

粗さ・摩擦・硬軟・温冷の触知覚機序: 触感・テクスチャはこうして感じられている

岡本 正吾 (名古屋大学)

まえがき

素材の触知覚は5次元空間で表現される [1, 2, 3, 4, 5] との考察に立脚し, それぞれの次元の情報があるような機序によって知覚されるかを解説する. Fig. 1のように, 5次元の知覚空間を構成する基軸は, マクロな粗さ (coarse or macroscopic roughness), ミクロ (ファイン) な粗さ (fine or microscopic roughness), 硬軟, 摩擦, 温冷の知覚である. それぞれの知覚メカニズムは概して, 神経生理学および心理物理学, 機械工学 (コンタクトメカニクス) の分野の研究者らを中心に明らかにされてきている. この文章では, 個々の次元の知覚機序について, 多くの研究者らが同意していることについて解説していく.

一方で, 触知覚は未だに解明されていない部分が多い. それぞれの次元からの情報がどのように統合され, 素材の認識につながっているかは深く理解されておらず, さらに研究の進捗が必要である. 特に, 素材知覚の恒常性の仕組みは謎である. ヒトが指で素材に触れるとき, その触れ方の違いに拠らず, 素材の判別は頑健に可能である. ところが実際には, 接触力や指の速度などの触れ方によって, 皮膚と素材の界面で生じる物理現象は全く異なる. 界面の物理現象が異なっても, 素材をいつも判別できる理由は, 1) それぞれの知覚次元についてヒトは, 触察運動と触刺激の関係から素材の物理特性を脳内で復元もしくは合成することが可能である, 2) 複数の知

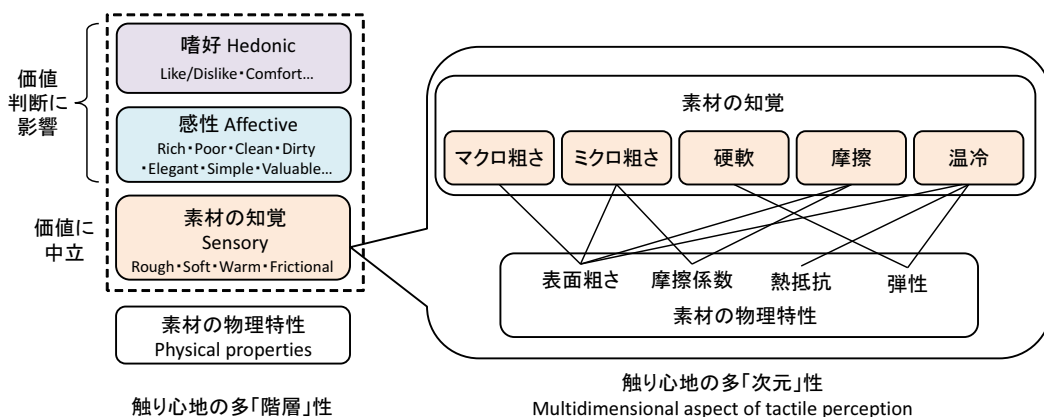


Figure 1. 多次元で多階層な触り心地。「触感」は触刺激の知覚にとどまらず, それに伴う感性的応答も含む. それぞれの層は, 複数の次元からなる情報空間を構成する.

覚次元からの情報の間に常に成立する関係に基づいて素材を認識することが可能である、の2点が有力であるが、実際の素材知覚機序は明らかではない¹。

また、一般に、「触り心地」とわれわれが呼ぶものは、素材の物理特性の知覚に留まらず、感性および嗜好を含む主観的な体験であることを忘れてはならない。触り心地は、Fig. 1のような意味的な階層構造で表現することに使用上の合理性があり、いくつかの研究グループがこのような階層性の構築を試みている [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]。本文で解説する「素材の知覚」は、この階層構造の最下層に位置するものであり、「触り心地」を理解するためには、より上位の階層に踏み込む必要がある。

初版 2016.12.2

最終改定 2020.11.17

¹1) これには長年の論争がある。Yoshioka (2011, 2012) らは触察時の手の運動による固有（深部）感覚入力指先皮膚からの触覚入力を減じる（神経信号を抑制する）ことで、表面粗さ知覚の恒常性が保たれているのではないかとしている [6, 7]。完全に受動的な触察では、粗さ試料が皮膚に速くこすりつけられると、皮膚感覚刺激が増して粗いと感じられるが、能動的な触察では粗さ試料と手の相対速度に関わらず粗さ知覚が保たれる。Yoshioka らは、手を自分の意志で動かす場合（A: 能動的で自身の運動指令のコピー情報が利用できる条件）、手が他人に動かされる場合（B: 能動的ではあるが自身の運動指令は無い条件）および、手は静止して粗さ試料が動く場合（C: 受動的条件）を比較し、条件 A と運動指令のコピー情報が無い条件 B で粗さ知覚の恒常性が実現することを示した。この結果は、受動的条件では粗さ知覚の恒常性は指と試料間の相対速度に阻害されるという Kudoh (1988) [8] の実験結果とも一致する。しかし、完全に受動的な条件でも、テクスチャ知覚の恒常性は保たれるとの実験結果 (Boundy Singer et al., 2017) [9] もあり、まだまだ結論に達しない。

1 粗さの知覚機序

1.1 二種類の粗さ知覚

ヒトは2種類の粗さ知覚機序を有し、それらは対象とする表面粗さの程度が異なる。粗さ知覚の研究では、細長い格子や半球状のドットを並べて構成される試料 (Fig. 2) が頻繁に用いられる。これらの試料での隣接する格子もしくはドット間の距離によって、粗さ知覚の機序を2種類に分類することができる。この距離が、数百マイクロメートルから1 mm よりも大きいときは、ヒトにとってマクロな粗さである。これよりも細かいときはマイクロな粗さとなる²。それぞれの粗さは、異なった機序によって知覚される。このマクロ粗さとマイクロ粗さの境界となる格子もしくはドット間距離は、ヒトの指の指紋の隆起間距離に近く、両者の距離には密接な関係があると考えられている [18]。粗さ知覚の原理を理解するには、マクロ粗さは指腹の接触面内での変形 (空間微分, Spatial variation of skin) が、マイクロ粗さは指腹変形の時間変化 (時間微分, Temporal variation of skin) が重要な鍵であることを抑える必要がある。本節ではその意味を解説していく。

表面粗さの程度によってヒトが2種類の知覚機序を使い分けていることは、普段、われわれは意識しないことであるが、計測可能な帯域が異なる2種類の知覚原理によって、非常に粗い表面 (マクロ粗さ) から細かい表面 (マイクロ粗さ) までの広帯域な表面粗さの知覚が可能となっていることは生体の興味深い機能である。表面の凹凸の間隔が数ミリメートルというような表面粗さから、サブマイクロメートルというものまで、10,000 倍程度にも及ぶ広帯域な物理量を知覚するために、複数の知覚原理がヒトに備わっている。マクロとマイクロの粗さ知覚は、格子間距離にして数百マイクロメートルから1 mm の間では共存し、粗さ知覚の精度もしくは頑健性を向上させている可能性がある。何故、このような表面粗さの帯域において、粗さ知覚が補強されなければならなかったのかを考えることは、人類学上の想像をかきたてる恰好の材料であろう。

1.2 マクロ粗さの知覚

試料の格子間隔以外に、マクロ粗さを定義するものは触れ方である。マクロ粗さを区別したり知覚したりするためには、指腹を素材表面に押しあてることで十分であり、擦る必要はない。仮に、擦ったところでマクロ粗さの知覚能力は向上しない [19, 20, 21, 22]。指と素材の間の相対運動を特に必要としないのが、マクロ粗さ知覚の特徴である。このことは、Fig. 3のように、マクロ粗さ知覚は、指腹と素材の接触面内での圧力分布、もしくはそれによって生じる皮膚変形にて決定されることを意味する。このような圧力分布の知覚を実現する機械受容器は、メルケル小体である。この受容器は真皮に高い密度で存在し、皮膚の静的な変位や圧に感応する。メルケル小体は皮膚表面に密に分布した圧力センサを構成し、マクロな表面粗さの知覚に寄与している [23, 24, 25]。また、自由神経終末の中にも、皮膚への機械的な刺激に応答するものがある [26]。

Fig. 4に、指腹にドットパターンを押し付けた際に記録されるSAIユニット (メルケル小体) の

²マクロな粗さのことを coarse roughness と言い、マイクロな粗さのことを fine roughness と言うこともある。

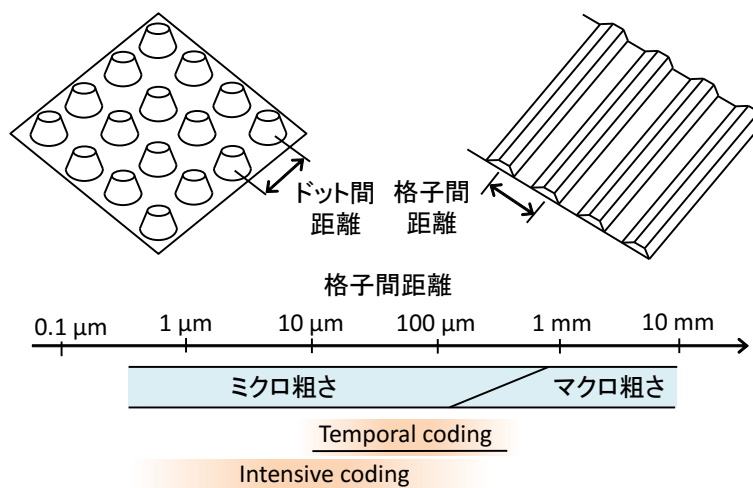


Figure 2. 複数の知覚機序による広範な表面粗さの知覚

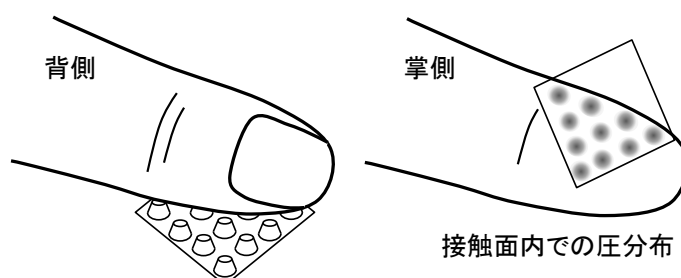


Figure 3. 接触面内の圧分布に基づくマクロ粗さの知覚

活動を示す [27]³。押し付けられたドットパターンの凹凸形状が、SAIユニットの活動頻度としてそっくり写し取られている。ドットの凸形状に触れた部分の皮膚は押し込まれ、その直下に存在するSAIユニットが激しく活動する。このようにメルケル小体は皮膚に加えられた圧に応答するわけであるが、実際はもう少し複雑な振舞をする。Fig. 5に、幅が3 mmのバーを皮膚に押し込んだ際のSAIユニットの活動を断面図として示す [28]⁴。バーに押し込まれた皮膚の直下にあるSAIユニットの活動頻度が高くなっている。もっとも活動頻度が高い部分は、バーの中央よりも両端の境界部分である。境界部分の皮膚は特に大きくひずみ、これによるひずみエネルギーとSAIユニットの活動頻度が良く対応することが知られている [29]。したがって、SAIは物の表面の凹凸形状の境界を正確に捉えることに役立っている。

