような曲線を心理測定曲線 (psychometric curve) と呼ぶ⁽¹⁸⁾。刺激と反応の関係は、 P を介して問題にされる場合が多いが、観察したいものは反応そのものではなく、反応カテゴリーの出現確率やその分布型である。ここでは刺激強度 x および検出確率 P の関係を図2のようにとらえ、制御可能な物理量で表される刺激強度 x に対して人間の反応をその検出確率 P として観察する。

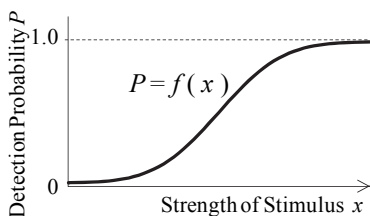


図1 心理測定曲線

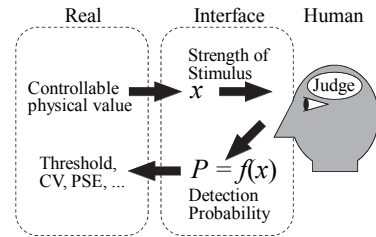


図2 外部からの刺激に対するヒトの反応

2.2.2 反応カテゴリー

精神物理学的測定で観察する反応（あるいは判断）は非常に単純なカテゴリーからなる。被験者が行う反応は、受けた刺激をその知覚特性に応じて、互いに質的に異なる少数のカテゴリーに分けることである。反応カテゴリーの多くは2あるいは3種類である。例えば、ごく弱い光刺激を提示して「見える」、「見えない」のいずれかを報告させたり、二つの音刺激を聞かせて、一方が他方と比べて、音が「大きい」、「等しい」あるいは「小さい」、というような通りの反応を被験者に求める場合が考えられる。

2つの反応カテゴリーを用いる場合を2件法 (method of two categories)、3つの反応カテゴリーを用いる場合を3件法 (method of three categories) という。2件法では刺激が「強い」方向と「弱い」方向、3件法では前述の2つに加え「わからない あるいは 等しい」という反応カテゴリーを加えた3つが一般に用いられる。なお、反応カテゴリーは必ずしも言語的なものでなく、例えばスイッチやダイヤルなどの操作であってもよい⁽¹⁹⁾。

2.3 測定の対象

2.3.1 刺激閾とPSE

刺激強度 x が強くなる方向 (Upper) へ漸増するに伴って、「見える」、「聞こえる」などと判断する反応をU判断、逆に弱くなる方向 (Lower) に「見えない」、「聞こえない」などと判断する反応をL判断と呼び、「わからない あるいは 等しい」 (Error or Equal) という反応はE判断と呼ぶ⁽¹⁸⁾。図3のように横軸に x 、縦軸に検出確率 P とすると、刺激強度 x の漸増に伴ってU判断の反応を示す確率は徐々に増加していき、L判断の反応を示す確率は徐々に減少していく。多くの場合は累積正規分布関数に従う曲線が得られる。このとき、ある値を設定した検出確率 P をもたらす刺激強度 x をその検出確率での刺激閾 (stimulus threshold) と定義する。代表的な刺激閾は検出確率 $P=0.5$ を与える刺激強度 x である。

刺激強度 x の漸増に伴って、U判断とL判断が等しい確

率で反応する刺激強度 x が存在する。その刺激強度 x を PSE (主観的等価点: Point of Subjective Equality) と呼ぶ⁽¹⁹⁾。図3 (a) は2件法の場合、図3 (b) は3件法の場合を図示している。2件法の場合は確率 $P=0.5$ を与える刺激強度 x が PSE となり、3件法の場合の PSE での確率は $P \leq 0.5$ となる。

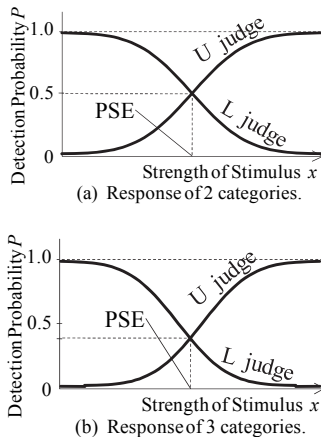


図3 心理測定曲線上の閾値と PSE

2.3.2 弁別閾

比較の基準となる一定の刺激強度を標準刺激、比較の対象となる刺激強度を標的的刺激といい、2つの刺激強度の差異の検出が可能な最小値を弁別閾 (difference limen) と呼ぶ⁽¹⁹⁾。例えば、図4のように標準刺激 x^0 と標的的刺激 x を比較し、主観的に $x^0 \leq x$ であると検出するときの差 $\Delta x = x - x^0$ の最小値が標準刺激 x^0 に対する弁別閾である。

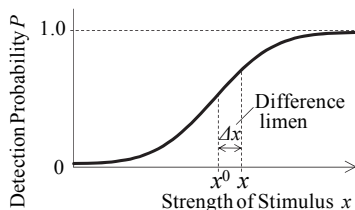


図4 弁別閾

3 欠陥検査に関わる知覚能力の計量的測定

3.1 検査作業における知覚認知特性の評価

Weber (1834) や Fechner (1860) によって提唱された精神物理学では、物理的事象とそれに対応する心理的事象の間の関係を数量的に表現する。人間の知覚特性を外

界からの感覚刺激に対する人間の知覚反応と考えれば、この精神物理学的測定法は測定法・評価法を考える上で十分活用できる。こうした基本的方針に基づいて、欠陥検査を行う検査員の識別能力などの特徴を図5に示すようなプロセスによって計量化する。まず人間が2つの対象物を見て感じた違いを回答させる実験をし、人間の反応を数量的に計測して観測値確率を算出したのち、パラメータ推定によって関数をあてはめてモデル化する。そこから導き出される欠陥検出の閾値などの欠陥検査工程を設計する上で重要となる心理物理量を求める。

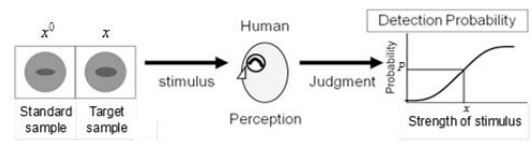


図5 検査員の識別能力を評価するプロセス

ここでは、被験者に提示される画像情報を知覚刺激、その結果得られる被験者の検出確率と刺激の強さの関係を関数化したものを心理測定曲線と定義している。知覚刺激として用いられる対象物はオブジェクトと呼ばれる。実験を通して得られる人間の知覚特性は、その個体が持っている感性の心理表出結果を精神物理学的測定法によって数量化し、普遍的な関係や個体内および個体間の特徴を示すものである。ここで対象にしているのはオブジェクトである欠陥の存在の有無であり、判断の基準となる画像と検査対象の画像を比較して人間が知覚により判断する状況を想定している。

