

触覚系微細テクスチャー弁別の感覚情報処理機構

Tactile-information-processing mechanisms of fine-surface-texture discrimination

宮岡 徹*, 中村敏男**

Tetsu MIYAOKA and Toshio NAKANURA

Abstract: The purpose of the study was to investigate the low-pass filter characteristics and to evaluate the validity of “amplitude-information hypothesis” proposed by Miyaoka et al. for the mechanisms of fine-surface-texture discrimination in human tactile perception. Two experiments were performed. In Experiment 1, six diffraction gratings were used as stimuli. Their wavelengths were 6.7, 13.3, 25.0, 33.3, 50.0, and 75.2 μm . Six subjects participated in the experiment. The stimuli were moved on the index finger in three moving velocities and the subject judged roughness of the stimuli with two-alternative, forced-choice technique. Psychometric functions, calculated from the experimental data, clearly showed the existence of the low-pass filter. In Experiment 2, five abrasive papers with particle sizes between 1 μm and 30 μm were used as stimuli. Six subjects, the same ones as in Experiment 1, participated in Experiment 2. Patterns of psychometric functions obtained in the experiment were similar to each other in spite of the changes of stimulus moving velocities. The results supported the amplitude-information hypothesis.

1. はじめに

ヒトは手で対象に触れることにより、その表面についての情報を取得することができる。この機能を触テクスチャー知覚と呼ぶ。触テクスチャー知覚は、基本的に2種類に分けられる¹⁻⁴⁾。第1は粗いテクスチャーの知覚である。粗いテクスチャーの知覚は、眼で見てもわかるような表面の凹凸パターンを触ることにより知る働きである。第2は微細テクスチャーの知覚である。微細テクスチャーの知覚は、視覚ではわからないような細かな粗さ・滑らかさの違いを、触ることによって知る働きである。粗いテクスチャーの知覚は、1~数mm程度の構成要素が作り出すパターンの弁別に関連している。これに対し、微細テクスチャーの知覚は1~100 μm 程度の構成要素の作り出す、粗さ・滑らかさという言葉であらわされる特性の弁別に関連している。両者は弁別する要素の大きさが非常に違う。両者とも刺激表面上で指を動かすことによりテクスチャーをよく知覚できるが、粗いテクスチャーの知覚では、指を静止させてもぼんやりと粗さがわかるのに対し、微細なテクスチャーの知覚では、指を静止させると粗さ・滑らかさの弁別がまったくできなくなる。これらのことからわかるように、粗いテクスチャー知覚と微細テクスチャー知覚にはそれぞれ異なった情報処理メカニズムが関与していると考えられる。

粗いテクスチャーの知覚に関しては、数多くの研究が実施され、その知覚に関与する機械受容単位が遅順応I型単

位(SA I)であることが明らかにされた⁵⁻¹¹⁾。微細なテクスチャー知覚については、宮岡らが精密研磨紙を刺激として用いる実験を行い、粒子サイズが1~40 μm の場合、弁別閾は2.4~3.3 μm となることを発見した¹²⁾。触覚系はローパスフィルタ特性を持ち、微細なテクスチャー情報をそのまま取り込むことはできない。そこで宮岡らは、触覚系がフィルタを通過した情報のうち、刺激表面凹凸の振幅情報のみを用いてテクスチャーの粗さ弁別を行っているとする「振幅情報仮説」を提案した¹²⁾。この仮説によれば、刺激表面情報が触覚系のフィルタを通過できなければ、刺激表面のテクスチャーは知覚できないことになる。そこで宮岡は、回折格子を刺激として用い、触覚系のフィルタ特性を調べる実験を行った¹³⁾。その結果、触覚系に確かにフィルタが存在すること、そしてその通過上限周波数は約600Hz付近にあることを明らかにした。ただしこの実験は、刺激に触れる指を被験者が能動的に一定速度で動かす方法で実施された。訓練したとはいえ、被験者の指移動速度にはかなりのばらつきが見られ、それが実験結果にノイズを混入させていると推定された。

本研究では、被験者の指を固定し、ステッピングモータを用いて皮膚上で刺激を動かすという受動触条件下で微細テクスチャー知覚の絶対閾を求めることにより、触覚系のフィルタ通過の上限周波数を定めることを実験目的とした。あわせて、触覚系がローパスフィルタ特性を持つとき、微細テクスチャー知覚に刺激の振幅情報が用いられるとする振幅情報仮説の妥当性について、実験に基づいて検討することも本研究の目的であった。

2007年3月6日受理

* : 理工学部情報システム学科

** : 大学院理工学研究科

2. 触覚系ローパスフィルタのモデルと振幅情報仮説が妥当と考えられる理由

まず、ローパスフィルタの上限周波数付近の刺激を含むような刺激群を提示した場合、心理測定関数はどのようなパターンを示すかについて説明する。

今、それぞれ1つの波長成分のみを持つ2つの刺激の粗さ・滑らかさを比較する事態を考える。被験者が2肢強制選択法により応答するとし、心理測定関数 y を

$$y = \frac{1}{1 + \exp(-x + s)} \quad (1)$$

とおく。ただし、 s は標準刺激波長、 x は比較刺激波長をあらわす ($s > 0$, $x > 0$)。さてある一定速度で刺激に触れた場合、波長 x_0 以下の刺激が引き起こす皮膚振動の周波数は触覚系のローパスフィルタ通過上限値を上回るので刺激情報はフィルタを通過することができず、表面テクスチャーは知覚されない。また刺激波長が x_0 より長ければ、刺激情報はローパスフィルタを通過することができ、表面テクスチャーが知覚される。このように仮定した場合、以下の結果を導くことができる。

