表面粗さ感覚計測における個人内情報処理*

野 呂 影 勇**

Individual Information Process in Feeling Measurement of Roughness of Turned Surface

Kageyu NORO

The purpose of the present investigation is to clarify individual differences in subjective roughness comparison task. To analyzing individual differences in point of relationship between physical and sensory measurements, the multidimensional paired comparison model is proposed. Using the model, data which were obtained through the following experiment were analyzed. The experiment was designed for investigation of correspondence between both measurements. 18 Test pieces (BsBM) with turned surfaces were prepared in which R_{rms} , mean spacing of profile irregularity peaks, W_{EA} and radius of profile peaks were factorially combined. Seven skilled labors in an optical industry were served as subjects in Experiment. By the model analysis, individual differences are obtained and represented in the profile patterns. For testing the validity of the model, Carroll-Chang's internal vector model analysis of same data was carried out. As results, the individual differences were described as vectors in a multidimensional feature space. Configuration of Eigen vectors (test pieces) derived from the internal vector model analysis are clearly shown that principal physical characteristics which affected the human judgment are R_{rms} and mean spacing of profile irregularity peaks. Relation between both models are discussed. Practical aspects of the findings of the present investigation are also discussed.

1. 緒 言

金属その他加工面の表面粗さは、寸法精度、面の外観、あるいは滑り面での摩擦、摩耗やはめ具合などに関係するので古くから研究の対象となっている。表面粗さの表示方法は JIS で規定されており、これに関する測定方法や測定器も多くある。しかし、実際の作業現場では表面粗さの程度や可否は表面粗さ標準片と試料片を人間の感覚で比較判定することが多い。その比較判定は、人間の視覚、触覚に依存していると考えられ、以前と比べると面の精度の要求が非常に高くなりつつある今日、感覚による判定がどこまで正確か、感覚による判定の精度を上げるにはどうすればよいかなど、多くの問題が人間の感覚に関連して生じている。人間の感覚による判定はかなり個人間の差異が結果に生ずることがわかっており、当然それが人間による表面粗さ測定の精度を低くする大きな原因となっているからである。本研究では、官能検査による表面粗さ測定の際に、人間の内部の触知覚情報処理として、多次元一対比較が行われていると仮定して解析する。この結果により、物理的測度と感覚量*** との

間の対応を個人のレベルでより厳密につけることが可能となる。したがって、人間の感覚による表面粗さ判定精度の向上と、より人間の感覚に対応した物理的測度のための情報を得ることができる。これが本研究の目的である。

2. 触知覚判定における情報処理過程
——本研究の仮説

表面粗さの物理的測度で、しかも人間の感覚的測定に関係が深いと思われるものをいくつか選ぶ。本研究では R_{rms} ：自乗平均平方根粗さ（本論文では、以後 R と略称する）

$$R_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (h_i - \bar{h})^2}$$

ただし、 $\bar{h} = \sum h_i / N$ 、 N ：測定点の総数、 h_i ：断面曲線の長さ方向の i 点に対応する高さ。

$\bar{T}$ ：平均ピッチ（本論文では、以後 M と略称する）

$$\bar{T} = \frac{\sum T_i}{n}$$

ただし、 n ：頂の数、 T_i ： i 点における頂の間隔。

W_{EA} ：ころがり円中心線うねり（ W と略称する）

* 原稿受付 昭和51年3月23日。昭和50年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和50年11月22日）にて発表。

** 正会員 慶応義塾大学工学部（横浜市港北区日吉町832）

*** 人間の感覚器官を用いて対象を測定するとき、対象に対する感覚器官の応答値。

$$W_{EA} = \frac{1}{L} \int_0^L |f(x) - h|$$

ただし、 $f(x)$: 曲率半径 4.5 mm のフィーラで表面のでこぼこ上をたどった時のところがり円うねり曲線、 L : 測定長、 h : 断面曲線の平均線。

表面粗さの山の形状: 山の先端がとがっているか、丸いか (P と略称する)