3.2 欠陥検出能力を測る知覚評価実験法

3.2.1 知覚評価実験法の概要

図6には欠陥検査で使用するFRP (繊維強化プラスチック: Fiber Reinforced Plastics) と呼ばれる素材で作られた構造物から抽出された部材の検査画像を示す。この図の検査画像が示すように、FRP材の外観検査で発見される欠陥には、気泡、はく離、クレージング、縮みなど20種類以上のものが挙げられる⁽²⁰⁾。一方検査画像上で見いだされる画像は、均一な欠陥のない様な灰色の画像と、これとは異なる欠陥を含む様々な形状や大きさの介在物を示す画像に二分される。よって欠陥検出作業は、検査画像内に存在する様々な形状や大きさの模様の中から、構造破損に結びつくような重要な欠陥もしくは将来それに成長すると思われるものの存在を検査画像内で発見する作業である。換言すれば、欠陥検出作業における

検査員の検出能力は、正常でない部位の中に存在するオブジェクトに関して、それらの欠陥に関する属性の刺激強度（例えば、大きさ、形など）が破損事故を引き起こす限界の刺激強度より大きいかを判断する識別能力であるといえる。

表1に示す値は、図6に示す実際の外観検査画像を画像処理によって計量し、欠陥に含まれる各種の属性情報を示したものである。これらの値を得るために欠陥画像の分類を行い⁽²¹⁾、欠陥を分類するためのIF-THENルールを表形式で表現したルールテーブル法により分類を行った⁽²²⁾。その結果、欠陥画像に含まれる欠陥を数種類に分類することができたが、画像に含まれている共通の属性値が何であるかは得られなかった。そこで、画像処理として2値化、ノイズ除去、ラベリング処理等を施して欠陥部を抽出し、その画素モーメントから最も固有値の大きい固有ベクトルを楕円の長軸方向として算出し、次に大きい固有値の固有ベクトルを楕円の短軸方向として、欠陥部と同一の面積を有する楕円をあてはめ、面積の大きい順にソートした。その結果、表1(a)に示す上位20組の属性値が得られた⁽²³⁾。これより、欠陥を検出するために利用する図形属性を、長さ(Length)、形状(Shape)、グレースケール(Grayscale)の3属性とし、表1(b)に示す各属性の平均値と標準偏差を得た。これらの数値を用いて、亀裂などの刺激強度と同じ強度を人工的に生成できるように工夫した。

上記の考えに基づき、欠陥検出能力を測る知覚評価実験では、図7に示すように人工的に作成した各属性の刺激強度を次のように定義した。まず図7に示すように、実験において被験者に提示する刺激の特徴を表すものを、楕円の長軸長さ l_1 、短軸長さ l_2 と楕円の濃度 v とし、各属性の刺激強度を表す物理量を実験用の属性強度として式(2)で定義する。ここに l_1 、 l_2 の単位はmm、 v は8bit階調(256段階)のグレースケールを白の0から黒の1までの数値としている。刺激強度が強いほど数値が大きくなるよう定義している。

$$\begin{aligned} x_1 &= l_1, \\ x_2 &= 1 - l_2 / l_1, \quad 0 \leq l_2 \leq l_1 \\ x_3 &= v, \quad 0 \leq v \leq 1. \end{aligned} \quad (2)$$

こうして、これら3つの属性の刺激強度 x_1 、 x_2 、 x_3 それぞれに標準刺激強度と標的刺激強度を生成し、両者をペアとする試料図形を被験者に提示し、被験者の反応を計測する実験を実施する。被験者の判断は心理的要因により変動するため、被験者の反応を数量的にばらつきも含めて計測するため、統計的なサンプル実験を行う。

具体的な方法は、標準試料図形と各種の刺激強度を持った標的試料図形の組み合わせを数種類作成し、これらのセットをランダムな順序で複数回提示し、標準試料図形に比べ標的試料図形の刺激強度が強いあるいは弱いと感じるかを2件法⁽¹⁹⁾の反応カテゴリーとして回答させる。このとき、最終的には各段階の刺激強度を持った標的試料図形と標準試料図形の組み合わせは同じ試行回数で提示されるようにする。その結果、各段階の試行回数中に被験者が標的試料図形の刺激強度の方が標準試料図形の刺激強度より強いと感じた回数を試行回数で除した値を観測値確率として求め、こうして得られた実験結果から、被験者の心理測定曲線を統計的推定によって求める。

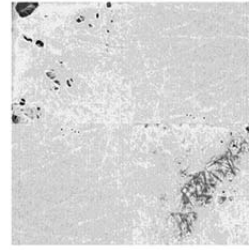


図6 Inspection image data.

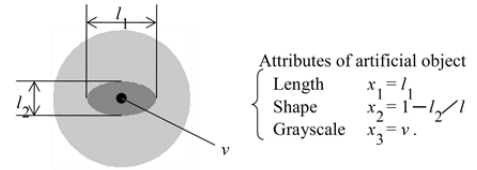


図7 刺激と刺激強度の定義式⁽³⁶⁾.

3.2.2 刺激強度決定法

人間の知覚特性の差が顕著に表れる部分は標準刺激と標的刺激が知覚として等しい効果を持つとき、すなわちPSE（主観的等価点: Point of Subjective Equality）が含まれる範囲であるため、その範囲を重点的に解析することが重要である⁽¹⁹⁾。知覚実験では弱い刺激から強い刺激に物理量が変化すれば検出確率も0から1へ変化すると仮定しており、代表的な刺激閾である検出確率 0.5となる点すなわちPSEが含まれるように標的刺激を設計する。恒常刺激法の原理により、PSEは標準刺激強度の近辺になることから、標準刺激強度を含む範囲を対象とすればよい。

いま、オブジェクトに含まれる i 番目($i=1, 2, 3$)の属性の標的刺激試料の刺激強度について予め複数の強さの段階を設定して実験に用いる。第 i 段階の刺激強度を

x_{ij} と表すとき、この値を各属性の標準刺激強度 x_i^0 と階差 d_i から式(4)で生成する^(37, 38)。

$$x_{ij} = x_i^0 + \left(j - \frac{L}{2} \right) d_i, \quad (3)$$

$$(i=1,2,3, j=1,2,\dots,L),$$

表 1 欠陥検査画像から求めた欠陥データ

(a) Result of Attributes by image processing (top 20 of Area).