$s \leq x_0$ で且つ $x \leq x_0$ の場合、

$$y = \frac{1}{1 + \exp(-x_0 + x_0)} = \frac{1}{2} \quad (2)$$

$s \leq x_0$ で且つ $x > x_0$ の場合、

$$y = \frac{1}{1 + \exp(-x + x_0)} \quad (3)$$

$s > x_0$ で且つ $x \leq x_0$ の場合、

$$y = \frac{1}{1 + \exp(-x_0 + s)} \quad (4)$$

$s > x_0$ で且つ $x > x_0$ の場合、

$$y = \frac{1}{1 + \exp(-x + s)} \quad (5)$$

式(2)~(5)の結果をグラフにあらわすと、Fig. 1 のようになる。Fig. 1 の縦軸は標準刺激より比較刺激の方が粗いと判断した比率、横軸は比較刺激波長の相対値である。

標準刺激の波長が絶対閾 x_0 以下の場合、比較刺激波長も x_0 以下であれば、式(2)から比較刺激の方を粗いと判断する確率は0.5となる。また、比較刺激波長が x_0 を越えた場合、比較刺激を粗いと判断する比率が増加し、式(3)から心理測定関数は上に凸の増加関数となる。なお、標準刺激波長が絶対閾 x_0 以下ならすべての心理測定関数は互いに重なり合う。

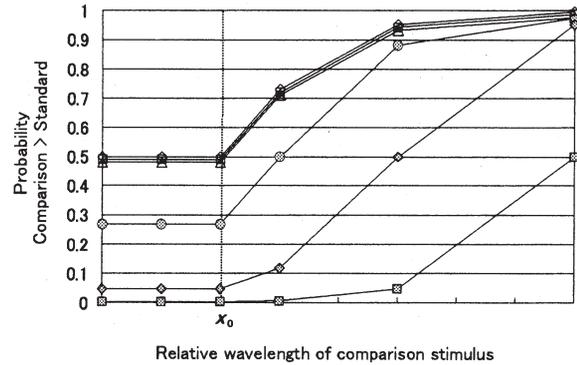


Fig. 1. Simulation results based on the equations (1)-(5). The vertical axis shows the probability that comparison stimuli are judged rougher than standard stimuli. The horizontal axis shows relative wavelength of the comparison stimulus. Each symbol in the figure represents the results of each standard stimulus, respectively. The x_0 in the figure shows an absolute threshold.

標準刺激が絶対閾 x_0 を越えると (Fig. 1 の灰丸印)、波長が x_0 以下の比較刺激の方を粗いと答える比率は0.5を下回る (式(4))。比較刺激波長が x_0 より長くなると、比較刺激の方を粗いと答える比率が増加し始める (式(5))。標準刺激の波長がさらに長くなると (灰菱印, 灰四角印)、比較刺激波長 x_0 以下で比較刺激の方を粗いと判断する比率はますます減少するが (式(4))、比較刺激波長が x_0 を越えると心理測定関数が増加に転じるというパターンは変わらない (式(5))。

さて、このようなローパスフィルタが存在する場合、触覚系はどのような情報を用いて微細テクスチャーの弁別を行っているのだろうか。これに関して、宮岡は上記の「振幅情報仮説」を提案した¹²⁾。ここで振幅情報仮説について考える前に、よく提案される微細テクスチャー弁別に関する他の仮説がなぜ有り得ないのかについてまず述べ、その後に振幅情報仮説について説明する。

微細テクスチャー弁別を可能にする機構としてまず思いつくのは、摩擦の大小を手がかりとして弁別作業を行っているとする仮説である。刺激表面の粗さが違うと摩擦の大きさも異なる。この摩擦係数の大きさの違いを滑らかさの違いとして知覚しているという可能性が考えられる。しかし、精密研磨紙にシリコンオイルを塗布し、摩擦係数を小さくしても実験結果には影響しないので¹²⁾、この仮説があやまりであることがわかる。

皮膚機械受容単位の神経発射密度であらわされる時系列情報が微細テクスチャーの情報を脳に送るという仮説もある。しかし、この仮説も成り立たない。われわれが刺激表面の粗さ・滑らかさを知ろうとするときには、刺激上で指をある程度の速さで移動させながら刺激表面を探索する。例として、30 mm/s の速度で指を動かしながら粒子サイズ 3 μm と 30 μm の刺激の弁別を行う場合を考えてみ

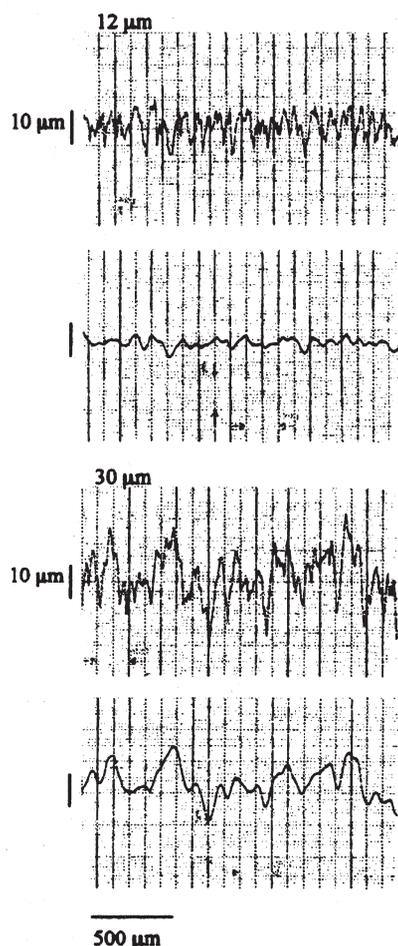


Fig. 2. Cross-section profiles of abrasive papers observed with the contact profile meter (Kosaka, SE-30D) with and without a filter. The top two profiles are the cross sections of 12- μm particle abrasive paper. These two profiles show the same part of the same abrasive paper. The upper of the two shows the profile without a filter. The lower shows the profile passed through a filter. The filter passed waves with wavelengths which were greater than 250- μm . The bottom two profiles are the cross sections of 30- μm abrasive paper. The upper shows the profile without a filter. The lower shows the profile passed through the same filter used in the 12- μm abrasive paper¹²⁾.