専門的な言い回しであるが、皮膚上で受容野が近接（およそ2-3 mm）する受容単位の神経活動

³ユニット（受容単位）とは、神経線維とその先端にある終末構造を合わせたものの呼称である。SAIユニットは、一本の有髄線維の先端に10個程度のメルケル小体を有している。

⁴Figs. 4や5のような皮膚表面に分布する受容ユニットの活動を記録したものをSpatial event plotという。指先に終末がある一つのユニットの活動を記録するためには、腕を通る神経線維を狙って微小な電極を刺し、その電位を計測する。では、図のようなプロットを記録するためには大量の電極を腕に刺すのだろうか？実はそうではない。受容野の近いSAIを狙ってたくさんの電極を指すことはできない。実はこれらのプロットでは一つのSAIユニットの活動だけが記録されている。そして、皮膚に押し付ける試料の位置を微小に（例えば、0.2 mm ずつ）変えながら、その都度、ユニットの活動を記録し、あたかも皮膚に分布するユニットの活動を同時に記録したかのように見せているのである。

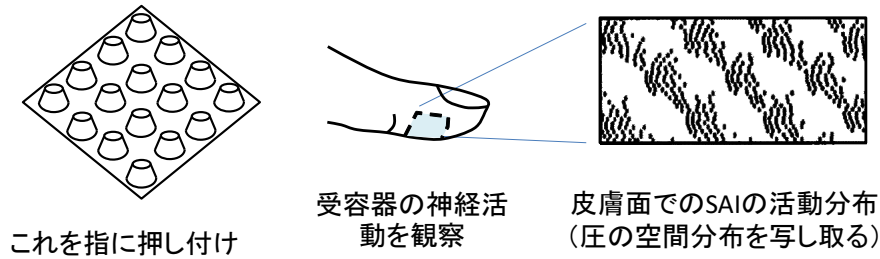


Figure 4. ドットパターンを指に押し付けたときに観察された SAI の活動分布. [27] より一部を再描画して使用.

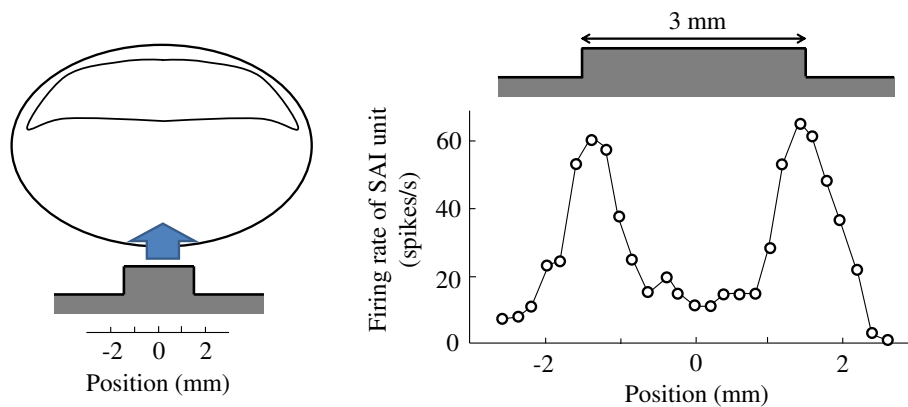


Figure 5. 幅 3 mm のバーを指腹に押し付けたときの SAI 活動の分布. バーの中央付近よりも, 境界付近で SAI の活動が大きい. [28] より再描画. オリジナルの実験は [30].

の差を計算すると, これが粗さの主観的強度とよく対応する [24, 25, 31, 32]. すなわち皮膚変形の空間分布がマクロな粗さ知覚に大きく影響する. このような知覚原理を, spatial coding⁵ と呼ぶ. この原理を理解するために, Fig. 6 の例を考える. 規則的な間隔で溝が並んでいる試料があり, それを指腹で押している様子である. 溝が大きい試料 (下) の方が, 溝が小さい試料 (上) よりも粗く感じられる. 上図のように, 溝の幅が小さいと皮膚の溝へのくいこみが軽微であり, 接触界面での皮膚の変形は小さい. 一方で, 下図のように, 溝の幅が大きいと溝への皮膚のくいこみは大きくなり, 界面での皮膚の変形が大きい. 接触面内での皮膚変形 (spatial derivation) が大きい試料の方が, より粗く感じられる. 格子状試料の場合, この溝幅 (grating width) が粗さ知覚にもっとも影響するパラメータである [25, 33, 34]. このような皮膚変形の大きさが, マクロな粗さ知覚を理解するうえで重要であることは Taylor と Lederman (1975) [35] によって早くから指摘されており, その神経生理学的な意味付けは Connor ら (1990, 1992) [24, 31] によってなされた.

Spatial coding のほかに, 受容単位の平均的な活動 (intensive coding) [36, 37, 38] や圧の時間変化 (temporal coding) に基づくマクロ粗さ知覚の原理も支持されている. 例えば, ヒトがプローブと呼ばれる先の丸い棒を用いてマクロな粗さ試料を擦っても, 粗さ知覚が成立する [39, 40] が, このとき, 試料表面の凹凸は皮膚上での圧の空間分布として知覚されず, プローブの振動によっ

⁵物理情報を神経信号に変換するという意味で, コーディング (符号化) という語が使われる.

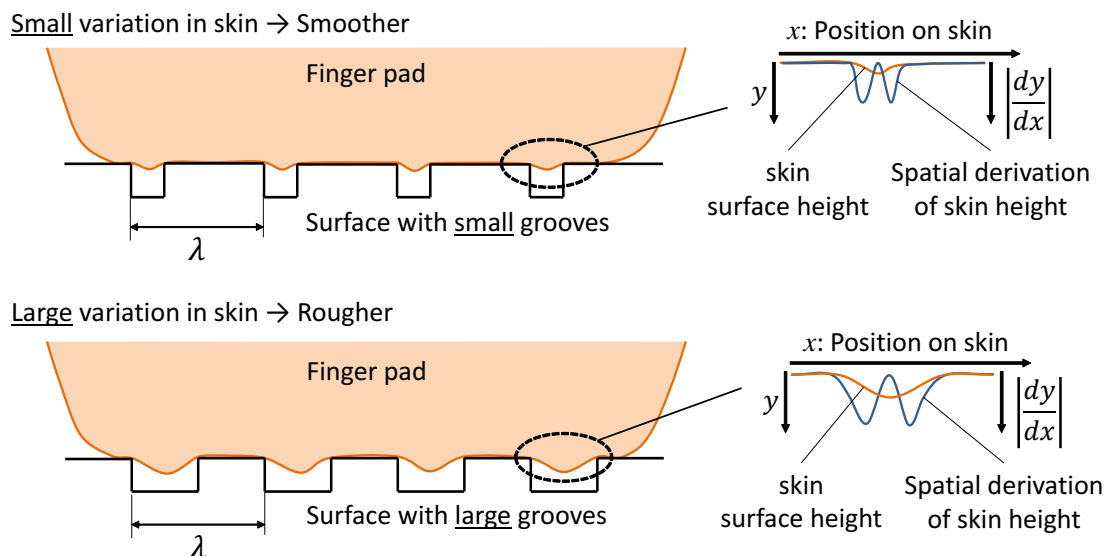


Figure 6. マクロな粗さ知覚: 溝幅と皮膚の変形分布

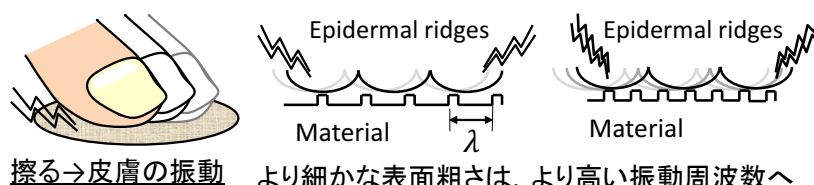


Figure 7. 擦ることによって生じる皮膚の振動を利用したマイクロ粗さの知覚

て知覚される。この振動は、主に振動振幅（刺激の強さ）と周波数（刺激の時間変化）によって特徴づけられ、intensive coding や temporal coding（いずれも後述）に近い原理が機能する。粗さ知覚には複数の知覚原理が混在し、触察対象や接触条件によって、支配的な原理が入れ替わるものと考えられる。