No.	Area(mm ²)	Length(mm)	Shape	Grayscale
1	86.939	19.633	0.928	0.597
2	5.130	1.730	0.454	0.586
3	2.928	3.329	0.916	0.472
4	2.771	2.060	0.792	0.570
5	1.936	1.307	0.639	0.549
6	1.839	2.628	0.915	0.534
7	1.827	1.068	0.491	0.484
8	1.573	1.040	0.538	0.561
9	1.331	0.960	0.543	0.571
10	1.222	1.730	0.870	0.552
11	1.174	1.182	0.733	0.572
12	1.137	0.783	0.409	0.575
13	1.125	0.775	0.404	0.571
14	1.065	0.717	0.341	0.574
15	1.016	1.298	0.808	0.570
16	0.871	1.144	0.788	0.483
17	0.835	0.645	0.361	0.530
18	0.823	1.040	0.758	0.447
19	0.787	0.915	0.701	0.571
20	0.774	0.919	0.708	0.571

(b) Statistical values of attributes.

	Length	Shape	Grayscale
Mean value	$m_1=4.544$	$m_2=0.639$	$m_3=0.547$
Standard deviation	$s_1=14.83$	$s_2=0.197$	$s_3=0.422$

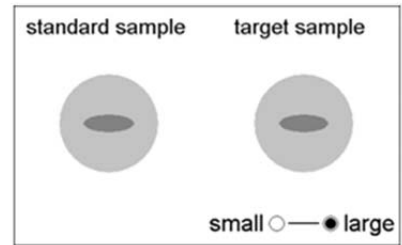
$$x_i^0 = m_i = \text{const}, \quad d_i = \frac{S_i}{L-1} z_i. \quad (4)$$

式(3)、(4)で x_{ij} は、属性 i における第 j 段階での刺激強度を示しており、 L は段階総数を表している。標準刺激強度 x_i^0 は一定値として表1(b)の平均値 m_i とする。標準刺激強度 x_i^0 と標的刺激強度 x_{ij} の差を階差 d_i の $\{j-(L/2)\}$ 倍として設定している。階差 d_i は表1の標準偏差 s_i を変換したものとする。なお、階差 d_i の係数 z_i は、分解能に関する係数で、階差が小さすぎると判別が困難となり、大きすぎると刺激強度の差が顕著になって実験精度が悪くなるため、その調整のための係数である。

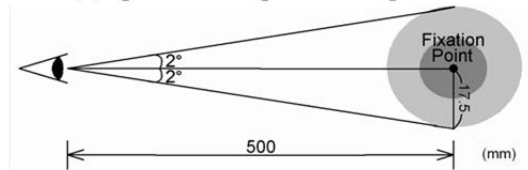
3.2.3 実験に用いる提示試料の設計

本実験に用いた試料のオブジェクトを設計する数値の調整には表1の統計量を利用して、人工的に描く属性の刺激強度を決定した。この考えに基づいて求めた視覚刺激試料のサイズの基準と試料提示イメージを図8に示す。試

料のサイズは、図8(b)に示すように有効な視力の範囲である視野角2度が保持できるようにスケール変換する。薄灰色の円形の背景の中心に検査対象のオブジェクトを配置した。これは、視覚刺激が被験者に提示されて一対比較の像として被験者が感じる際、マッハ効果⁽²⁴⁾などの心理的要素が被験者の感覚にできるだけ介入しないように中央配置のオブジェクトと背景との輝度的要素が被験者の感覚にできるだけ介入しないように、中央配置のオブジェクトと背景との輝度差が小さくなるよう配慮したためである。このため、検査に用いる図形の検査対象部位に相当するオブジェクトは図中に示すような濃灰色の楕円形状として、3.2.1項で示した3つの属性、すなわち「長さ」、「形状」、「グレースケール」をそれぞれ変化させたものを薄灰色の背景の上に重ねた画像を試料とすることとした。なお、背景とする円形画像の濃度としては検査画像から欠陥の存在しない正常部位の濃度に相当するグレースケール値0.4の薄灰色とした。



(a) Specimen for paired comparison



(b) Distance from eye point

図 8 検査の資料サンプルと検査条件^(36, 37)。

標的刺激試料の刺激強度 x_{ij} ($i=1,2,3, j=1,2,\dots,L$)については、その段階数 L を7段階とした。段階数があまり多くなりすぎると実験回数が増大して実験の要する時間が長くなり、また少ないと実験データが少なくなるため解析する際の推定精度の低下が懸念されるとの理由から、7段階が適していると判断した。被験者は図8(a)のように提示された標準刺激試料の刺激強度と L 段階ある標的刺激試料の刺激強度を一対比較し、標的刺激試料の方が刺激強度が強いかわいさを回答する。7段階の刺激強度を設定する標的刺激試料について、提示する図形は3つ全ての属性を含めて描画するが、3種類の属性のうち1種類の属性の数値のみを変化させ、他の属性は標準刺激

強度に固定する．このようにして，比較対象となっている属性以外の属性は標準刺激強度の数値を用いて描画し，標準試料図形と差異があるのは比較対象の属性のみに限定する．

オブジェクトに含む3つの属性の標準刺激試料の刺激強度 x_i^0 ($i=1, 2, 3$) については，それぞれ表1の平均値 m_i とするが，長さの属性のみ前述のスケール変換の影響があるため，所定の範囲に納まるように調整して長さの3.85倍を施している．また，被験者の本来持っている知覚特性を精度よく得るためには，人間の知覚特性の適応的分解能は極めて高いため，はじめは見分けることのできないくらいの微細な刺激強度の差を用いる必要がある．そのため，階差 d_i を決定する係数 z_i は，本実験では，コンピュータ画面の解像度や色の階調表示も考慮して，可能な限り細くなるように調整し $z_1=0.06$ ， $z_2=0.33$ ， $z_3=0.17$ とした．

オブジェクトの長さを属性として有する提示試料の生成のため，その刺激強度を式(5)のように設定した．ただし，このとき他の属性の刺激強度はその属性の標準刺激強度に固定している．

$$x_{1j} = x_1^0 + (j-3.5) d_1 \quad (j=1, 2, \dots, 7), \quad (5)$$

$$x_1^0 = 3.85m_1 = 17.5, \quad d_1 = 0.58,$$

ただし，

$$x_{2j} = x_2^0 = \text{const},$$

$$x_{3j} = x_3^0 = \text{const}.$$

オブジェクトの形状を属性として有する提示試料の生成のため，その刺激強度を式(6)のように設定した．ただし，このときの他の属性の刺激強度はその属性の標準刺激強度に固定している．

$$x_{2j} = x_2^0 + (j-3.5) d_2 \quad (j=1, 2, \dots, 7), \quad (6)$$

$$x_2^0 = m_2 = 0.639, \quad d_2 = 0.011,$$

ただし，

$$x_{1j} = x_1^0 = \text{const}, \quad x_{3j} = x_3^0 = \text{const}.$$

オブジェクトのグレースケールを属性として有する提示試料の生成のため，その刺激強度を式(7)のように設定した．ただし，このときの他の属性の刺激強度はその属性の標準刺激強度に固定している．

$$x_{3j} = x_3^0 + (j-3.5) d_3 \quad (j=1, 2, \dots, 7), \quad (7)$$

$$x_3^0 = m_3 = 0.547, \quad d_3 = 0.012,$$

ただし，

$$x_{1j} = x_1^0 = \text{const}, \quad x_{2j} = x_2^0 = \text{const}.$$

以上のようにして刺激強度の調整を行い，3つの属性 x_i ($i=1, 2, 3$) の刺激強度を設定した．実際の実験においては極めて微少な刺激強度の変化を与える試料を用いている．その数値を表2に示す．図9には人工的に作成して実験に用いた属性「長さ」の標準試料図形および標的試料図形の見本を示す．なお，この図中で描かれている刺激強度は，説明用として実際のものより強度を誇張して表示している．