よう。3 μm と 30 μm の刺激を、それぞれ波長 3 μm と 30 μm の正弦波で近似すると、3 μm の刺激には 10 kHz、30 μm の刺激には 1 kHz の神経発射が対応する。ところが、皮膚機械受容単位の神経発射上限値は 1 kHz 未満なので、理論的には 3 μm と 30 μm の刺激は区別できないことになる。しかし、実際には 3 μm と 30 μm の刺激の弁別は非常に容易である。従って、触面の微細テクスチャー知覚には神経発射の時系列情報は用いられていないことになる。

皮膚における機械受容単位の分布に基づく空間的情報によって微細テクスチャー弁別が行われているとする仮説もある。しかし、皮膚機械受容単位の密度は最も高密度の手指末節でも 250/cm² 程度であり^{14,15)}、このとき各受容

単位の間は約 600 μm 離れていることになる。これでは 3 μm と 30 μm の刺激を弁別することはできない。機械受容単位の種類によっては、1 本の神経線維に数個以上の機械受容器が接続していることもあり、この場合各機械受容器間の間隔は多少小さくなるが、弁別にはまったく不十分である。もし、機械受容器が非常に規則正しく並んでいれば、神経発射の位相差情報を利用することも可能であるが、実際には機械受容器はそうに配列されていないので位相差情報を利用することはできない。

以上のような仮説が成り立たない状態で、皮膚機械受容単位の能力の範囲内で粗さ・滑らかさ弁別が可能な情報処理機構として、宮岡らは振幅情報仮説を提案した。それは、触覚系が対象表面の凹凸情報のみを用いて微細テクスチャーの弁別を行っているとする仮説である。精密研磨紙の表面凹凸を表面粗さ計で観察した結果は Fig. 2 のようになった。Fig. 2 の上段の 2 つは粒子サイズ 12 μm 、下段の 2 つは粒子サイズ 30 μm の精密研磨紙表面の観察結果である。いずれの粒子サイズについても上側は計測された表面凹凸をそのまま表示し、下側は波長 250 μm のローパスフィルタを通した結果を表示している。双方の上側の波形を見ると、いずれも直径 12 μm あるいは直径 30 μm の粒子が敷き詰められた形にはなっていないことがわかる。精密研磨紙表面は、さまざまな波長成分を含んだ複雑な波としてあらわされている。通常、ヒトの皮膚や神経系は高い周波数成分をカットし、低周波数成分しか利用することができない。しかし、12 μm と 30 μm のそれぞれの粒子サイズについてローパスフィルタを通過した下側の波形をみると、いずれもフィルタを通過した長波長成分に表面凹凸の振幅情報は保存されている。すなわち、精密研磨紙の粒子サイズが小さければ表面凹凸の振幅も小さくなり、粒子サイズが大きくなれば表面凹凸振幅も大きくなる。そこでこの振幅情報を用いれば、触面の微細テクスチャーを弁別することは今まで明らかにされた皮膚機械受容単位能力の範囲内で十分可能である。

本研究では、基本波長より長い波長を含まない表面(回折格子)とさまざまな波長成分を含む表面(精密研磨紙)を刺激として用い、微細テクスチャーの粗さ弁別実験を行い、触覚系がどのようなローパスフィルタ特性を持つか調べることを実験目的とした。また、実験結果に基づき、振幅情報仮説が成り立つかどうか検討することも本実験の目的であった。

なお、本研究では 2 つの実験(実験 1、実験 2)を実施したが、実験中の学習効果による影響をキャンセルするため、実験 1 と実験 2 を同時並行的に実行した。

3. 実験 1

実験 1 の目的は、触覚系のローパスフィルタの特性を調べることであった。そのために、刺激として回折格子を用いた。3 種類の互いに異なった速度で刺激を動かして手指

末節に提示し、微細テクスチャー弁別の心理測定関数を求めた。回折格子は、基本波長成分より長波長の成分を含まないので、基本波長成分がローパスフィルタを通過したとき、はじめて粗さの弁別が可能となる。そこで、実験条件を適切に設定すれば、刺激移動速度が変化するとき、ローパスフィルタ通過限界波長も変わり、それに伴う心理測定関数のパターン変化が観察できるはずであった。

3.1 方法

(1) 被験者： いずれも 20 歳代の男子大学生 5 名および大学院生 1 名が被験者として実験に参加した。被験者はすべて心理物理実験の経験者であった。

(2) 刺激： 刺激には 6 種類の回折格子を用いた。回折格子はいずれも 1 辺 30 mm の正方形で、厚さは 10 mm であった。回折格子表面には断面が三角波状の溝が刻まれており、公表値から計算した溝の波長は、それぞれ 6.7, 13.3, 25.0, 33.3, 50.0, 75.2 μm であった。回折格子をレーザー顕微鏡で観察した結果、これらの計算値が満たされていることを確認した。実験時には、6 種類の刺激から 2 つを選び、刺激装置に被験者から見て上下（遠近）方向に、また刺激移動方向が溝方向と直交するようにセットし、粗さ判断を求めた。