1.3 ミクロ粗さの知覚

粗さ試料の格子もしくはドット間隔がSAIユニットの空間分布密度よりも小さいとき、指腹を試料の表面に押し当てるだけでは、粗さの違いは弁別できない⁶。マイクロ粗さを知覚するためには、指で表面を擦ることによって生じる、皮膚の振動もしくは動的な振る舞いが必要である [41, 42, 43]。指紋の隆起が粗さを有する素材表面の上を滑る時、皮膚は振動し、これがマイクロ粗さ知覚に寄与する。皮膚の振動に選択的に応答する終末器官は、マイスナー小体とパチニ小体であり、これらがマイクロな粗さ情報の知覚を担当している。

振動は一般に、その振幅と周波数で特徴づけられる。これら両方の情報が粗さ知覚に影響する。振動の周波数は、指と素材の相対速度および素材の表面粗さに依存する。より細かな粗さ面を、より速く擦ると、皮膚振動の周波数は高くなる (Fig. 7)。逆に、疎な粗さ面を擦った時には、皮膚

⁶これはサンプリング定理の問題と比較して良いと思う。

振動の周波数は小さい。簡単な計算方法がある。表面の凹凸の間隔が λ mm である素材を、速度 v mm/s で擦ると、皮膚表面には周波数 $f = v/\lambda$ Hz の振動が生じる。空間的な表面粗さの情報は、表面を擦るという行為によって、ヒトに知覚可能な周波数の高低、すなわち時間的な情報へと変換される。こういった情報の変換原理は temporal coding と呼ばれる。

しかしながら、一般に機械受容器が応答可能な振動の周波数は高々1 kHz であり、また、皮膚のような生体の物質には高周波の振動が深部まで伝達し難いという性質がある。例えば、少し目の細かい織物の場合、1 インチに 200 本程の経糸が用いられる。仮に 250 本の経糸があるとする、 $\lambda = 0.1$ mm となり、1 mm の間隔におよそ 10 本の糸が存在することになる。この織物を少し速めの速度である $v = 200$ mm/s で擦ると、振動周波数は $f = 2$ kHz となり、受容器が応答可能な周波数を簡単に超えてしまう。では、このような織物の表面粗さをヒトは正しく評価できないのであろうか？

実際には、特に細かな表面粗さの知覚にとっては、皮膚振動の周波数よりも、擦ることによって生じる皮膚変形の大きさそのものが重要であることが指摘されている。Miyaoka ら [44] は、表面の凹凸の特徴が数マイクロメートルから数十マイクロメートルのような特に細かな表面粗さの知覚においては、それを擦ることによって生じる皮膚の周期的な振動よりも、凹凸の大きさそのもの、もしくはそれによって生じる皮膚変形の大きさそのものが粗さ知覚に寄与することを示している。このような原理は、粗さ知覚は皮膚への刺激の強度の関数であるという意味から、intensive coding と呼ばれる。実際には、皮膚変形の周波数と振幅の両方が、もしくは両方のコーディングがマイクロ粗さの知覚に寄与している [41, 45]。すなわち、マイクロ粗さ知覚においても、マクロとミクロの間で成立したような、複数の知覚原理の併用と使い分けが存在する。

1.4 機械受容器とマクロ粗さ・マイクロ粗さの関係

マクロ粗さの知覚にはメルケル小体が、マイクロ粗さの知覚にはマイスナー小体およびパチニ小体が主体的に関与していることを先に述べた。マイスナー小体やパチニ小体といった速順応型の受容器は、わずか数秒の強い機械的振動刺激によって容易に順応してしまうが、そのように速順応型の受容器が順応した状態においても、ヒトのマクロ粗さ知覚能力は損なわれない [46, 47]。一方で、これらが順応した状態では、マイクロ粗さを有する表面はまるで粗さの無い滑らかな面のように感じられる。

以上のことは簡単に実験できてしまう。何か少し強めの振動を発生するもの（バイブレータ）を指の皮膚に当てた状態で、マイクロな表面粗さに触れるとする。すると、見事にツルツルした滑らかな表面のように感じられる。これは速順応型の受容器がわずか数秒の振動刺激で、順応してしまうためである。しかし、その状態で角のあるものやマクロな表面粗さに触れてみると、その存在は確かに感じられる。つまり、遅順応型の受容器は健全に機能しているからである。このように、順応を利用して知覚と関係する機械受容器を調査することができる。

触覚の話をしてしよう：寒い時に物の材質が分からなくなる？

皮膚の中の機械受容器には、温度が低い時に活動が鈍化するものがある。皮膚の細かな振動を検出するパチニ小体はその代表である。冬に手の温度が低下しているときや、冷たい水に手をつけた後に、物の表面の細かな粗さが分かり難くなることがあるが、それはパチニ小体の活動が鈍化しているからである。温度を下げることによって、パチニ小体の活動を鈍化させる方法は、パチニ小体の役割を調査するときに利用できる。実際、これを利用してたくさんの生理学および心理物理学の実験が行われてきた。

2 硬軟の知覚機序

2.1 ヒトが感じる硬軟とは

硬さは、一般に物に外力を加えたときのたわみと反力の関係で定義されるものであるから、その知覚は自己受容感覚⁷によると思われがちである。しかしながら、他の4種類の知覚次元と同様に、触覚が重要な役割を果たし [48, 49]、時には触覚の方が自己受容感覚よりも知覚的に優位になる。例えば、ヤング率が1–2 MPa程度のシリコンゴム製の円柱（直径40 mm、高さ20–40 mm、剛性の等価値20 N/mm程度）では、皮膚感覚と自己受容感覚の硬軟知覚への寄与率は、9：1程度であるとされる [50]。

では、ヒトが知覚する柔らかさとは物理的には何であろうか？硬軟を表す指標の代表値と言え、物体の構造にも依存する剛性（ばね定数）と材料そのものの弾性係数（例えば、ヤング率）であるが、どちらの物理量が、ヒトが感じる硬軟により近いのだろうか。Bergmann Tiest と Kappers は、厚さ（剛性）と素材（ヤング率）の異なる試料をたくさん用意し、同程度に柔らかいと感じられるものを選択するという実験を通して、この疑問に答えようとした [50]。その結果、ヒトは剛性とヤング率の両方を加味して、柔らかさを判断していることが分かった。例えば、Fig. 8 に示すような、材料も構造も異なる2種類の物体が同程度に柔らかいと知覚される。(a)の物体は、ヤング率が1.6 MPaのゴム柱である。(b)の物体は、ヤング率が1.4 MPaのゴムで剛体を挟んだ円柱である。材料であるゴムの柔らかさのみが知覚に寄与するならば、物体(b)が柔らかいと知覚されるはずである。しかし、物体(b)のゴムは厚みが薄いので、見かけのばね定数については、物体(b)の方が大きい。すなわち、ばね定数のみが知覚に寄与するならば、物体(b)の方が硬いと知覚されるはずである。実際には、ヤング率とばね定数の両方が加味され、両物体は同程度に柔らかいと感じられる。ちなみに、柔らかさ知覚のWeber比はおよそ15%であり [50]、例えば、ヤング率が1 MPaと1.15 MPaの材料の違いがやっと分かるという具合である。

剛性と弾性係数以外にも硬さ知覚に影響する量として、粘性（減衰係数）⁸がある [51, 52]。粘性は、指で物をつまんで物体を変形させようとするときに抵抗力を生じさせるため、硬さの知覚に影響する。物体の変形が速い時に大きな抵抗力を生じさせるという特性があり、ヒトの手の力でも大変形させられるような、ある程度柔らかい物体の硬さ知覚に関しては、粘性は顕著に知覚に影響する。剛性と粘性はどちらも変形し難さを表す量であるが、そのうち、復元（反発）力につながるのは剛性である。変形後に復元（反発）するという性質は、特に生体（肌や生鮮食品）の質を判断する際に経験的に用いられており、価値の基準となる。

⁷皮膚感覚は皮膚に内在する機械受容器による感覚である。自己受容感覚は深部感覚とも言われ、筋、腱、関節に存在する機械受容器による感覚である。主に、関節の運動や力の情報を知覚する。

⁸剛性と減衰係数はどちらも硬さ（変形のし難さ）を意味する物理量であるが、エネルギーを保存するかどうかの違いがある。剛性は、変形の際に加えられた力を保存して跳ね返す。一方で、減衰係数は変形の際に加えられた力を熱として消費してしまう。これらが混在するとき、両者の割合を触知覚で区別することは大変に難しい。

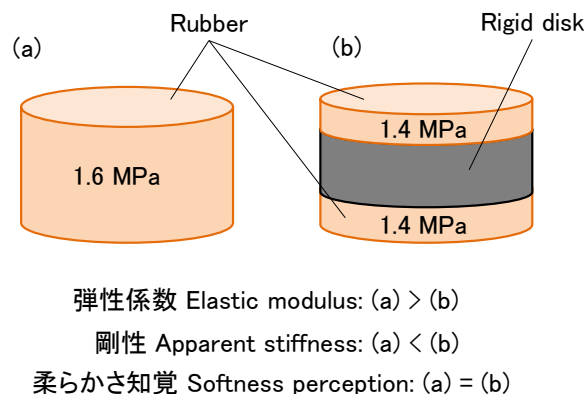


Figure 8. 構造も素材も異なる2種類の円柱の柔らかさ知覚。つまんでみると両物体は同程度に柔らかく感じられる。ゴム柱の直径は40 mm [50].