＝1, 2, 3) の刺激強度を設定した．実際の実験においては極めて微少な刺激強度の変化を与える試料を用いている．その数値を表2に示す．図9には人工的に作成して実験に用いた属性「長さ」の標準試料図形および標的試料図形の見本を示す．なお，この図中で描かれている刺激強度は，説明用として実際のものより強度を誇張して表示している．

表2 検査資料に用いた刺激強度値 (標準試料と標的試料)

i	x_i^0	d_i	x_{i1}	x_{i2}	x_{i3}	x_{i4}	x_{i5}	x_{i6}	x_{i7}
1	17.50	0.58	16.05	16.63	17.20	17.80	18.38	18.95	19.53
2	0.639	0.011	0.611	0.622	0.633	0.644	0.655	0.666	0.677
3	0.547	0.012	0.517	0.529	0.541	0.553	0.565	0.577	0.589

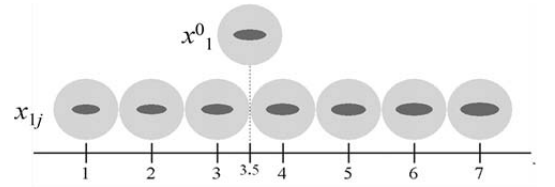


図9 検査に用いた7段階刺激強度の提示試料

3.2.4 実験方法

図8(a)の左側にある標準試料図形の刺激強度は一定とし，これに対して数種類の刺激強度を有する標的試料図形を右側に描き，これを被験者に有限回数提示して被験者の反応を観察する．すなわち，図8(a)のように被験者に対して左側の標準試料図形と右側の標的試料図形の一对比較による刺激強度の差をみた被験者が同一の比較および標準試料図形の組み合わせ回数に対し何回刺激強度が強いと回答するかを記録する．これは，段階 j の刺激強度 x_j に対し，被験者が反復回数 N 回中 n_j 回刺激強度が強いと反応すれば，この被験者は刺激強度に対して確率 $p_j = n_j / N$ で反応したと計測できるからである．よって， j を有限数設定し， x_j を横軸に，観測値確率 p_j を縦軸にプロットすれば図5右側の心理測定曲線を計量的に描くための実験結果が得られる．

実験では，3種類の属性 i ($i=1, 2, 3$) 毎に7段階の刺激強度をもつ図9に示すような標的試料と標準試料の一对比較を行う．このとき，被験者は標的試料の刺激の強さ x_{ij} が標準試料の x_i^0 より“強い”か“弱い”のどちらかを答えるように教示する．1段階あたりの反復数 N の各段階での標的試料による一对比較で $x_{ij} \geq x_i^0$ と反応する回数 n_{ij} が得られるので， n_{ij} / N で $\Pr(x_{ij} \geq x_i^0)$ に相当する観測値確率 p_{ij} を求める．以下は1つの属性について

の実験方法について述べることにするため、属性を示す添字 i を省略する。

1属性における試行回数は、段階数 L と反復数 N の積で $7 \times 30 = 210$ 回の試行とする。恒常刺激法に基づく実験における標的刺激試料の呈示順序は心理的影響を抑えるために一様乱数を基にしたランダムな順序にシャッフルする。採用したシャッフルのアルゴリズムは次のとおりである。なおここで用いる乱数はコンピュータ上での擬似乱数⁽²⁵⁾であるが1000回以下の試行回数であれば擬似乱数の周期性の影響はない⁽²⁶⁾。

- (1) 試行回数分の配列 $T[1]$ から $T[L \times N]$ までを定義し、各配列には値として1から L までの数をそれぞれ L 個ずつ代入する。
- (2) カウンタ用変数 a とランダム用変数 b を定義し、 a の初期値は1とする。
- (3) 一様乱数に基づく関数より1から $L \times N$ までの乱数を発生させ b に代入する。
- (4) $T[a]$ と $T[b]$ との値をスワップ (交換) する。
- (5) カウンタ用変数 a をインクリメント (カウント) する。
- (6) カウンタ用変数 a が $L \times N$ を超えるまで (3) からの手順を繰り返す。

試料の呈示はコンピュータにより制御され、標準刺激試料と標的刺激試料の一对がコンピュータディスプレイ上に表示される。実験データとしては段階毎の観測値確率を得る。1段階あたりの反復回数 N で的一对比較で標準刺激試料 x_0 と標的刺激の段階 j の試料 x_j を一对で呈示し、被験者は x_0 より x_j の刺激強度のほうが「強い」と反応した回数 n_j が得られるので観測値確率は次式で求められる。

$$p_j = n_j / N. \quad (8)$$

恒常刺激法に基づく実験の手順として、1属性における手順を以下に示す。複数の属性を実験する場合はこの手順を属性の数だけ実行する。属性の標的刺激の段階数を L 、1段階あたりの反復回数を N として、試行回数 $L \times N$ 回の順序はランダム順とする。予めその属性の標準刺激の試料 x_0 と標的刺激の試料 x_j を L 段階分用意する ($j = 1, 2, \dots, L$)。

Step 1: 標準刺激試料 x_0 と標的刺激の段階 j の試料 x_j を一对で被験者に呈示する。

Step 2: 被験者は x_0 より x_j の刺激強度のほ

うが「強い」あるいは「弱い」の2つの反応カテゴリーによる2件法で回答する。

Step 3: x_0 より x_j のほうが「強い」と反応した回数 n_j をインクリメント (カウント) する。 ($n_j \leftarrow n_j + 1$)