(3) 実験装置： 刺激提示の実験装置として、ステッピングモータ（Oriental Motor : PX534MH-B）とそのコントローラ（Melec : 870V1）を使用した。コントローラはパーソナルコンピュータに接続されており、コンピュータからステッピングモータへ駆動信号を送ることにより刺激の動く速さを制御した。

ステッピングモータには刺激をセットするための刺激固定装置を取り付けた。そしてこれらを、被刺激部位である手掌部を載せるためのアルミニウム製の支持台内に設置した。支持台の中央部には 10 mm \times 18 mm の穴が 2 つ、互いに穴の中央位置間距離が 50 mm 離れるようにあけてあった。上記のように、2 つの穴は、被験者から見て上下（遠近）方向に配列されていた。被験者は穴に指をあてて、穴の直下を通過する刺激に触れ、判断を行った。

(4) 実験手続き： 6 種類の刺激から 2 つを選んで組み合わせる場合、同一刺激を含む重複組み合わせは 21 種類となる。刺激の提示位置効果をキャンセルするために組み合わせ数を 2 倍とした結果、すべての組み合わせの数は 42 種類となった。

粗さ判断に際し、視覚的・聴覚的手がかりをなくすために、被験者はアイマスクを着用し、また、実験室内にはスピーカにより白色雑音を提示した。被験者は、利き手を実験装置の手掌支持台に載せ、支持台中央部の 2 つの穴に交互に示指を置き、穴の直下を一定速度で移動する刺激に触れて、2 つの刺激のうちどちらを粗く感じるかを 2 肢強制選択法により答えた。また、刺激に触る際に、試行ごとに摩擦の大きさが変化することを防ぐために、刺激表面にシリ

コンオイル（信越シリコーン、KF-96-10CS）を塗布した。1 組の刺激提示時間は最長で約 24 秒、試行間隔は 20 秒とした。各組の刺激提示は、被験者の応答が得られ次第打ち切った。また、刺激移動速度は、5 mm/s, 10 mm/s, 20 mm/s の 3 種類とした。それゆえ、刺激移動速度が 5 mm/s の場合、刺激は 1 判断時間中に最大 2 往復、10 mm/s の場合は最大 4 往復、20 mm/s の場合は最大 8 往復するように設定した。判断に際して、被験者が 2 つの刺激のどちらに何回触れるかといったことは制限しなかった。

各被験者は、3 種類の刺激移動速度条件とすべての刺激の組み合わせについてそれぞれ 8 回の実験試行を実施したので、各被験者の全実験試行回数は、 $3 \times 42 \times 8 = 1008$ 回となった。なお、実験中は皮膚感度を落とさないために実験室温度を 25 \sim 27 $^{\circ}\text{C}$ に保った。

3.2 結果

各被験者の応答を集計し、各標準刺激、各移動速度について心理測定関数を計算した。それらの結果を刺激移動速度条件ごとにグラフ化したものを Fig. 3 に示す。Fig. 3-(a) は刺激移動速度が 5 mm/s, Fig. 3-(b) は刺激移動速度が 10 mm/s, Fig. 3-(c) は刺激移動速度が 20 mm/s の結果である。いずれの図においても、図中の菱印、四角印などは標準刺激の波長をあらわす。例えば、Fig. 3-(a) の、白菱、白四角、灰三角、灰丸、灰菱、灰四角の各印は標準刺激波長がそれぞれ 6.7, 13.3, 25.0, 33.3, 50.0, 75.2 μm の場合の心理測定関数をあらわしている。また、各図の横軸は比較刺激の波長、縦軸は標準刺激より比較刺激の方を粗いと答えた比率である。

Fig. 3-(a), 3-(b), 3-(c) の 3 つの図を見るとわかるように、刺激の移動速度が 5 mm/s から 20 mm/s と速くなるにつれて心理測定関数のパターンが変化していくことがわかる。各図の心理測定関数の左端の、特に白菱印、白四角印を結ぶパターン部分をみると、Fig. 3-(a) (5 mm/s) では平坦に近いパターンがわずかに観察されるだけだが、Fig. 3-(b) (10 mm/s) では比較刺激波長（横軸）6.7 \sim 13.3 μm の部分に平坦部分がはっきりあらわれている。Fig. 3-(c) (20 mm/s) では、平坦部分がさらに 25 μm にまで延びている。すなわち、刺激速度が速くなると平坦部分が長波長方向に延長するという結果が観察された。

また、刺激移動速度 5 mm/s では、標準刺激が 6.7 μm （白菱印）の心理測定関数と 13.3 μm （白四角）の心理測定関数は互いに重なり合い、他方、標準刺激 25 \sim 75.2 μm の心理測定関数群とは離れている。しかし、刺激速度が 10 mm/s になると、標準刺激 25 μm の心理測定関数が 6.7, 13.3 μm の心理測定関数に接近してくる。さらに、刺激速度 20 mm/s では、標準刺激 6.7, 13.3, 25 μm の心理測定関数が互いに重なり合い、これに標準刺激 33.3 μm の心理測定関数が接近するというパターンが見られた。