2.2 自己受容感覚か，皮膚感覚か？

柔らかさ知覚の感覚統合 (sensory fusion) について，実験結果をひとつ紹介する。Friedmanらは，ゴムを対象としてヒトの柔らかさ知覚能力を複数の条件下で調査した [53]。これらの条件は，利用可能な感覚の情報が異なるように統制された。Fig. 9 左上の条件では，被験者らは自由にゴムを指で押して柔らかさを調査することができた (自己受容感覚と皮膚感覚の両方が利用可能)。右上の条件では，被験者らの指関節が台の上に固定され，露出した指腹に一定の力でゴム片が押し付けられた (皮膚感覚のみが利用可能)。これらの2条件下での柔らかさ知覚特性を調べることで，柔らかさ知覚における自己受容感覚と皮膚感覚の役割が調査された。その結果を Fig. 9 下に示す。横軸はゴム片の物理的な柔らかさ (弾性, compliance)⁹ であり，右側ほど柔らかい。縦軸は被験者らが回答した柔らかさの程度であり，上側ほど柔らかく感じられたことを意味する。グラフの傾きは，柔らかさ知覚の感度に対応し，傾きが大きいほど，感度が優れており軽微な柔らかさの違いが判断できる。実験結果は，自己受容感覚と皮膚感覚の両方が利用できる条件の方が，グラフの傾斜が大きく，優れた柔らかさ判断につながることを示している。すなわち，ヒトは両方の感覚器官を活用して，柔らかさ知覚の感度を向上させている。この傾向は，特にゴム片が指腹よりも硬いときに顕著である。一方で，ゴム片が指腹よりも柔らかいときには，両条件のグラフの傾斜には顕著な差がない。すなわち，指腹よりも柔らかい物の柔らかさ知覚に対しては，自己受容感覚と皮膚感覚を組み合わせる条件と，皮膚感覚のみの条件に差がない。柔らかい物に対しては，皮膚感覚が圧倒的に主体的であるから，皮膚感覚のみで十分な柔らかさの判断が可能である。

⁹弾性は剛性の逆数である。剛性の単位は N/m であり，値が大きいほど硬い。弾性の単位は m/N であり，値が大きいほど柔らかい。指腹の剛性はおおむね 1 N/mm (1,000 N/m) であることを覚えておくと便利である。似た用語に，弾性係数がある。弾性係数は材料の硬さを現し (単位は Pa)，値が大きいほど硬い。

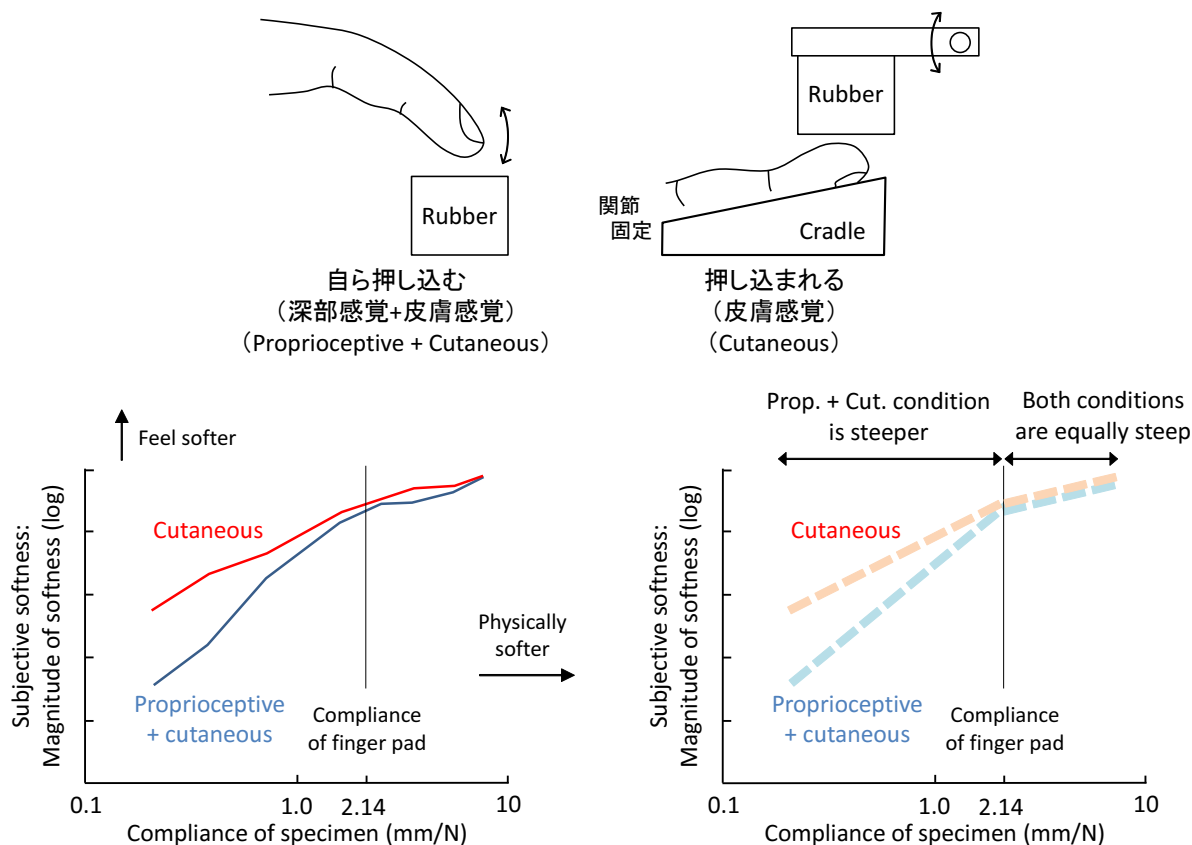


Figure 9. ゴム片に対する柔らかさ知覚 (マグニチュード推定法)。上) 実験条件。左は、自己受容感覚と皮膚感覚の両方が利用可能な実験条件。右は指が台に固定されており、関節の変形が固定されているため、皮膚感覚のみが利用可能な条件。下) 自己受容感覚と皮膚感覚の役割を比較するグラフ。横軸はゴム片の弾性であり、値が大きいほど柔らかい。傾きの大きさは柔らかさ知覚の感度に対応する。傾きが大きいほど、軽微な柔らかさの違いが知覚できる。右図は左図を簡略化したもの。[53]を参考に描画。

触覚について話そう：女性の方が触覚に優れるというが...

女性と男性の触覚の違いに関する研究は多い。多くは女性の方が優れた感覚を有するとの結論に達しているが、その違いは指の大きさにあるとする研究 [54] がある。微細なテクスチャの弁別について、女性の方が男性よりも優れているのは、性差というよりも指の大きさの違いによるものであるとしている。同じような指の大きさの男女が居れば、両者の触覚能力に差はないのだそうだ。指が小さい人の方が、指紋間の距離が小さく、皮膚内の機械受容器の分布密度も高いというのが、察せられる理由である。

2.3 柔らかさの触覚

皮膚感覚に限って言えば、指腹が物の表面に触れると、皮膚と物体が変形し、ヒトはそこから物の柔らかさの情報を手に入れる。実は、皮膚変形の内のどのような情報が硬軟の知覚に利用さ

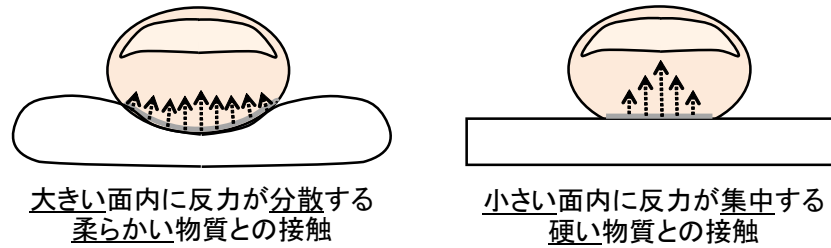


Figure 10. 接触時の皮膚変形・接触面積・圧力分布を利用した硬軟知覚

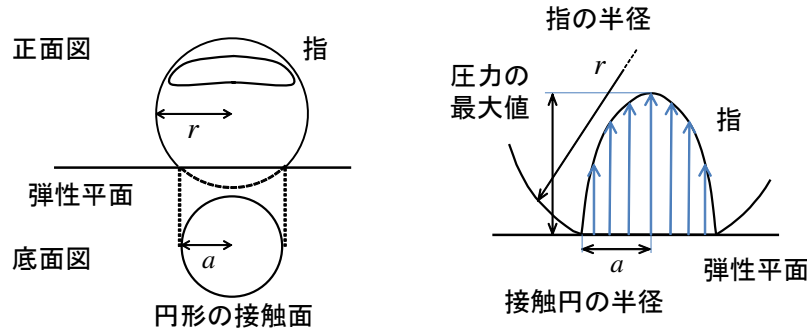


Figure 11. Hertz の接触理論による 2 球体の接触モデル

れているか、よく分かっていない。しかしながら、少なくとも、指腹と物体表面との間の接触面積および接触面内の圧分布が硬軟知覚と密接な関係にあることが知られている。このような関係は、接触面積と圧、もしくはそのどちらか一方を任意に制御できる特殊な装置を用いて、心理物理学的に明らかにされてきた [55, 56, 57, 58]。Fig. 10 に示すように具体的には、指腹が柔らかい素材に触れるとき、素材の柔らかさからその接触面積は大きくなり、反力は面内に薄く広く分布し、圧力の極大値は小さい。一方で、硬い素材では、反力は小さい面内に集中し、圧力の極大値は大きくなる。このような、接触面積およびその面内での圧力分布を含む変形の違いが、知覚される柔らかさの差異につながる。

硬軟知覚に関する機械受容器は特定されていない。遅順応型であり、圧や静的な変形に感応するメルケル小体の関与が第一に考えられるが、指腹で素材表面を押すときには皮膚が動的に変形するわけであるから、速順応型の受容器の関与も否定できない。指で素材を押すとき、最大反力点での情報のみでなく、押し込んでいる過程での情報も柔らかさ知覚に寄与していることを考えると [59]、指腹の動的な変形ならびに反力に関する動的な情報も利用されていると推察できる。

2.4 Hertz の接触理論から見た柔らかさ知覚

2つの物体が接触したときの変形や反力の分布を定式化したものとして、ヘルツの接触理論がよく知られている。この理論はいくつかの仮定によって整理されているため、ヒトの指のような不均質で大変形を伴う物体には厳密には当てはまらない。しかしながら、指腹の変形が小さいときや、大局的な挙動を理解するときには重宝されている。