Step 4: 試行回数が $L \times N$ 回となるまで Step 1からの手順を繰り返す。

Step 5: すべての試行を終えたら各水準の観測値確率 p_j を求める。

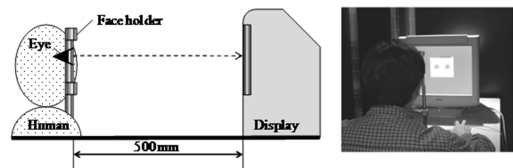


図 10 検査状況の外観と寸法諸元

表 3 提示試料のディスプレイ内での輝度 (cd/m^2)。

Value of grayscale	luminance (cd/m^2)
White 0.000	150.0 ± 10.0
Gray 0.547	29.0 ± 5.0
Black 1.000	0.70 ± 0.05

図10に実験風景を示す。実験はこの図が示すように、あご載せ台に固定された被験者の眼前500 mmの位置に実験用の試料提示用ディスプレイを設置し、実験プログラムにより一对比較実験を行って被験者の反応を記録した。なお、実験プログラムでは、表示される試料の大きさによってディスプレイの画面サイズおよび解像度の違いによって変動しないよう、Microsoft社製Visual Basic 6.0の開発言語仕様にあるtwipと呼ばれる画面上の長さの単位を用いてコーディングした。この単位はディスプレイの画面サイズや解像度に依存しておらず、 $1\text{cm}=567\text{twip}$ 、1インチ=1440twipと定義されており、すべてのディスプレイ上で同じ大きさで表示させることができるよう考慮されている⁽²⁷⁾。これにより、視野角2度で距離500mmの視野となる直径35 mmの真円の背景上に前述の式で求めた刺激強度の標準および標的サンプルが図8(a)に示すように、感能検査での一对標的試料として表示できる実験システムとなっている。また、実験環境としてコンピュータディスプレイについてはCRTとLCD等の表示原理の違いや設定によって輝度が異なるため、同じ条件にするために輝度を表3に示す数値の範囲に調整した。

3.3 実験結果と考察

3.3.1 被験者と教示事項

実験における被験者は、裸眼または矯正の視力が1.0から1.5までの、20才から28才までの49人（男44，女5）とし、実験の目的、内容、回答方法を十分説明したのち同意を得て実施した。実験時の教示によって被験者心理が揺れないように統制するため、被験者には次のように統一的に教示した。

- (1) 3種類の属性毎に実験があること。
- (2) 各属性の反応カテゴリー（2件法）
- (3) 画面中央付近にウインドウが表示され、その中の左に標準刺激、右に標的刺激の図形が表示されること。
- (4) 各属性の標準刺激より標的刺激のほうが強いあるいは弱いを回答すること。
回答はマウス操作で行うこと。
- (5) 回答する際にはあまり深く考え込まないこと。
- (6) 実験開始から終了までの時間（見込み）。

3.3.2 心理測定曲線のパラメータ推定

実験から1属性あたり L 段階分のデータとして、反復回数 N 回中「強い」と反応（U判断）した観測値 n_j （ $j=1, 2, \dots, L$ ）が得られる。「強い」もしくは「弱い」の2件法による反応カテゴリーの観測値 n_1, n_2, \dots, n_L は、平均 p_j 、分散 $p_j(1-p_j)$ の2項分布に従う。

$$P(n_1, n_2, \dots, n_L) = \prod_{j=1}^L \frac{N_j!}{n_j!(N_j - n_j)!} p_j^{n_j} (1-p_j)^{N_j - n_j}. \quad (9)$$

上式において、 p_j は式(2)で定義した確率 P の観測値確率とみなすことができ、これを平均と標準偏差をもつ正規分布の累積分布関数による確率で与える。

$$p_j = \Phi(y) = \int_{-\infty}^{y_j} \phi(t) dt, \quad y_j = \frac{x_j - \mu_x}{\sigma_x}. \quad (10)$$

ここに、 $\Phi(y)$ と $\phi(t)$ は標準正規分布の確率密度関数と累積分布関数である。そのため、観測値確率 p_j が得られた時、これらのデータより母集団分布のパラメータ推定は最尤推定法で行われる。観測回数 n_j を反復回数 N で除し

た観測値確率 p_j に対応する正規偏差 y_j は正規分布

する変量 x_j と直線関係を示すため、その推定値は次式

$$\hat{y}_j = a + bx_j \quad (11)$$

を当てはめ、そこから逆に

$$\hat{y}_j = \Phi^{-1}(p_j) \quad (12)$$

の関係を使って理論確率 P_j を求める。 $\Phi^{-1}(p_j)$ は標準正規分布の累積分布関数の逆関数を表す。すなわち、

$$P_j = \Phi(a + bx_j) \quad (13)$$

の理論確率 P_j がパラメータ a, b の関数で表されるので、式(13)における正規分布関数のパラメータ推定は式(8)を尤度関数とする。

$$\begin{aligned} l(a, b) &= \sum_{j=1}^L \log \frac{N_j!}{n_j!(N_j - n_j)!} + \sum_{j=1}^L n_j \log p_j + \sum_{j=1}^L (N_j - n_j) \log(1 - p_j)^{N_j - n_j} \\ &= \sum_{j=1}^L \log \frac{N_j!}{n_j!(N_j - n_j)!} + \sum_{j=1}^L n_j \log \Phi(a + bx_j) + \sum_{j=1}^L (N_j - n_j) \log [1 - \Phi(a + bx_j)]^{N_j - n_j} \end{aligned} \quad (14)$$

なる対数尤度関数を a, b で偏微分した式を零として連立方程式の解として最尤推定量が求められる。

ところで、この連立方程式は非線形な方程式になるので解析的には解けない。このためこれを解くには数値解法に頼らねばならず、式(15)の漸化式を用いるNewton-Raphson法に基づくアルゴリズムで逐次計算を行い収束解として解く。そうすればこの収束解は最尤推定量になる⁽²⁸⁾。

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 l}{\partial a^2} & \frac{\partial^2 l}{\partial a \partial b} \\ \frac{\partial^2 l}{\partial a \partial b} & \frac{\partial^2 l}{\partial b^2} \end{bmatrix}_k^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial l}{\partial a} \\ \frac{\partial l}{\partial b} \end{bmatrix}_k. \quad (15)$$

式(15)の a, b を k 次の値から $k+1$ 次の値に更新する過程では式(15)の値を用いる。この方法は正規偏差で表現すると直線になる性質を利用して、更新時の新しい正規偏差の候補として式(16)による仮の正規偏差 y'_{jk} （これをプロビットと呼ぶ）を用いて直線を当てはめるため、プロビット法と呼ばれている⁽¹⁹⁾。

$$y'_{jk} = \hat{y}_{jk} + \frac{p_j - \Phi(\hat{y}_{jk})}{\phi(\hat{y}_{jk})}. \quad (16)$$