3.3 考察

実験 1 の結果をあらわす Fig. 3-(a), 3-(b), 3-(c) からわか

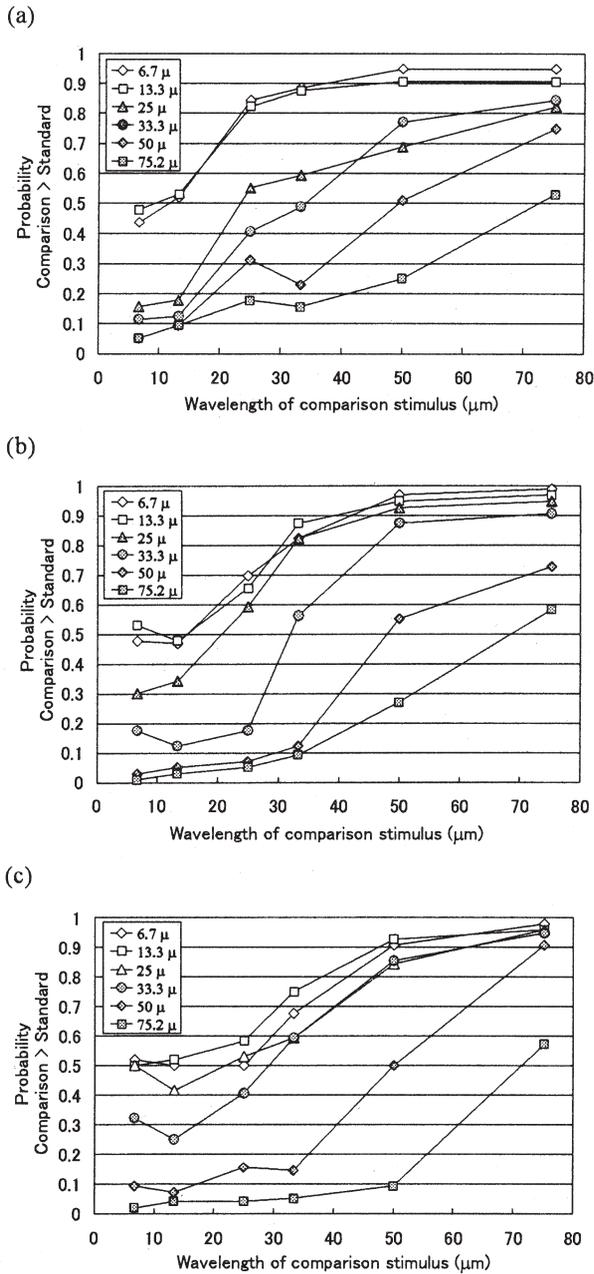


Fig. 3. Psychometric functions based on the data of the diffraction grating discrimination experiment. Moving velocities of stimuli are 5 mm/s, 10 mm/s, and 20 mm/s from top to bottom. The vertical axis in each figure shows the probability that the comparison stimuli were judged rougher than the standard stimuli. The horizontal axis shows the wavelength of comparison stimuli. Each symbol in the figure represents the results of each standard stimulus, respectively. The unit of the values in the legend is micrometers.

るように、刺激の移動速度が変化すると心理測定関数のパターンも変化する。これは何を意味するのであろうか。Fig. 1 の説明部分で述べたように、2 肢強制選択法により判断する場合、標準刺激、比較刺激ともにそのテクスチャーの粗さが絶対閾以下であると、両刺激を区別できないので、心理測定曲線は平坦で比較刺激の方を粗いとする判断

の比率は 0.5 となる。標準刺激値が絶対閾以下で、比較刺激が絶対閾より大きくなると、心理測定関数は上に凸の増加関数となる。この場合、すべての心理測定関数は互いに重なり合う。

さて、Fig. 1 に示したように、標準刺激が粗さ検出の絶対閾を越え、比較刺激が絶対閾以下の場合、心理測定関数は平坦とはなるが、比較刺激の方を粗いとする比率は、0.5 を下回り、標準刺激表面が粗くなるほど 0 に接近していく。また比較刺激の粗さが絶対閾を越えると、心理測定関数は上に凸の増加関数となる。標準刺激が絶対閾を越えている場合、各心理測定関数パターンは標準刺激の粗さに依存し、それらが異なれば互いに重なることはない。

さて、Fig. 3 を見ると、実験結果が式(2)~(5)を基本的に満たしていることがわかる。刺激移動速度 5 mm/s の場合は、標準刺激 6.7 μm と 13.3 μm の心理測定関数が重なり合い、標準刺激 25 μm の心理測定関数はこれらからかなり離れているので、微細テクスチャー検出の絶対閾は 13.3 μm 付近にあることがわかる (Fig. 3-(a))。刺激移動速度 5 mm/s で刺激波長 13.3 μm の場合、皮膚表面に提示される振動周波数は 376 Hz となり、触覚系ローパスフィルタ通過の上限値は 400 Hz 付近と推測される。

刺激移動速度 10 mm/s の場合、やはり標準刺激 6.6 μm と 13.3 μm の心理測定関数は重なり、標準刺激 25 μm の心理測定関数がこれらに接近している。ここから、微細テクスチャー検出の絶対閾は 13.3 μm と 25 μm の間でかなり 25 μm に近いところにあると推測できる。刺激速度 10 mm/s の場合、刺激波長 13.3 μm と 25 μm で皮膚表面に提示される振動周波数は、それぞれ 752 Hz, 400 Hz となるから、結局ローパスフィルタの通過上限周波数は 400 Hz 以上で、400 Hz にかかなり近い所にあることになる。