という 4 つの物理的測度をとりあげた。

一般に人間の官能に関連の強い物理量は、 R_{rms} と平均ピッチであるとの指摘が奈良¹⁾、斎藤²⁾らの報告にある。しかし、それはある人間の集団についての傾向であって、個人別に追跡してみると必ずしもそうでない場合も出てくる。そればかりか、標準片と試料片の間の一対比較では、一つの物理特性に差がなければ他の物理特性の間の差を探索し、差があればそれをもって表面粗さの判定をするといった特徴抽出を行っていると考えられる。

本研究では次に述べるような表面粗さを測定・判定する人間に多次元一対比較判断モデルを仮定している。

2.1 表面粗さ判定のモデル (多次元一対比較モデル)

(1) M 次元の特徴空間を考える。各試料は M 次元の特徴空間のベクトルとして示すことができる。

$$\bar{S}_i = [f_{ji}]$$

は j という特徴を有する i 個目の試料のベクトル表示である。ここで、 $1 \leq j \leq M$ とする。 f_{ji} は感覚計測値とする。

(2) 標準片と試料片を比較することは、同時並行的な決定を各試料について行うことである。すなわち、 $\bar{S}_k$ と $\bar{S}_i$ (ただし、 $1 \leq i, k \leq n$) を比較することは、 M 回の並行的バイナリー決定 (+1 または -1) を行うこととする。

(3) 比較における各バイナリー決定は、特徴次元 j について、標準片 f_{ji} と試料片 f_{jk} の間の感覚的尺度上の距離によって行う。

(4) 検出された距離が前もって定められた域値 T_j と等しいか、それよりも大(小)であればバイナリー出力 x_j は +1 (又は -1) となる。

(5) M 回の並行的バイナリー決定の結果 M 組 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_M$ がそれぞれ $q_1, q_2, q_3, \dots, q_M$ なる値を持つことになる。ただし、 $-1 \leq q_k \leq 1$ である。

(6) 二つの試料を比較していずれか一方を指定するには、個人ごとの重み関数で行う。このモデルの決定機構を図 1 に示す。

本モデルの経時的変化はオートマトンによって行われるが、この点に関しては文献³⁾に説明がある。

図 1 多次元一対比較による並行バイナリー決定機構

3. 実験*

3.1 試料**

試料は黄銅の旋削加工面で、 R_{rms} 、ピッチ、 W_{EA} 、山の頂の形状を計画的に組合わせた計 18 個である。これら各試料の物理特性を表 1 に示す。

3.2 技能者による表面粗さ判定法

光学工業の表面粗さ判定技能者 50 名に Scheffé の一対比較法により、試料を触覚で判定させた (データ解析結果は、奈良¹⁾が報告している)。50 名のうちからランダムに 7 名を抽出してデータとした。測定者には 18 個の試料の総組合せ 153 対

をランダムに提示し、右が左よりどの程度粗いか、または滑らかであるかを判定してもらう。この場合の判定のカテゴリーは、「右が左より確かに粗い」「幾分粗い」「全く差がない」「幾分滑らか」「確かに滑らか」の 5 つである。また、比較する 2 枚の試料は見えないようになっており、指先のみで判定する。全測定時間は平均 85 min であった (1 組合せ当たり平均 33 s)。

4. 解析 1; 物理的測度と感覚量の対応づけ——多次元一対比較モデルによるシミュレーション

本実験は、第 2 章のモデルでの特徴次元 $M=4$ の場合である。人間の触知覚情報処理を解析するため、実験結

* この実験は、表面粗さ研究会 (代表: 蓮沼, 奈良) が行ったものである。

** 試料片は、東京都工業技術センター 機械部精密測定研究室製作のものである。

i, k : 試料 No. (ただし, $0 < i, k \leq n$), M : 物理特性, P_{iM} : i 試料の M という特性に関しての値, Q : 一対比較結果 (+3~-3), sig. : $\text{sign}(+, 0, -)$

図2 多次元一対比較モデルによる物理特性と感覚計測値の対応づけフローチャート

果をデータとして, このモデルのシミュレーションを行った. シミュレーション過程を図2に示す. このシミュレーションでは, 試料 i と k の対で, 物理特性間の比較 R_i と R_k , M_i と M_k と逐次に比較を行う(図中 $P = P_{iM} - P_{kM}$). そして, 判定者の判断(図中 Q)と表面粗さの大小関係が一致する物理特性を「その判定者の判断に影響した物理特性」と推定する. 推定結果からさらに個人別に解析を進める.