ここに、 \hat{y}_{jk} は k 次の計算中に当てはめた式(11)の直線から読みとった正規偏差を表している。

人間の感覚実験においては、判別結果にバラツキが生じることを前提としているが、特に熟練者を対象とした場合には、明確な判別によりバラツキが小さい、あるいは

はバラツキがない場合も想定される。その場合は観測値確率 p_i が0または1になるが、それに対応する正規偏差が $\pm\infty$ となるからその計算処理は困難であり、通常の回帰分析ではこれを除いた残りのデータしか扱えない。ところが、ここに示したプロビット法では式(16)によって仮の正規偏差を導入することで $\pm\infty$ となることを回避できる。この特徴によって、観測値確率が0または1になる情報も排除せずに実験から得られた情報全てを含めて計算することができ、人間の感覚実験におけるパラメータ推定法に適している。

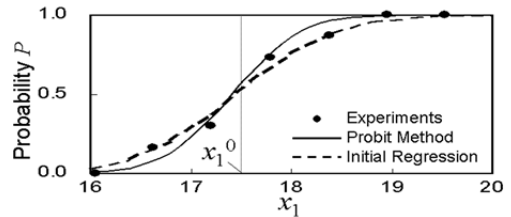
3.3.3 心理測定曲線

実験結果に当てはめる心理測定曲線のパラメータ推定には既述のプロビット法を用い、推定における収束条件は 10^{-5} 以下とした。パラメータ推定における収束計算回数はすべて数回で収束した。プロビット法により推定されたある被験者の心理測定曲線の一例を図11に示す。この図中における縦軸の確率 P は、標的刺激試料の刺激強度 x_{ij} が横軸に示される値をとるときに被験者が標準刺激試料の刺激強度 x_i^0 より「強い」と反応する確率である。換言すれば、 P は「 $x_{ij} > x_i^0$ 」と感じる確率である。心理測定曲線より、標的刺激試料の x_{ij} が大きくなるにつれ、 P も0から1に増加する傾向は、すべての被験者に対し同様であった。しかし、被験者によっては属性の種類によって急激な増加を示す場合とゆるやかな増加曲線を描く場合があり、そのような傾向を定量的にとらえることができた。

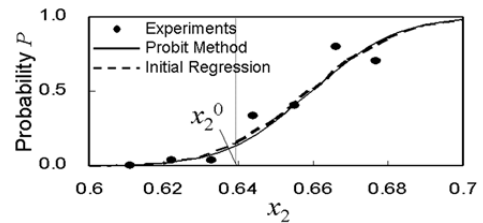
図11には比較のために回帰分析による曲線が描かれている。図中破線で示す回帰分析の曲線よりも、図中実線で示すプロビット法による曲線のほうが0または1の観測値確率が心理測定曲線の推定において、有効な確率重み

として効いている様子がよくわかる。

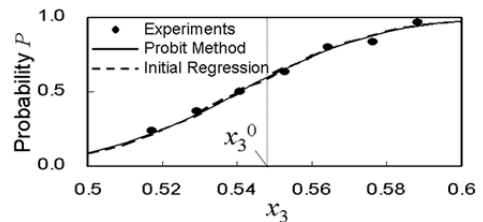
さて、被験者49名に対して得られた心理測定曲線から求まる確率特性値PSE、PSEと標準刺激との差、標準偏差(SD)および変動係数(CV)を比較して、これらの心理特性を大別すると4種類のカテゴリーに分類できるため、そ



(a) Length



(b) Shape



(c) Grayscale

図 11 実験で得られた心理測定曲線の一例

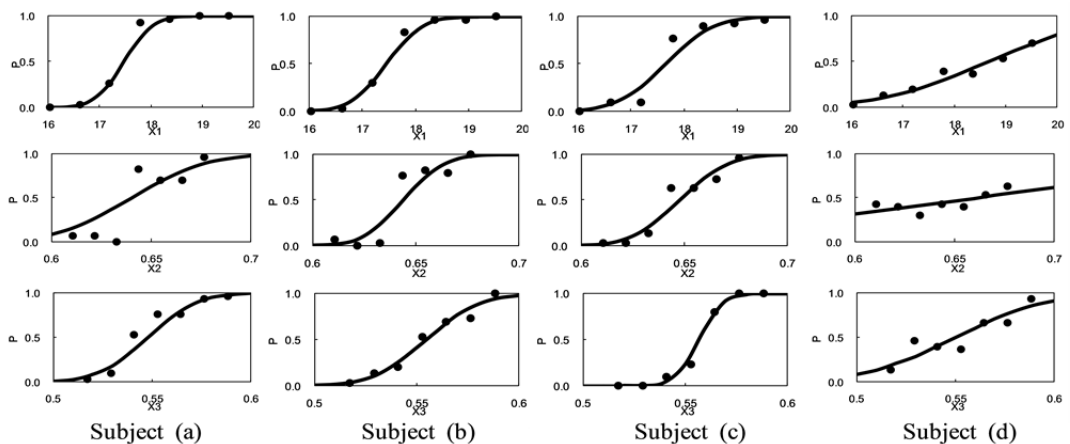


図 12 実験から得られた典型的な心理測定曲線

それぞれの心理特性曲線の挙動を表す被験者の例を図 12 に示す。これらの図における縦軸の確率 P は、標的試料の刺激強度 x_{ij} が横軸に示される値をとるときに被験者が標準試料の刺激強度 x_i^0 より「強い」と反応する確率である。換言すれば、 P は「 $x_{ij} > x_i^0$ 」と検出する確率である。図の曲線は傾きが大きいほど、すなわち標準偏差が小さいほど、その属性に対する被験者の判別精度が高いことを示している。属性毎に標準偏差を小さい順にソートして第一四分位以上を判別精度が高いとし、第三四分位以下を判別精度が低いとした。図 12 の (a), (b), (c) はいずれかの属性に対して判別精度が高かった被験者のグラフで、(d) はいずれの属性も判別精度が低かった被験者のグラフである。全ての属性について判別精度が高かった被験者はいなかった。(a), (b), (c) のようにいずれかの属性に対する判別精度が高い結果となった被験者が多くみられ、図形属性の種類によってその被験者が得意か不得意かという個体の持つ特徴を計量的に示している。

一方で(d)のような判別精度がすべての属性とも低い結果を示す被験者は4人であった。このような被験者は、属性を問わず判断のバラつきが大きいことから、正当な実験参加をしていない可能性も考えられるが、誠意的に実験に協力していたことから、その個体の特性としては、この実験が当被験者にとって判別しづらい感覚刺激の一对比較実験であったと考えるほうが妥当であろう。

このように標準偏差の比較によって、その個体の持つ傾向・特性を読み取ることができる。これらの結果は、本実験方法が各属性に対する被験者の特性が判別精度という計量的な指標で比較できることを示している。