刺激移動速度 20 mm/s の場合は、標準刺激波長 6.7, 13.3, 25 μm の心理測定関数が重なり合い、標準刺激 33.3 μm の心理測定関数がそれらに接近している。微細テクスチャー検出絶対閾は 25 μm と 33.3 μm の間で、33.3 μm にやや近い所にあることになる。刺激移動速度 20 mm/s の場合、刺激波長 25 μm と 33.3 μm で皮膚表面に提示される振動周波数は、それぞれ 800 Hz と 601 Hz であるから、ローパスフィルタ通過の上限周波数は 600 Hz よりやや高周波数の部分に存在することになる。

上記の結果から、触覚系には確かに通過周波数の上限値を決めるローパスフィルタが存在することがわかり、その上限値もおおよそ 400~600 Hz の間にあることが明らかとなった。

4. 実験 2

実験 1 では、触覚系にローパスフィルタが存在することが明らかとなった。実験 2 では振幅情報仮説が成り立つか否かを検討する。実験 2 では、精密研磨紙を刺激として使用し、固定された手指末節表面上で、刺激を 3 種類の互い

に異なった速度で動かして、微細テクスチャー弁別の心理測定関数を測定した。精密研磨紙はその粒子サイズに関わらずさまざまな波長成分を含むため、刺激情報が触覚系のローパスフィルタを通過した後も、粒子サイズに対応した振幅成分を含む。そこで、それらの振幅情報を用いれば非常に小さい粒子サイズでもテクスチャー弁別が可能となるはずである。また、刺激移動速度を変えて、ローパスフィルタを通過できる刺激波長を変化させても、刺激振幅情報を弁別に用いている限り、得られる心理測定関数には変化がないはずと予測された。

4.1 方法

(1) 被験者： 実験1と同一の被験者が実験2にも参加した。

(2) 刺激： 刺激には粒子サイズ1, 3, 9, 12, 30 μm の5種類の精密研磨紙(住友3-M製)を用いた。これらの精密研磨紙を1辺30 mmの正方形にカットし、1辺30 mm, 厚さ10 mmの正方形木材片に貼って実験に用いた。実験時には、5種類の刺激から2つを選んで、刺激装置に被験者から見て上下(遠近)方向にセットし、粗さ判断を求めた。

(3) 実験装置： 実験1と同一の装置を用いて、実験2を実施した。

(4) 実験手続き： 5種類の刺激から2つを選んで組み合わせる場合、同一刺激を含む重複組み合わせは15種類となる。刺激の提示位置効果をキャンセルするために組み合わせ数を2倍とした結果、すべての組み合わせの数は30種類となった。

粗さ判断に際し、視覚的・聴覚的手がかりをなくすためのアイマスク着用、スピーカによる白色雑音提示は、実験1と同様とした。また、被験者が利き手を実験装置の手掌支持台に載せ、示指で刺激に触れて判断する方法や1組の刺激提示時間、試行間隔も実験1と同様とした。実験2においても、刺激移動速度は5 mm/s, 10 mm/s, 20 mm/sの3種類とした。

各被験者は、3種類の刺激移動速度条件とすべての刺激の組み合わせについてそれぞれ5回の実験試行を実施したので、各被験者の全実験試行回数は、 $3 \times 30 \times 5 = 450$ 回となった。なお、実験中は皮膚感度を落とさないために、実験1と同様に実験室温度を25~27°Cに保った。

4.2 結果

実験1と同様の方法で各被験者の応答を集計した。それらを刺激移動速度条件ごとにグラフ化した結果をFig. 4に示す。Fig. 4(a)は刺激移動速度が5 mm/s, Fig. 4(b)は刺激移動速度が10 mm/s, Fig. 4(c)は刺激移動速度が20 mm/sの結果である。いずれの図においても、図中の灰菱、灰四角、灰三角、灰丸、濃灰菱の各印は、標準刺激粒子サイズがそれぞれ1, 3, 9, 12, 30 μm の心理測定関数をあらわす。また、各図の横軸は比較刺激の粒子サイズ、縦軸は標準刺激より比較刺激の方を粗いと答えた比率である。