Fig. 11 は、指腹を模した球体が弾性平面に荷重 w で接触するときの様子を表す。球体の半径は

r とする。2物体の接触面は円形であり、その半径を a とする。この半径は、

$$a = \left(\frac{3wr}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

で現される。ここで、 E^* は有効弾性係数であり、2物体の縦弾性係数とポアソン比によって与えられる(式(2))。式(1)は、接触面の半径 a は、荷重 w 、球体の半径 r および有効弾性係数 E^* の関数として与えられ、荷重に伴って接触面積もしくは指の変形が大きくなることを現わしている。荷重 w はヒトが指で物体を押し力であるから、ヒトにとって既知の値である。球体の半径 r は指の大きさであり、ヒトは自分の指の大きさを知っているとして、こちらも既知の値であると考えられる。すると、この式は、接触面の半径 a から、平面の弾性係数が推定できると解釈できる。すなわち、ヒトは指の変形量から対象物体の柔らかさが推定できるということになる。

E^* は、指および平面の縦弾性係数 E_f , E_o とそれらのポアソン比 ν_f , ν_o によって、

$$E^* = \left(\frac{1 - \nu_f^2}{E_f} + \frac{1 - \nu_o^2}{E_o} \right)^{-1} \quad (2)$$

で与えられる。ポアソン比はたかだか0.5であり、通常はさらに小さい値であるから、その2乗の値は E^* には大きく影響しないとして、ここではポアソン比を無視する。すると、 E^* は簡略化され、

$$E^* \sim \left(\frac{1}{E_f} + \frac{1}{E_o} \right)^{-1} \quad (3)$$

となる。これによると、 E_f と E_o のうちどちらか一方の小さい方が支配的に E^* を決定する。 E_o が E_f に比べて十分に大きい場合 ($E_o \gg E_f$) には、 E_o は E^* にほとんど影響しない。すなわち、ヒトは自分の指よりも硬いものに関しては、指腹の変形からその弾性係数を推定することを得意としない。平たく言えば、指腹よりも硬い対象物を押しても、対象物はほとんど変形せず、指腹ばかりが変形してしまうため、指腹の変形もしくは接触の情報を頼りに対象物の弾性を判断することができない。逆に、 $E_f \geq E_o$ であるとき、 E_o は高い感度で、接触状態に影響する。すなわち、ヒトは自分の皮膚と同じ程度かそれよりも小さい弾性係数を有する素材に対しては、感度よくその弾性係数の違いを判断できる。

先に述べた通り、ヘルツの接触理論は指腹の変形には厳密には成立しない。この理論がどの程度成立するかを議論するために、指腹を剛体面に押し付けたときの荷重と接触面積の変化の関係がよく論じられる。式(1)によると、接触面積の半径 a は荷重 w の1/3乗に比例する。したがって、接触面積 (πa^2) は、荷重の2/3乗に比例することになる。確かに、指腹の接触面積は荷重の概ね0.66乗に比例するが、この指数は0.35から1.3程度まで幅広く報告されている [5]。荷重が小さいときは指数が大きく、荷重に伴って指数が小さくなる傾向にある。このことから、荷重に伴って指腹の見かけの弾性係数が増加するとも言われる [5]。

2.5 硬さの触知覚

ヒトは自分の皮膚と同等かそれよりも柔らかい物の硬軟については、指を物体に押し付けることで精度よく知覚できるが、この手法は皮膚よりもずっと硬い物の知覚に適さない。なぜならば、

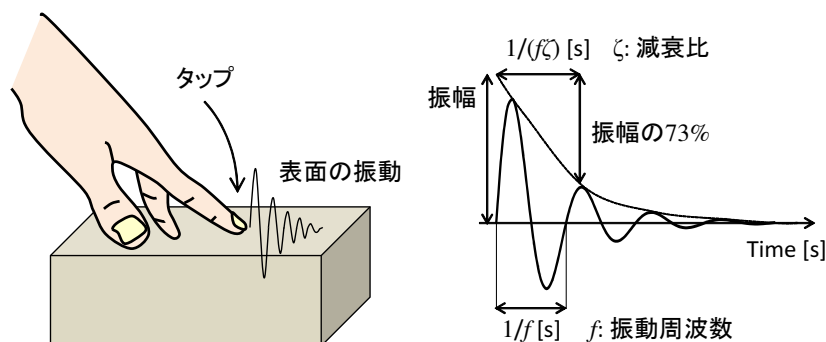


Figure 12. 物体表面を叩くことによって生じる物体の減衰固有振動

柔らかさの知覚は皮膚と物体の双方の変形の情報に基づくものであって、指の皮膚よりもはるかに硬い物体に対しては、皮膚が一方的に変形するだけであるからである。硬い物の知覚には、ヒトは別の方法を用いる。それは、物体の表面を軽く叩き（タップ）、その時に生じる物体の減衰固有振動や撃力的な反力を基にした硬さ知覚である [60, 61, 62, 63, 64, 53, 65]。タップしたときに、指が物体表面に接して振動を知覚する時間、もしくは撃力的な反力が生じる時間はたかだか数十ミリ秒であるが、このわずかな時間からヒトは物体の硬さに関する情報を知覚する。

物体を叩いたときに生じる振動は、物体の機械的特性を反映している。簡単化のために、この振動を単一の周波数成分からなるものと考えてみる。単一の周波数成分を含む減衰固有振動は、その周波数と振幅、減衰比によって定義される (Fig. 12)。この内、硬さ知覚に最も関与するのは周波数であり、高い周波数を有する物体ほど硬いと知覚される。この周波数は、主に物体の剛性によって決定することから、ヒトはタップによって物体の剛性を推定していると思なせる [63, 65]。剛性が高いほど、振動の周波数も高くなる。同時に、固有振動の減衰の早さのパラメータである減衰比もしくは主としてそれに影響する物体の減衰係数も硬さ知覚に影響する。減衰係数が大きいほど、振動は早く減衰し、タップしたときに硬く感じられる [63, 65]。

物体の表面を軽く叩いたときに生じる実際の振動には、主要な周波数（基本周波数）成分以外にもいくつかの際立った高周波成分が含まれる。物体には、ある特定の周波数で振動し易いという性質があり、その振動周波数を固有振動周波数という。物体は複数の固有振動周波数を有しているため、叩かれたときには、主要な周波数成分以外にも複数の高周波成分が観察される。この複数の高周波成分の存在が、物体をより硬いと知覚させる [66, 67, 68, 69]。

2.6 3種類の硬軟知覚

ここまでの話を整理すると、硬軟の知覚と一口に言っても、Table 1 および Fig. 13 のように3種類に分類できる。

対象物が柔らかいときは、ヒトは物を指でゆっくりと押して柔らかさを判断する。このとき、皮膚と対象物の変形に基づく柔らかさ知覚が主体となり、皮膚感覚を利用して対象物の弾性係数を判断している。次に、皮膚よりも硬いが、押しつたりつまんだりして変形させられるような程度の硬さは、対象物に加える力と対象物のたわみの関係として定義される剛性である。ここでは深部

Table 1. 3種類の硬軟知覚の比較表

| 対象物の硬さ | 触察動作 | 支配的な感覚 | 原理 | 影響する物理量 |
|--------------------------|---------|---------------|---------------|-----------|
| 小 皮膚と同じくらいか それよりも柔らかい | そっと触れる | 皮膚感覚 | 皮膚の変形 | 弾性係数 |
| 中 押すとたわむくらい の硬さ | 押す, つまむ | 深部感覚 | たわみと反力の 関係 | 剛性 (, 損失) |
| 大 人が押しても変形し ないくらい硬い | 叩く | 皮膚および深 部感覚 | 振動 | 剛性, 減衰係数 |

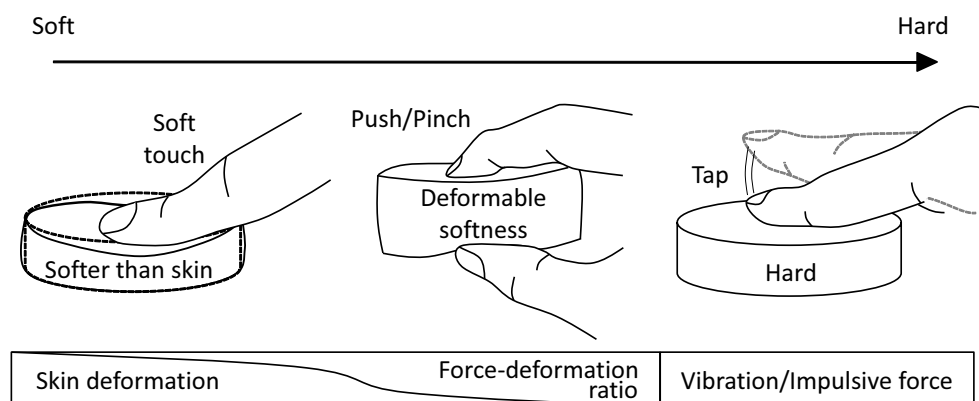


Figure 13. 硬さ/柔らかさの違いによる触察動作の違い

感覚が主体的に利用されている。実際には、深部感覚による硬さ知覚と、皮膚変形による硬さ知覚は混在し、対象物が柔らかいほど、後者が占める割合が大きくなることは既に述べた。最後に、対象物が硬い場合には、叩くことによってわれわれは硬さを判断する。このときに生じる振動をもとに硬さは判断されるが、ダイナミックな現象であるために剛性と減衰係数の両方に硬さの判断は影響される。

対象物の硬さに合わせてわれわれは3種類の触察原理を使い分けたり併用している。粗さ知覚の場合と同様に、複数の知覚原理を用いて硬いものから柔らかいものまで、広帯域の硬軟の知覚を実現している。対象物の硬さに関わらず一貫して、硬さに関する物理量を判断できれば良いが、実際には弾性係数、剛性、減衰係数が混在していることに注意したい。

触覚の話をもう少ししよう: エンボス加工で柔らかく感じる?