4.1 表面粗さ測定の個人別特徴のプロフィール

各測定者が全測定時間の中で, どの物理特性をどの程度用いて(これがカテゴリザの重みに相当するものである. 一般にこれを判断のパターンという)判定を行っているかを集計し, 円形グラフに示したのが図3である.

図3をみると個人によってかなり違うところが認められるし, その一方で共通性が認められる点も少なくない.

4.2 判定カテゴリー(評点)の個人別特徴

18個の試料による組合せ153対のなかには, 当然客観的にいって判定の容易なものと困難なものがある. 判定の容易な組合せとは, 試料のもつすべての物理特性

図3 測定者別判断のパターン
目盛は構成比率

に大小関係が認められ, しかもそれらがすべて同一方向を向いていること, 言い換えれば一方の試料に比べてもう一方の試料が, どの物理特性においても粗い方向にあるということである. このようにすべての物理量の差が明確である組合せは37対ある. この37対についてのみ, 個人別の評点を集計する. 判定のカテゴリーとしては, 「確かに粗い」であり, 評点としては+2(または-2)となることが期待される.

$|\pm 2| \times 37 = 74$ 点が評点の合計の期待値である. これは37対の判定が正確に行われた場合であって, 実際にはこれより低い値となるのが普通であり, あまり低い値であれば判定の確かさが低いことになる. 7人の測定者についてのこれら37対の評点の合計を表2に示す.

4.3 判断パターンと評点の対比

測定者の判断パターン(図2)と評点の個人別特徴を対比してみると, 評点の合計が最も期待値に近く, 妥当な判断をしている測定者 a_2, a_3, a_5, a_6, a_7 の判断パターンを検討してみると, 特に平均ピッチと R_{rms} の配分のバランスが比較的とれていることがわかる. 評点の合計が

表2 個人別評点の合計
(期待値 74 点)

測定者	評点の合計
a_1	33
a_2	52
a_3	52
a_4	30
a_5	58
a_6	49
a_7	50

表3 入力データ S_{ij}

測定者 \ 試料	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
a_1	10	11	8	2	2	-4	3	-6	-9	4	7	2	-1	-3	-4	-7	-7	-8
a_2	11	13	5	4	1	-7	14	-5	-10	13	3	-5	0	-5	-11	-6	-3	-12
a_3	12	12	13	3	7	-7	12	-9	-9	5	2	-1	0	-7	-9	-6	-7	-11
a_4	9	6	10	7	3	4	10	1	-7	11	-5	-6	-2	-10	-11	-3	-7	-10
a_5	15	13	10	9	-2	-6	9	-4	-10	11	0	-3	4	-8	-10	-12	-5	-11
a_6	16	10	2	1	-2	-7	16	3	-13	5	1	-3	-1	-4	-10	0	-3	-11
a_7	14	16	5	2	1	-7	11	-6	-12	13	4	-5	-1	-2	-11	-6	-3	-13

期待値から遠くはなれている測定者 a_1 と a_4 は、いずれも平均ピッチと R_{rms} 系のバランスが悪く、適正な情報をとらえていず、判断基準が他の判定者と異なっていると考えられる。

5. 解析2; 試料と測定者の関係の空間的把握

——解析1のチェック

解析1の結果は一对比較法によるデータの限界もあって、人間の判断構造に大きな仮定が含まれ、その前提のもとに解析したものである。したがって、得られた結果を全く別な方法でチェックしたい。ここでは多次元尺度構成法のうち、ベクタ法 (internal-vector model) を適用してみた。