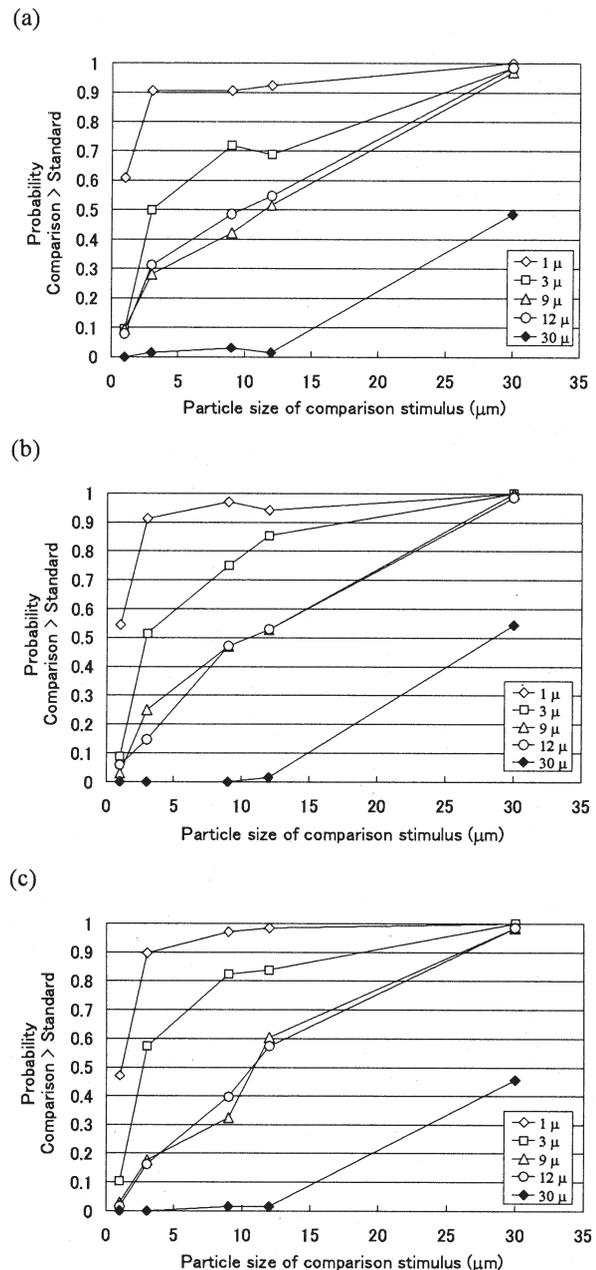


Fig. 4. Psychometric functions based on the data of the fine-surface texture discrimination experiment. Moving velocities of stimuli are 5 mm/s, 10 mm/s, and 20 mm/s from top to bottom. The vertical axis in each figure shows the probability that the comparison stimuli were judged rougher than the standard stimuli. The horizontal axis shows the particle sizes of comparison stimuli. Each symbol in the figure represents the results of each standard stimulus, respectively. The unit of the values in the legend is micrometers.

3つの図を比較してみるとわかるように、刺激の移動速度が変化しているにもかかわらず、同一の標準刺激(例えば粒子サイズ1 μm)で得られた心理測定関数パターンはほとんど変わらなかった。また、刺激速度の変化につれ心理測定関数のパターンが一定方向に変わっていくという実験1で観察された現象も、実験2では観察されなかった。

4.3 考察

精密研磨紙を刺激として用いた場合の微細テクスチャー弁別の心理測定関数は、被験者の指に触れる刺激の移動速度が5 mm/sから20 mm/sに変化してもほぼ同一パターンを示した。これは、言い換えれば精密研磨紙の粗さ弁別力が刺激の動く速さに影響されないということを示していた。こうした結果はわれわれが日常的に体験する印象と一致している。われわれが何らかの対象に触って、その表面の粗さ・滑らかさを知ろうとする場合、触る速度をかなり変えても対象の粗さ・滑らかさの印象が大幅に変わってしまうことはない。

ヒトが微細テクスチャーを知覚する場合には、指と刺激表面の間に動きが必要である。また、ヒトの触覚系はローパスフィルタ特性を持っているので、必然的に触覚系に入力される周波数情報には上限値が存在することになる。この制限にも関わらず、Fig. 4から明らかのように、触覚系は粒子サイズ1 μm の精密研磨紙表面と粒子サイズ3 μm の精密研磨紙表面の粗さの違いを弁別できる。指と刺激の間の相対的速度が30 mm/sなら、3 μm の正弦波は10 kHzということになるから、これでは触覚系のローパスフィルタを通過することはできない。結局、実験1の結果から、被験者が微細テクスチャー弁別に利用している情報は、周波数がおおよそ600 Hz以下でしかも刺激の移動速度に依存しない情報ということになる。この情報を用いて粗さ弁別を行う場合に最も可能性が高いと考えられるのは、刺激の凹凸情報を用いることである。Fig. 2の説明部分で述べたように、1~40 μm の粒子については、250 μm 以下の波長をカットするフィルタを通過した後でも、粒子サイズが大きくなるほど表面凹凸振幅が大きくなるという単調関係が維持されていた¹²⁾。被験者がローパスフィルタを通過した刺激の凹凸情報を利用して微細テクスチャー弁別を行っているなら、今まで明らかにされてきた触覚系の能力の範囲内で、実験2の刺激の粗さの相互弁別は十分可能である。しかも、刺激表面の凹凸情報を用いているなら、その弁別力は、精密研磨紙の場合、刺激移動速度が極端に速かったり遅かったりしない限り、速度に依存せず同じレベルとなるはずである。実験2の結果はこの推測を裏付けるものであった。

5. 総合的考察

実験1の結果から、ヒトの触覚系はローパスフィルタ特性を示すこと、そしてその通過上限周波数がおおよそ400~600 Hzの間にあることが明らかとなった。また、実験2から、刺激の移動速度の遅速にかかわらず精密研磨紙の表面テクスチャー弁別能力には変化が見られないことがわかった。

刺激が回折格子の場合、刺激移動速度が20 mm/sとなると波長25 μm の刺激の振動はローパスフィルタを通過することができず微細テクスチャーは知覚されなかった。こ

れに対し、刺激が精密研磨紙の場合は、刺激サイズが1 μm と3 μm であってもそのテクスチャー弁別は十分可能であった。波長25 mmの回折格子の全振幅は10 μm であるから、その凹凸は触覚系が十分検出できる範囲にある。しかし、20 mm/sで指と刺激が相互移動すると、振動周波数がローパスフィルタ通過の上限値を越えてしまうために振幅情報は入力されず、従って知覚されなかった。これに対し、例えば3 μm の精密研磨紙表面は、Fig. 2に示したようにさまざまな波長成分を含むために、その情報の一部はローパスフィルタを通過することができた。その結果、フィルタを通過した情報を利用することにより、粒子サイズ3 μm の刺激のフィルタ通過後の凹凸の全振幅が3 μm 未満であるにも関わらず、微細テクスチャーを知覚することが可能となった。