柔らかさの知覚には、物体に触れたときの皮膚変形が関与していることを述べた。これを巧みに利用して、触感を演出しようというのがエンボス加工である。エンボス加工は典型的にはプレスなどによって浮き出た模様を紙に表出させるためのものである。表面の細かな凹凸の違いが、指の皮膚の変形の差異につながるため、同じ弾性係数の材料でもエンボス加工によってより柔らかく感じられることがある [70]。身の回りにはエンボス加工を施した物がたくさんある。エンボス加工による触感の違いに注意してみよう。

3 摩擦の知覚機序

3.1 摩擦と粗さの関係

物の表面の引っ掛かりや滑り、乾湿を判断するために重要なのが摩擦知覚である。指との接触の場合、一般に、凹凸面のかみ合い効果により、表面粗さが大きい素材は摩擦も大きい。そのため、心理物理実験ではたびたび、ヒトは表面粗さと摩擦を独立に判断できないという結論にたどり着く [71, 72, 73]。しかしながら、実験に用いる素材や潤滑の条件によっては、粗さと摩擦の知覚は独立した次元として抽出される [74, 75, 76, 77]。例えば、表面の潤滑の有無によらず、ヒトは粗さ試料を判別することが可能であることが知られているうえ [35]¹⁰、凝着摩擦が支配的になるような条件では、粗さ知覚と摩擦知覚には負の相関が見られる [78]。このように、多くの研究が、粗さ知覚と摩擦知覚を別に論じることを支持している。

Fig. 14 に無潤滑時の触察における素材の表面粗さと摩擦係数の一般的な関係を示す。算術平均粗さ (R_a) が概ね $10 \mu\text{m}$ よりも大きい場合は、指腹と素材表面の凹凸がかみ合う効果が支配的になり、粗い表面ほど摩擦が大きい。凹凸面が咬み合っているとき、二物体間に相対運動が生じるためにはかみ合った部分に変形しなければならず、大きな摩擦力が発生する¹¹。一方で、算術平均粗さが $1 \mu\text{m}$ よりも小さい場合には、凝着が支配的になる。この条件では、素材の表面が粗いほど、指との真実接触面積¹²が小さくなり、摩擦が小さくなる。算術平均粗さが $1\text{--}10 \mu\text{m}$ の場合、表面の摩擦は最も小さくなるのが典型的であり、表面はサラサラと心地よく感じられる。

同じことは、機械加工によって仕上げられた表面にも通じる。Fig. 15 は、精緻に作成された樹脂製のグレーティングスケールを無潤滑状態かつ、指で擦った時に計測された摩擦係数である。横

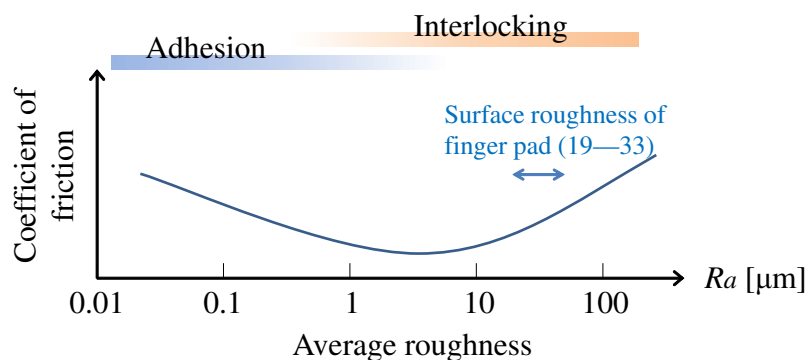


Figure 14. 無潤滑時の指と素材の接触における表面粗さと摩擦係数の一般的な関係

¹⁰潤滑によって、知覚される粗さが低減するという報告 [72] もあり、結論が出ているわけではない。

¹¹かみ合った凹凸面の相対運動時に、永久変形や材料の破壊（指紋や皮膚の摩耗を含む）を伴う場合、掘り起こし摩擦と呼ぶ。指で物を擦る場合、指紋が物の表面の粗さとかみ合うが、それによって指紋が削れる（少しは削れているが）わけではない。したがって、厳密には掘り起こし摩擦とは呼ぶべきではないが、他に適切な用語がないので、掘り起こし摩擦という用語が頻回に使われる。かみ合った部分で凝着および変形摩擦の両方が生じている。

¹²凹凸面の接触では、真実接触面積 (real contact area) と見かけの接触面積 (apparent contact area) を区別する必要がある。凹凸面の接触では、実際には凸部の先端のみが接触しており、この実際に接触している面積を真実接触面積と言う。一方で、マクロな視点からの接触面積を見かけの接触面積と言う。指の場合は、通常の触察では、見かけの接触面積はおよそ 100 mm^2 であり、真実接触面積はその半分程度であろう [79]。

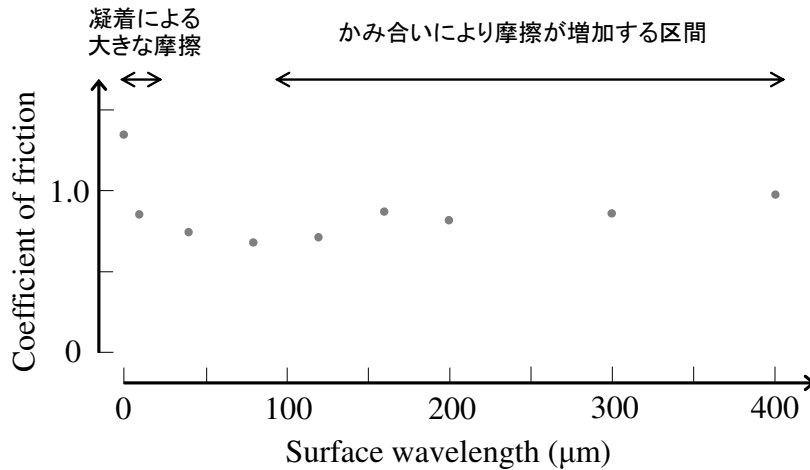


Figure 15. 無潤滑時の指と機械加工された表面（グレーティングスケール）における，摩擦係数と表面波長の関係 [80] より再描画．

軸は，グレーティングスケールの表面波長である．波長が小さい時（図では $10 \mu\text{m}$ 以下）は摩擦係数が大きい，凝着摩擦の効果によるものである．波長が $50\text{--}100 \mu\text{m}$ 程度では，摩擦係数は小さくなるが，凝着とかみ合いの両方の効果が抑えられるからである¹³．波長が $100 \mu\text{m}$ 以上では，指紋とグレーティングスケールの隆起がかみ合うことによって，波長が大きくなるにつれて摩擦係数が増加する．

3.2 摩擦と柔らかさの関係

上述のように，摩擦と表面粗さには密接な関係があるが，摩擦と柔らかさの間にも深い関係がある．人が指で物に触れるときに作用する摩擦の大部分に影響するであろう凝着摩擦は，二物体間の接触面積 A の凝着がせん断強度 τ で破壊されるという考え方である．したがって，凝着摩擦 f_{ad} は，

$$f_{\text{ad}} = \tau A \quad (4)$$

となる．ここで，先述の Hertz の接触理論から接触面積 A を決定すると，この式は

$$f_{\text{ad}} = \tau \pi \left(\frac{3wr}{4E^*} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

となる．すなわち，摩擦力は二物体の弾性係数 E^* にも影響を受ける． E^* が分母にあることから，対象物の弾性係数が小さいほど（柔らかいほど），摩擦力が大きいことを意味する．指が柔らかい物体と接触するとき，その物体が柔らかいほど接触面積が大きくなり，凝着する面が増大するため，それを破壊するために必要な摩擦力も増大すると理解できる．このように，摩擦は物体の柔らかさにも依存する．なお，凝着以外の摩擦にヒステリシス摩擦（変形摩擦）があるが，ヒステリシス摩擦も物体の柔らかさに依存する．総じて，柔らかい物体ほど摩擦係数が大きい [81]．

¹³さまざまなシーンにおいてこの事実は活用されている．微細な機械加工を表面に施すことによって，表面の摩擦が低下し，機械の省エネルギー化と長寿命化が図られている．

柔らかい物ほど、摩擦が大きいというのは物理的に正しいことであるが、知覚的にはどうであろうか？実は、物体表面の摩擦特性を変えるだけで、その物が柔らかく感じられることがある [80, 82, 83]. 例えば、粉末を用いた潤滑や表面の微細加工によって摩擦が大きくなると、その物体の機械的な硬さは変化していないにも関わらず、柔らかく感じられることがある [80, 82]. 逆に、潤滑によって摩擦を低減させた場合に柔らかく感じられることもある [83]. これらの現象は深く理解されておらず、確立した表面設計法につながるにはさらなる研究が必要である。

触覚の話にも色々ある: 触りたがりは無駄遣いにご用心

Need-for-touch (NFT) スコアという知られた指標がある。これは、買い物の時についつい色々な商品に触れてしまうという個人の性格の強さを測る指標であり、10項目程度のアンケートに回答することで調査される [84]. 例えば、「あなたは買い物の時に、購入の意思が無くとも、製品に触れることがありますか?」、「気づくと色々な商品に触れていることがありますか?」などという質問項目である。NFTスコアが高い人は買い物の時に製品に実際に触れてみないと良し悪しの判断に自信が持てないが、NFTスコアが低い人にとっては商品に触れてみることは重要でない。恐ろしいことに、商品に触れてしまう人 (NFTが高い人) ほど、衝動買いの傾向が強い [85]. しかも、どうぞ触れてみて下さい、と促されると、さらに衝動買いの傾向が強まるのだとか。