本モデルでは、因子分析法と同様、 n 個の対象の布置 $\{P_{ij}\}$ を m 次元空間 ($m < n$): E^m の中に構成する (入力データは因子分析法と違い、対象間に定義された広義の距離)。測定値 d_{jk} による行列 D に最もよく一致する (最も簡潔な) m 次元空間での $\hat{d}_{jk}$ による行列 $\hat{D}$ を得ることが目的である。したがって、 E^m はユークリッド空間であり、 $\hat{d}_{jk}$ の尺度は d_{jk} の尺度を引きついでいることになる。そこで、各試料が m 次元ユークリッド空間に布置されたとして、今度はその空間において測定者が判定を行うと仮定する。測定者 i はベクトル y_i を判定軸として定め、試料 j に対する表面粗さの度合を内積

$$S_{ij} = y_i' x_j = \sum_{l=1}^m y_{il} x_{lj} \quad (1)$$

として判定すると仮定する。式 (1) は、測定者 i が判定するときの重みづけの数値と考えられる。したがって解析1での結論にあるように、測定者間の相違が物理量間のバランスの違いにあると考えることができる。すなわち、それはベクトル y_i の角度 θ の違いとして表されるはずである。ただし、

試料 $j, (k, l, m) = 1, 2, \dots, n$

測定者 $i = 1, 2, \dots, N$

次元 (直交座標軸) $t, t' = 1, 2, \dots, r$ (物理特性に相当

表4 固有値と寄与率

次元	1	2	3	4	5
固有値	84.560	18.344	17.646	11.832	9.815
寄与率	0.883	0.042	0.038	0.017	0.012

する)

$X = (x_{it})$, $n \times r$, 行ベクトル x_j が試料 j に対応

$Y = (y_{it})$, $N \times r$, 行ベクトル y_i が測定者 i に対応

$\hat{S} = (\hat{S}_{ij})$, $N \times n$, $\hat{S}_{ij}$ は試料 j に対する測定者 i の評価尺度値* の推定値である。

ここで、 N 人の測定者の n 個の試料に関する判断を示す $N \times n$ のデータ行列 $S = (S_{ij})$ が与えられたとして、このとき S を最小二乗法の意味で

$$S \approx Y'X$$

と近似し、かつ指定した階数 r を持つような $r \times n$, $r \times N$ の行列 X, Y を定める。ところで、本実験のデータは対比較データなので、入力として次のように距離データに変換して用いる。

$$S_{ij} = \sum_{k=1}^{18} \delta_{ijk}$$

$$\text{ただし} \begin{cases} j < k \rightarrow 1 \\ k > j \rightarrow -1 \\ j = k \rightarrow 0 \end{cases}$$

すなわち、表3を得る。計算過程で得られた固有値**と寄与率を表4に示す。表4によれば固有値の収束性はかなり高い。また、得られた X の固有ベクトルから第1次成分と第2次成分に関して、試料を布置すると図4のようになる。図上の試料の相対的位置を試料の物理特性と関係づけて観察すれば、平均ピッチの軸と R_{rms} の軸を図のように決めることができるが、平均ピッチの軸と R_{rms} の軸とは直交していないことがわかる。表4の固有

* 感覚量を表す尺度。心理学上の定義に従う。

** 行列 A にベクトル v を掛けた結果が、掛けたベクトルの λ 倍、すなわち $Av = \lambda v$ となるようなベクトルを行列 A の固有ベクトルといい、 λ を固有値という。

図4 ベクタモデルによる試料の布置

図5 ベクタモデルによる測定者の布置

値の収束状況などをあわせて考えれば、第2次成分まで、すなわち平均ピッチと R_{rms} の二つの物理特性で、試料の表面粗さを表すことができよう。ただ、第3次成分も完全に無視できるほど小さいわけではなく、 W_{EA} がそれに関係していると考えられなくもないが、不明確である。

次に、 Y の固有ベクトルから第1次成分と第2次成分に関して測定者を布置すると図5となる。図によれば、測定者 a_1 と a_4 を除く5名がまとまって布置されており、この5名の判断には高い共通性があることが推察される。同時に、測定者 a_1 と a_4 は他の5名とは異なった判断をしており、しかも a_1 と a_4 の間には大きなへだたりが存在することがわかる。すなわち式(1)において、測定者 i を固定すれば、内積は各試料より、測定者 i についてのベクトル y_i 上への射影に相当する。図5により、測定者 a_1 と a_4 では、ベクトルの方向が大きく異なり、測定者 a_1 は平均ピッチが、測定者 a_4 は R_{rms} が、それぞれ表面粗さを判断する物理特性として大きなウェー