本研究の結果から、ヒトが微細テクスチャーを知覚するためには、まず触覚系に入力される情報が触覚系のローパスフィルタを通過できなければならないことが明らかとなった。刺激凹凸振幅が十分皮膚機械受容器の知覚できる大きさであったとしても、振動周波数レベルでフィルタを通過できなければ、その情報は利用されない。また、触覚系のローパスフィルタを通過しさえすれば、刺激振幅がかなり小さくても微細テクスチャーが知覚できる。宮岡の最近の測定では、微細テクスチャー知覚の絶対閾は粒子サイズ0.8 μm 付近にあることが示されている(未発表データ)。

本研究の結果から、微細テクスチャー知覚を可能にする触覚情報処理メカニズムとして、刺激の振幅情報を利用するなら、現在明らかにされている触覚系の能力の範囲内で微細テクスチャー知覚が可能であることが明らかとなった。回折格子のような特殊な目的のために精密に作られた人工物を除くと、われわれの周囲にある対象の表面は多様な波長成分を含んでいる。しかも、それらに触れるときの指の運動速度も、手指表面の発汗状態も絶えず変化している。このように不安定要素の多い入力条件において、触覚系の微細テクスチャー知覚能力を一定に保つために安定性のある刺激振幅情報を用いるという仮説は、蓋然性がかなり高いと考えられる。

6. 結論

本研究は、触覚系の微細テクスチャー知覚におけるローパスフィルタの特性を調べることで、および微細テクスチャー知覚を可能にする機構としての振幅情報仮説の妥当性を検討する目的で実施された。回折格子を刺激として用いた実験の結果、ローパスフィルタが確かに存在すること、実験で得られた心理測定関数のパターンはモデルとして提案されたシミュレーションパターンと基本的に一致すること、またローパスフィルタを通過できる上限周波数が400~600 Hzの間にあることが明らかとなった。また、精密研磨紙を用いた実験から、微細テクスチャー知覚を可能にする触覚系の情報処理機構として提案された振幅情報

仮説を支持する証拠が得られた。

今後は、本研究を踏まえて、刺激波長範囲を適切に設定し触覚系のローパスフィルタについてさらに正確なデータを得ることが重要と考える。また、本研究で提案したモデルを洗練させ、全範囲で微分可能な関数を得た上で、実験データに基づいてパラメータ値を決定し、ローパスフィルタ通過上限周波数を計算で求めることが望ましい。

振幅情報仮説については、触覚系の情報処理能力からみて可能な他の仮説も考慮しつつ、その成立範囲等についてさらに検討を加えていく必要がある。

謝辞

本研究の実施に当たっては、静岡理科大学学生、樋口貴士君、森下祐一君、木村嘉宏君、小林慎一君、長尾希君の協力を得た。

引用文献

- 1) M. Hollins, "Touch and haptics", In S. Yantis (Ed); *Stevens' handbook of experimental psychology (third edition), Vol. 1: Sensation and perception* (John Wiley & Sons, New York, 2002), pp.585-618.
- 2) M. Hollins, S. Bensmaïa, and R. Risner, "The duplex theory of tactile texture perception", *Proceedings of the Fourteenth Annual Meeting of the International Society for Psychophysics*, 1998, 115-120.
- 3) M. Hollins, S. J. Bensmaïa, and S. Washburn, "Vibrotactile adaptation impairs discrimination of fine, but not coarse, textures", *Somatosensory & Motor Research*, **18**(2001), 253-262.
- 4) 宮岡徹, "触覚のモジュール機構", 静岡理科大学紀要, **3**(1994), 85-98.
- 5) D. T. Blake, S. S. Hsiao, and K. O. Johnson, "Neural coding mechanisms in tactile pattern recognition: the relative contributions of slowly and rapidly adapting mechanoreceptors to perceived roughness", *J. Neurosci.*, **17**(1997), 7480-7489.
- 6) C. E. Connor, S. S. Hsiao, J. R. Phillips, and K. O. Johnson, "Tactile roughness: neural codes that account for psychophysical magnitude estimates", *J. Neurosci.*, **10**(1990), 3823-3836.
- 7) C. E. Connor and K. O. Johnson, "Neural coding of tactile texture: comparison of spatial and temporal mechanisms for roughness perception", *J. Neurosci.*, **12**(1992), 3414-3426.
- 8) K. Johnson, "Neural basis of haptic perception", In S. Yantis (Ed); *Stevens' handbook of experimental psychology (third edition), Vol. 1: Sensation and perception* (John Wiley & Sons, New York, 2002), pp.537-583.
- 9) K. O. Johnson and S. S. Hsiao, "Neural mechanisms of tactual form and texture perception", *Annu. Rev. Neurosci.*, **15**(1992), 227-250.
- 10) K. O. Johnson and G. D. Lamb, "Neural mechanisms of spatial tactile discrimination: neural patterns evoked by Braille-like dot patterns in the monkey", *J. Physiol. (London)*, **310**(1981), 117-144.
- 11) K. O. Johnson and J. R. Phillips, "Tactile spatial resolution. I. Two-point discrimination, gap detection, grating resolution, and letter recognition", *J. Neurophysiol.*, **46**(1981), 1177-1191.
- 12) T. Miyaoka, T. Mano, and M. Ohka, "Mechanisms of fine-surface-texture discrimination in human tactile sensation", *J. Acoust. Soc. Am.*, **105**(1999), 2485-2492.
- 13) 宮岡徹, "触覚系微細テクスチャー知覚におけるフィルタ特性の検討", 静岡理科大学紀要, **11**(2003), 95-105.
- 14) R. S. Johansson and Å. B. Vallbo, "Tactile sensibility in the human hand: relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin", *J. Physiol.*, **286**(1979), 283-300.
- 15) Å. B. Vallbo and R. S. Johansson, "Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation", *Human Neurobiol.*, **3**(1984), 3-14.