次に各属性に注目して考察する。変動係数(CV)に注目して分類すると、長さに関する属性 x_1 については、平均値を中心として前後に大きな偏りなく分布しているが、それに対して属性 x_2 と x_3 は平均値以下がそれぞれ36人(73%), 35人(71%)で大きく偏っており、変動係数が0.100を超える大きな変動を示す被験者は x_2 が3人(6%), x_3 が6人(12%)いた。このことから、図形の「長さ」を比較することには多くの人間が慣れているため個人差はあまりないが、「形状」や「グレースケール」については、変動係数が非常に大きくなる傾向すなわち判別精度が低くなる被験者が存在し、この属性はその被験者にとって不得意な属性であることが推察される。よって、「形状」や「グレースケール」という属性は「長さ」の属性より被験者によって個体差が出やすい属性であることが考察される。

また、グレースケールに関する属性 x_3 については、図 12 のように図中の被験者 (a), (b), (d) のように属性 x_2 と同様に標準刺激との差が微小なところでは判断の揺らぐ

傾向がある個体と、図中被験者(c)のようにきれいに判断している個体に大別され、これは前述の考察と同様の傾向を示している。属性 x_1 , x_2 が空間的な属性であるのに対して属性 x_3 は光学的な属性であり、グレースケールに関しては個体の視覚特性によって得意な人と不得意な人の差が顕著に表れるものと思われる。

さらに、PSEと標準刺激との差を調べると、他の属性に比べ「形状」に関する属性 x_2 については、ほとんどの被験者が正であり4人(8%)だけが負となった。差が正であるということは、標準刺激よりも鋭い形状を多くの被験者はPSEとしていることを表している。これは、感覚の大きさの増加分は元の刺激の強さと刺激の増加分の比に比例するとしたWeber-Fechnerの法則に従えば、同じ階差で刺激強度が変化しても鋭い形状の方が感覚的な形状の違いはより顕著に出るために、判別しやすい鋭い形状の方向に偏ったものと考えられる。

3.3.3 PSE曲線による個体間変動の評価

個体間変動を検討するために、被験者49人の心理測定曲線より求めたPSEを小さい順にソートし、それらから平均ランク法⁽²⁹⁾によって観測値確率を求め、正規確率紙上にプロットしたものを図13に示す。平均ランクの計算手順は次のとおりである。

Step 1: k 個のデータ (PSE) を小さい順にソートして、1から順番に番号 i を付ける。

Step 2: 平均ランク法における確率 q_i を次式で計算する。

$$q_i = i / (k+1) . \quad (17)$$

Step 3: 横軸にPSEの物理量、縦軸に得られた確率に対応する正規偏差 $y_i = \Phi^{-1}(q_i)$ をプロットする。($\Phi^{-1}(\cdot)$ は正規分布の累積分布関数の逆関数)

Step 4: プロットした点の回帰直線を求め、この線から全体の平均値および標準偏差を算出する。

図13には被験者集団全体としての平均と標準偏差およびその変動係数を図中に示している。前項では標準偏差が小さいほど判別精度が高い点を考察したが、標準刺激強度と主観的な閾値であるPSEとの差も判別の正確性の指標となる。図13(b)から、属性 x_2 は他の属性と比較して標準刺激強度近傍に集中しやすいことがわかる。これは、「形状」の判別が、人間にとってある程度の差があれば他の属性より個体差が出にくい図形属性であることを示唆している。すなわち、「形状」を判別するためには、ある程度の差が必要だが、判別結果に主観的な影響は受

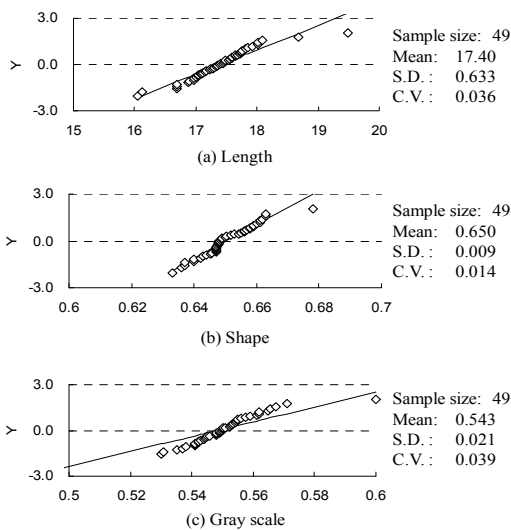


図13 PSEの分布

けにくいという図形属性の特性が推察される。

図13は、非常に重要な情報を提供している。それは、ここで示したPSEの標本分布は個体の変動も含めた特性が評価でき、しかもPSEの統計的性質より、平均値は真のパラメータの一致推定量⁽¹⁸⁾であるため、サンプル数を大きくすれば精度が上がり、自動検査の閾値としても利用できる。したがって、欠陥検査工程の機械化に当たり、熟練者の技能や経験を抽出する方法としても有効であると考えられる。

5 結言

安全・快適・安心を支える技術として重要な役割を果たしている欠陥検査において、優れた能力を発揮する熟練検査員の技能・特性を抽出し、機械に技能移転するためには何が必要であろうか。

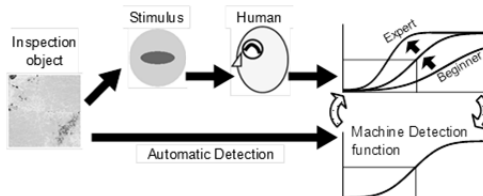


図14 検査員の知覚特性を利用した自動欠陥検査へ

熟練検査員の多様かつ高度な欠陥検出は、欠陥に関わる事象の正しい認識と、正しい判断によるものである。この事象認識と判断という創造的なプロセスを担える媒体は人間である。そこから、欠陥検査の知能化・高度化には人間と機械が調和・融合し、相互に関与し合うとい

う図式が浮かび上がってくる。では、調和するためにはどのような形態が考えられるだろうか。欠陥検査では、判別確率を保証できる閾値を解析的に求めることもできれば、自動検査システムの閾値設定に応用できる。そこで、熟練者の経験・知識・技量を反映した感覚・知覚に基づく閾値分布の特性を抽出できれば、熟練者の知覚特性を活かした欠陥検査工程の自動化システムの開発に寄与できるかもしれない。こうした発想に基づき図14には、熟練者の知覚特性を関数関係で表現し、その関数に基づいた欠陥検出の自動検査システムの閾値チューニングの流れを示している。この図に示すように、熟練者が一般者と大きく異なる点は、欠陥検査におけるその卓越した非線形な知覚特性を表す関数形である。個々の熟練者と一般者との相違点を検討することにも本手法は使用でき、集団の傾向を効率的に評価することも可能であるため、熟練検査員集団全体の知覚特性やその傾向を抽出し、知能機械としての自動検査システムの検出閾値エンジンにその非線形関数を移植することは不可能ではないと考えられる。