表5 測定者 a_1 と a_4 の表面粗さ評価値

測定者 試料 No.	a_1	a_4
1	0.380	0.275
2	0.408	0.179
3	0.328	0.322
4	0.089	0.230
5	0.096	0.101
6	-0.243	0.086
7	0.179	0.351
8	-0.280	0.012
9	-0.296	-0.198
10	0.117	0.334
11	0.197	-0.182
12	0.061	-0.193
13	0.034	-0.032
14	-0.126	-0.327
15	-0.167	-0.352
16	-0.284	-0.103
17	-0.207	-0.197
18	-0.286	-0.306

トを持って用いていることがわかる。ちなみに、測定者ベクトル y_i 上への試料の射影は、その測定者の表面粗さについての評価尺度を構成していることになる。射影値（これは、測定者の評価尺度値に類似するもので、以後仮に評価値と呼ぶ）を測定者 a_1 と a_4 について示せば、表5のようになり、上に述べたことがこれから明らかである。

6. 結論——対象の具体的把握と個人的情報

第2章の触知覚判定における情報処理についての仮説に基づいた検討を第4章解析1で行った。これについての検証を目的として、第5章解析2を行った。

- (1) 解析1では対象の物理特性を軸として解析を行っており、解析2では物理特性は潜在化している。
- (2) 解析2では多次元尺度構成法の解析上の前提からいって、かなり対象の物理特性と個人の特性との関係を推測することが可能であり、加えて、個人別の評価値が算出できることも都合がよい。
- (3) 過去の奈良¹⁾らによる解析では、分散分析の結果主因子(R_{rms} , 平均ピッチ, ……)の組合せの違いによって効果に有意差が認められている。この点は、解析1では測定者別判断パターンにおける物理特性の組合せ($R \times M$, $R \times W$, ……)に対するウェイトによって、同様に推察される。しかし、解析2の多次元尺度構成法ではモデルの制約上、この点は不明である。

- (4) 以上の点から、この種の解析では、解析 1 のアプローチを中心として、その検証と補助的情報を得る上からベクタ法を併用することがよいと考えられる。
- (5) 次に、本研究の知見からどのような道が開けるかを考えてみる。
- a) 第 1 に、第 2 章で述べた多次元対比較判定のモデルにもとづくさらに詳しい解析については、個人別物理特性の重みづけ情報と評価値をモデルのカテゴリライザに与え、順序づけられた全試料対についてのシミュレーションを行うことにより、オートマトンの構造、言い換えれば判定時の変動的階層構造の推測が個人ごとに可能と思われる。この点についてはさらに研究を進めてみたい。
- b) 第 2 に、実際的にはこれが最も大切な点であるが、本研究の解析と加工法の関係である。本研究の実験に参加した技能者は、本来旋削加工の専門職であり、表面粗さの判定には加工法との関係が少なくない。技能者に滑らかな表面を加工せよとの指示を与えた場合、通常旋盤のバイトが同じであれば、送りピッチを細かくするであろうし、逆にバイトを変えることで行うのであれば、バイトのコーナ半径を大きくすることを考える。これは材質その他の条件

が複雑に関与するので実験にはそう単純なことではなく、個々の事例において種々の選択が可能であり、そこに個人差が発生する。本研究の結果から測定方法の教示、訓練あるいは加工法の教育など種々の対策を個人別に考えることが可能になる。

謝 辞

長年、表面粗さについて研究上貴重な示唆をいただきました計量研究所奈良治郎部長に謝意を表します。論文中、解析 1 については、日本専売公社中央研究所赤木敏子研究員、解析 2 については、製品科学研究所犬飼幸男、斎藤幸子両研究員に御協力と御助言を仰ぎました。また、論文をまとめるに当たっては、慶応義塾大学工学部林喜男教授に討論をいただきました。

参 考 文 献

- 1) 奈良治郎：表面粗さの官能検査，昭和 47 年度精機学会秋季大会前刷（1972）。
- 2) 斎藤幸子，永村寧一：第 3 回官能検査シンポジウム，日科技連（1973）103。
- 3) 野呂影勇：表面粗さの感覚的情報処理——測定者のモデルの解析，精密機械，42，12（1976）1109。
- 4) J. D. Carroll: Individual Difference and Multidimensional Scaling, *Multidimensional Scaling, I*, Seminar Press, New York & London, (1972)。