3.3 摩擦知覚の原理

3.3.1 皮膚感覚と自己受容感覚の統合による摩擦知覚

摩擦は力としてヒトに働くため、摩擦の知覚は自己受容感覚 (関節に内在する機械受容器による感覚) によるものと思われがちである。しかしながら、皮膚感覚も大きな役割を果たしている。実際には、2種類の感覚器官で検出された力の情報が統合されたものがヒトに意識される。この数学的表現として、線形合成モデルが用いられる。統合の結果として意識される力の大きさを f_{tp} 、皮膚感覚と自己受容感覚によって検出される力の大きさをそれぞれ f_t 、 f_p とすると、

$$f_{tp} = w_t f_t + w_p f_p \quad (6)$$

$$1 = w_t + w_p \quad (7)$$

のように、 f_{tp} は、皮膚感覚と自己受容感覚による力知覚に重みづけ係数 (w_t , w_p) を乗じて加算したもので表現される。重みづけ係数は、外部から加わる力の大きさに応じて自動調整される。1.0 Nの力が指腹に加わったとき、8割程度が自己受容感覚により決定し、残りの2割が皮膚感覚によって決定する ($w_t = 0.2$, $w_p = 0.8$) [86]. 0.3 Nの力が指腹に加わったとき、皮膚感覚と自己受容感覚の重みづけはおおよそ1:1である ($w_t = 0.5$, $w_p = 0.5$). 指腹の皮膚は小さな力に感度よく変形するため、小さな力の知覚では、皮膚感覚の寄与が増す。このように、各感覚器官の重みづけ係数は指に加わる力の大きさに応じて、信頼性が最大化されるように自動調整される。これは最尤推定法の原理であるが、同様のことが柔らかさの知覚 [50] および、重さの知覚 [87], 指で把持する物体の大きさの知覚 [88] に対しても成立していると考えられる。

3.3.2 準静的な摩擦現象の知覚

摩擦知覚に特化した機械受容器は存在せず、そのことが摩擦知覚の原理の解明に時間を要している理由の一つである。とは言っても、準静的な摩擦現象の知覚メカニズムはおおよそ理解されており、指腹にせん断方向の力が加わることにより生じる皮膚のせん断変形（スキン・ストレッチ）が摩擦知覚に関与している。準静的な摩擦現象とは、静摩擦時および安定的な動摩擦時に生じる摩擦現象のことであり、摩擦力が時間とともに著しく変化しない状態のことを指す。指先で物の表面を擦ると、摩擦力の方向に指腹が変形する（Fig. 16 左）。この指腹の準静的なせん断変形が大きいほど、知覚される摩擦も大きくなる [89, 90]。このような指腹の準静的なせん断変形の方向と大きさは、神経コーディングが可能であり [91, 92, 93]、摩擦係数もしくは摩擦力を知覚していることに相当する [94]。

3.3.3 動的な摩擦現象の知覚

一方で、摩擦振動のように動的な摩擦現象も何らかの形で摩擦知覚に寄与している [95, 96, 97, 98]。例えば、ヒトはガラスの上の水性の液体と油性の液体を擦って区別する際、スティック・スリップ現象と呼ばれる、摩擦振動の有無を利用する [95, 96]。この振動は、最大静摩擦力と動摩擦力の差に由来し、引っ掛かり（固着、スティック）と滑り（スリップ）の遷移が数十から数百ヘルツの高い周波数で生じる。油性の液体ほど滑りやすく、指との間に摩擦振動が生じ難い。純粋な水ほど、摩擦振動を生じさせる。摩擦振動は、摩擦係数そのものよりもヒトの摩擦知覚に強く影響している可能性がある。指が表面を滑っている時に発生する摩擦力および摩擦係数の動的変化が大きいほど、摩擦が強いと感じられる [80, 82]。織布の風合いである‘ぬめり’（羊毛のようななめらかさと、やわらかさを備えている事）の評価においても、摩擦係数が低いことだけではなく、摩擦係数の変動が小さいことが重要である [99]。

摩擦振動以外にも、特徴的な動的挙動がある。指腹が素材に固着している状態から、全滑りの状態に遷移する際、その固着面積は減じていくが、この減少パターンは指と素材の摩擦に依存する。固着面積が連続的に減少していく場合もあるが、固着面積がある程度まで減少するとそこから一気に完全な滑り状態へと遷移する場合もある（Fig. 16 右） [98]。したがって、このような摩擦に関する皮膚変形のダイナミズムは、ヒトの摩擦知覚と密接に関わっていると推察されるが、実際にこのような動的な皮膚変形から摩擦のどのような特性が知覚されるかは不明である。例えば、摩擦振動は素材と指の間の静摩擦係数および動摩擦係数の差異によるものであるが、ヒトは摩擦振動から、これら2種類の摩擦係数を推定し得るのだろうか。そのような問いへの回答は未だなされていない。

3.4 乾湿の知覚: 「しっとり」や「うるおい」は何か?

テクスチャの知覚空間に関するいくつかの研究は、表面の湿り気や乾燥状態の知覚次元（乾湿次元）の存在を示唆している [12, 17, 100, 101]。確かにヒトは湿った素材に触れると、それが湿った状態であることが分かる。しかし、いかなる先の実験でも摩擦次元と乾湿次元のいずれか一方

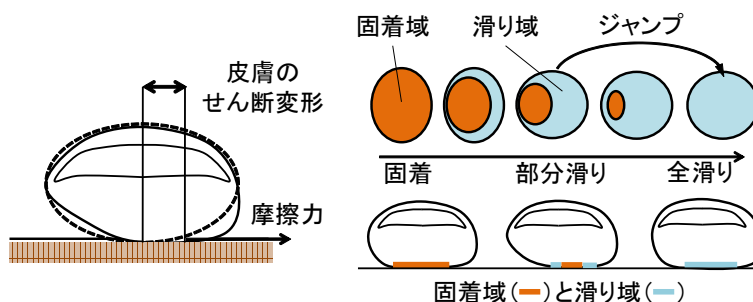


Figure 16. 皮膚のせん断変形を基にした摩擦知覚. 左: 準静的なせん断変形による摩擦知覚. 右: 摩擦による皮膚変形のダイナミクスの例

人の摩擦知覚原理

| 摩擦状態 | 順静的な摩擦現象の知覚 | 動的な摩擦現象の知覚 |
|-------------|---|--|
| 例 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 静摩擦の状態 ・ 安定して滑っている動摩擦の状態 | <ul style="list-style-type: none"> ・ スティック・スリップ現象 ・ 固着から滑りへの遷移 |
| 知覚に関わる指腹の変形 | 指腹のせん断変形(スキン・ストレッチ)の大きさに基づいて摩擦力もしくは摩擦係数を判断 | 指腹の動的な変形を利用しているが、摩擦のどのような特性(物性)を判断しているかはよく分からない |

Figure 17. 皮膚感覚による摩擦知覚機序

だけの存在を示すにとどまっていることから [1], これら 2 種類の次元は近いものであり, 極端に言うとも、単に名前の違いであると言っても良い. 実際, 摩擦と乾湿の判断が同じ次元に属するという実験結果もある [16].

それでも摩擦と乾湿の判断は全く同じものではない. 乾湿状態の判断は, いくつかの知覚次元の組み合わせによるものであるという考え方が主流であり, その主要な知覚次元の一つが摩擦次元である. 乾湿状態の判断に関する主要な知覚次元は, 摩擦次元と硬軟次元である [102, 103]. 表面の摩擦が高く, 柔らかいほど, 湿潤であると判断される. ここに温冷知覚も加わる可能性が高く [102, 104, 105, 106]¹⁴, 湿った表面の方が概ね温度が低いという経験と対応する¹⁵. 岡島と武田 [104] は, 建築素材に関する調査において, 無塗装の木材や研磨紙のように表面粗さが大きい素材は乾いて感じられ, ガラスや塗装した木材のように表面が滑らかなものは湿って感じられるという結論を見出した. 皮革, 金属, 樹脂, 布などを用いても同様に, 滑らかな表面ほどしっとりと感じられるという結論が得られている [107]. これらの研究で用いられた素材の範囲では粗さ知覚と摩擦知覚が独立しておらず, 表面粗さの代わりに, 摩擦との関係として捉えなおしても矛盾はないであろう. すなわち, 滑らかな表面であるほど, 凝着効果によって摩擦係数が大きく, 湿っているように感じられる.

肌の触感に関しても乾湿と摩擦は密接な関係がある. 摩擦計を用いた計測において, 肌に少し

¹⁴Zigler (1923) [105] の研究では, 湿った素材として, ゆでた芋やパンくずなどが使われた.

¹⁵織布においては, 温かい方がしっとりと感じられるとの報告 [102] がある.

の水分を塗布すれば摩擦係数は上昇する [108, 109, 110, 111]. 軽度の発汗も類似の作用をし [112], 水分保有量が多い肌ほど摩擦係数は大きい [113, 114]. 理由としては, 表皮の膨潤による柔らかさと接触面積の向上が, 摩擦が増加するように働きかける [112] ということに納得できる. 逆に, アルコール等で肌を乾燥させると摩擦係数は低下する [108].

あくまでも分類上の問題とも言えるが, このように, 複数のプリミティブな知覚次元の合成によって判断される表面状態や属性は, 知覚よりも上位の判断として扱われることが多い (Fig. 1). 乾湿 (しっとりや, うるおいを含む) の判断が物の評価や価値に結びつきやすいのは, 知覚の層よりも上位に位置するからであり, また, 上位に位置する判断ほど, 素材の物理特性と直接的に対応しないため, 人がどのように乾湿を判断しているかは理解し難く, 工業的な設計も難しい. しっとりして, うるおいが感じられるような表面設計は, ものづくりの現場で追求されることが往々にしてある. 素材や, 表面形状, 塗装, 潤滑の工夫によって, 摩擦を向上させ, 軟らかく感じさせることでこれは実現することが多いが, その結果, 傷つきやすく, 汚れやすい素材につながることも多く, 難しい問題である.