なお、本報では紙面の都合で割愛したが、検出精度を上げるために多属性間統計的相関関係を利用したマルチモダリティを利用した検出確率を向上する方法や、精度を落とさず試験回数を少なくして、研究津貼率を予測する方法などについては、文献(36)、(37)を参照いただきたい。

謝辞

本稿で紹介した欠陥検査に関わる一連の研究は、滋賀大学経済学部中川雅史博士ならびに鳴門教育大学林秀彦准教授との共同研究の成果である。本報をまとめるに当たり研究結果の一部を転載するに当たり快諾いただき感謝する。また、研究の一部は、文部科学省ORC整備事業ならびに科学研究費補助金による経済的援助を受けたことを付記し深謝する。

参考文献

- (1) 自然の叡智に学ぶ—バイオメティックスの無限の可能性。
<http://wiredvision.jp/archives/200411/2004111003.html>.
- (2) 宮原誠, “深い感性のテクノロジー”, ビジョン技術の実利用ワークショップ(ViEW2003)講演論文集, 精密工学会(2003), pp. 74-77.
- (3) 徳永修一, 兼田雅弘, 大崎紘一, “手話の指文字の画像処理による認識に関する研究”, 日本経営工学会誌, vol. 43, no. 4(1992), pp. 296-302.
- (4) 佐藤淳, コンピュータビジョナー視覚の幾何学—

- コロナ社, (1992), pp. 1-9.
- (5) 三浦利章, 行動と視覚の注意, 風間書房, (1996), pp. 15-17, 97-105, 154-455.
 - (6) 岡田謙一, 西田正吾, 葛岡英明, ヒューマンコンピュータインタラクション, オーム社, (2002), p. 2.
 - (7) A. Norman, "Twelve issues of cognitive science", *Cognitive Science*, vol. 1, no. 4(1980), pp. 1-32.
 - (8) S. Card, T. Moran and A. Newell, *The Psychology of Human-Computer Interaction*, Lawrence Erlbaum Associates, (1983).
 - (9) J. Rasmussen, "Skills, rules, knowledge signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models", *IEEE Trans. On Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-13, no. 3(1983), pp. 257-267.
 - (10) J. Reason, *Human Error*, Cambridge Univ. Press, (1990), p. 53.
 - (11) E. Hollnagel, *Human Reliability Analysis Context and Control*, Academic Press, (1993), p. 145.
 - (12) J. Rasmussen 著, 海保博之, 加藤隆, 赤井真喜, 田辺文也訳, インターフェースの認知工学 人と機械の知的かかわりの科学, 啓学出版, (1990), p. 203.
 - (13) C. Drury, "The effect of speed of working on industrial inspection accuracy", *Applied Ergonomics*, vol. 4 (1972), pp. 2-7.
 - (14) C. Chi and C. Drury, "Limits to human optimization in inspection performance", *International Journal of Systems Science*, vol. 32, no. 6 (2001), pp. 689-701.
 - (15) C. Chi and C. Drury, "Do people choose an optimal response criterion in an inspection task?", *IIE Transactions*, vol. 30(1998), pp. 257-266.
 - (16) 大山正, 実験心理学—ところと行動の科学の基礎—, サイエンス社, (2007), p. 22.
 - (17) 中易秀敏, 坪野博宣, 前田多章, 前川善一郎, 情報科学—ヒューマン編—, 共立出版, (2002), pp. 69-80.
 - (18) 日科技連官能検査委員会編, 新版・官能検査ハンドブック, 日科技連出版社, (1999), pp. 395-445.
 - (19) 大山正, 今井省五, 和気典二編, 新編 感覚・知覚ハンドブック, 誠信書房, (1994), p. 19.
 - (20) 林毅編, 複合材料工学, 日本科学技術連盟(1971), pp. 19-39.
 - (21) 中川雅史, 中易秀敏, "創発的アルゴリズムを用いた外観検査のための画像分類システム", 甲南大学紀要(理学編), vol. 46, no. 2(1999), pp. 117-136.
 - (22) M. Nakagawa, K. Ohnishi, H. and Nakayasu, "Human-oriented image recognition for industrial inspection system", *Proc. 9th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (IEEE ROMAN2000)* (2000), pp. 52-56.
 - (23) M. Nakagawa and H. Nakayasu, "Human oriented intelligence image processing system for integrated visual inspection", *Proc. 10th Human-Computer Interaction International (HCI2003)* (2003), pp. 814-817.
 - (24) 大西昇, 生体情報処理, 昭晃堂, (2001), p. 60.
 - (25) 脇本和昌, 乱数の知識, 森北出版, (1970), p. 85.
 - (26) 伏見正則, 乱数, 東京大学出版会, (1989), p. 122.
 - (27) Microsoft Visual Basic 6.0 ヘルプ, マイクロソフト.
 - (28) 大野豊, 磯田和男, 新版数値計算ハンドブック, オーム社, (1990), p. 778.
 - (29) 塩見弘, 信頼性工学入門, 丸善, (1972), p. 35.
 - (30) R. Chin and C. Harlow, "Automated visual inspection: A survey", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 4, no. 6(1982), pp. 557-573.
 - (31) A. Rosenfeld and A. Kak 著, 長尾真監訳, デジタル画像処理, 近代科学社, (1995), pp. 427-431, 1995.
 - (32) C. Huang, T. Cheng and C. Chen, "Color images segmentation using scale space filter and markov random field", *Pattern Recognition*, vol. 25, no. 10 (1992), pp. 1217-1229.
 - (33) 豊田秀樹, 非線形多変量解析—ニューラルネットによるアプローチ—, 朝倉書店, (1996), p. 56.
 - (34) H. Madsen and S. krenk, N. Lind, *Methods of Structural Safety*, Prentice-Hall inc., (1986), pp. 108-109.
 - (35) 室津義定, 米澤政昭, 邵曉文, システム信頼性工学, 共立出版, (1996), pp. 93-102.
 - (36) 中川雅史, 中易秀敏, "マルチモダリティによる欠陥検出確率の評価法", 材料, vol. 54, no. 1(2005), pp. 2-7.
 - (37) H. Hayashi, M. Nakagawa and H. Nakayasu, "An evaluation method of human property using psychometric function in sensory test", *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, vol. 24, no. 4(2007), pp. 259-267.
 - (38) 中易秀敏, "物理量としての感性の計測評価法—欠陥検査における知覚特性の評価法—", 科学と工業, vol. 81, no. 11(2007), pp. 545-550.