触覚の話が続けよう: ロボット工学者を悩ませた問題

重さ w kgw の物体があり, これを拇指と示指でつまんで持ち上げる. 持ち上げるための必要最小限の上向きの力は wg N (g は重力加速度) であるが, 必要最小限の把持力 f はどうだろうか? 指と物体の間の摩擦係数を μ とすると, 一本の指と物体の間に働く摩擦力は $f\mu$ となる. 指は2本あるから, 物体を持ち上げて静止している時には, $2f\mu \geq wg$ が成立していなければならない. すなわち, 物体を滑り落とさないための必要最小限の把持力は, $f = wg/2\mu$ となる. 把持力は, 物体の重さ w とその表面の摩擦係数 μ の両方が分かって初めて決めることができる. 以上がロボットが物体を持ち上げるための戦略である. しかし, ヒトは重さも摩擦係数も未知の物体を意図もやすやすと, 必要最小限に近い把持力で持ち上げることができる. ロボットにはそんなことはできない. これが, 長い間, ロボット工学者らを悩ませてきた問題であった. 現在では, ヒトは指腹に生じる微小な滑り現象を知覚して, 把持力を無意識に調整していることが知られている. この微小な滑り現象は, 完全な滑りに至る前の警告的な現象である.



4 温冷の知覚機序

4.1 温冷知覚を決定する物理

温冷の知覚は、物の温度そのものよりも熱の伝わりによるものである。例えば、同じ部屋に2種類の物体が長く置かれており、その表面温度は同じであるとする。けれども、それぞれに触れたときに皮膚から物体へと移動する熱量は異なるから、ヒトはそれぞれの物体に対して異なる温冷を感じる。皮膚から物体へ多くの熱が移動すれば、ヒトはその物体を冷たいと感じる (Fig. 18)。逆に、ほとんど移動しなければ、温かいと感じる。このように、ヒトは触れた物体の温度そのものよりも (温度に対しては直ぐに順応してしまう)、触れたことによる皮膚の刹那的な熱の移動により温冷を感じる。

では、材料の特性の内、熱の移動に支配的な熱伝導率とヒトの温冷知覚の対応はどうであろうか。実は、材料そのものの特性である熱伝導率と温冷知覚はあまり対応しない [115, 116]。例えば、同じ金属のブロックでも体積や構造が異なれば、温冷刺激としては異なるように感じられる。また、同じ糸で編んだ生地でも、編み方や厚みが異なれば、感じられる温冷は異なる。

温度そのものよりも、熱の移動によって発生するその変化が重要であることは神経生理学的観点 [117] から伺える。皮膚への冷刺激に反応する神経線維 (後述の冷線維) があるが、これは、より低い温度の刺激に対して強く反応し、頻繁に興奮する。その反応は冷刺激に暴露した直後が最も強く、3—5秒後には興奮の頻度は半減し、ほとんど収束してしまう (しかし、冷線維の活動がなくなるわけではない)。また、腕時計版よりも一回り大きい物体に指で触れたとしよう。指表面の温度は接触後の2秒程度は著しく低下するが、その後はほとんど変化せずに収束してしまう (Fig. 19) [118]。物体の温冷の知覚に重要なのは、物体に触れた直後に発生する熱の移動による過渡的な現象である。

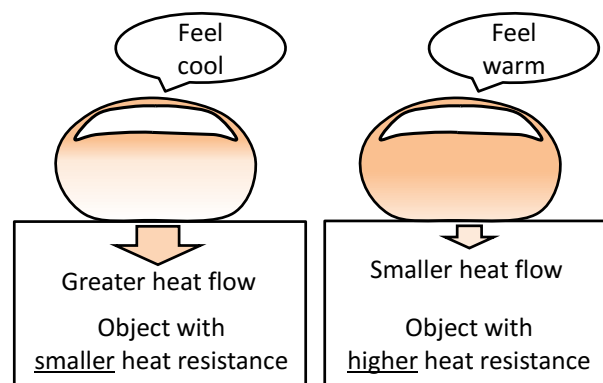


Figure 18. 接触直後の熱の刹那的な移動によって決定する物体の温冷知覚

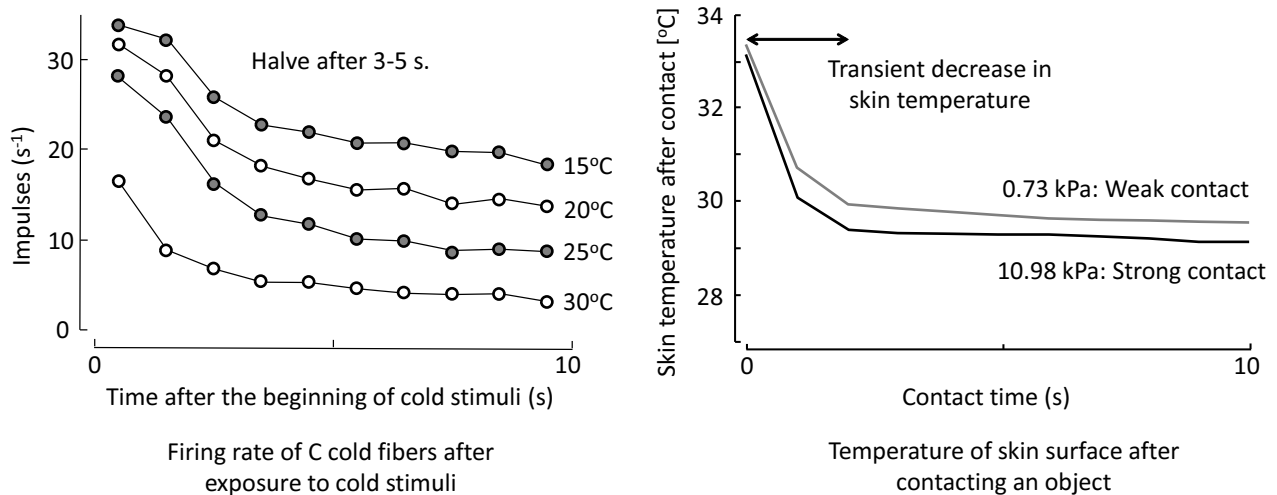


Figure 19. 左: 冷線維 (C線維) に温度刺激を与えたときの活動頻度 ([117] から再描画). 右: 物体に接触直後の指表面の温度変化 ([118] から再描画)

4.2 熱移動量 (熱流束) と温冷知覚

熱移動量と温冷知覚はよく対応することが知られている。岡島ら [115] は生活空間に存在する様々な素材で作られた平板の単位面積当たりの熱移動量¹⁶と、温冷の主観的強度の関係を調査し、両者がよく対応することを示した (Fig. 20)。熱の移動が速い金属や石材、ガラスは冷たく感じられ、熱の移動が遅い毛布や布は温かく感じられる。

熱移動量は、熱容量が既知であるプローブ (温度センサ付き) を温めておき、それを素材に接触させ、その直後のプローブの温度変化 (低下, ΔT) を観察することで得られる。あらかじめ温めておいた熱容量 C (J/K) のプローブの温度が t 秒間に ΔT だけ低下したとすると、プローブから素材に移動した熱量 Q (J) は

$$Q = C\Delta T \quad (8)$$

$$= C(T_0 - T(t)) \quad (9)$$

で与えられる。ここで、 T_0 はプローブの初期温度、 $T(t)$ は時刻 t でのプローブの温度である。 t 秒間での平均の熱移動量は

$$q_{\text{ave}}(t) = \frac{C\Delta T}{t} \quad (10)$$

となる。岡島らは、Fig. 20 のとおり、この平均の熱移動量と温冷の体験の一致性が高いことを報告している。

接触してから t 秒後の時点での温度勾配を $\dot{T}(t)$ とすると、その瞬間における熱移動量は

$$q(t) = \dot{Q}(t) = C\dot{T}(t) \quad (11)$$

¹⁶熱移動量 (W) を単位接触面積当たりで計算した量は熱流束 (W/m^2) に相当する。

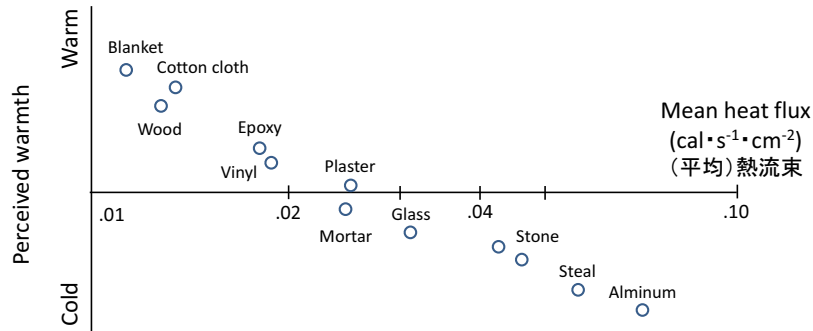


Figure 20. 平均熱流束（単位面積当たりの q_{ave} ）と温冷知覚の関係（[115] より再描画）．熱流束は、 38°C に温められたプローブを室温 21°C に放置された素材に接触させ、プローブの温度が 35°C になるまでの平均値．現在では、熱流束の単位は W/m^2 を使うのが一般的である．

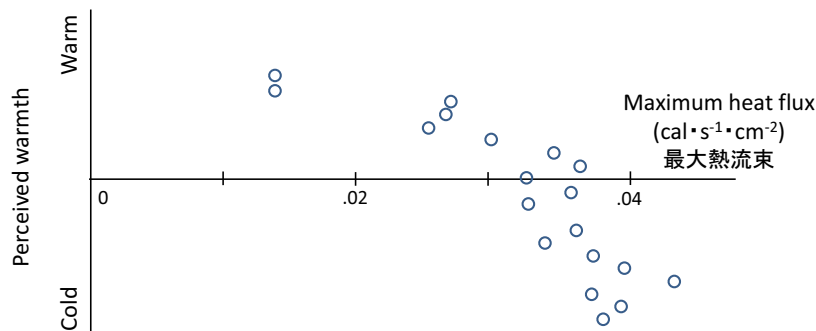


Figure 21. 熱流束の最大値（単位面積当たりの q_{max} ）と温冷知覚の関係（[116] より再描画）．サンプルは全て布で、○の一つ一つが異なる布地．Fig. 20 では、横軸が対数であるが、Fig. 21 ではそうでないことに留意して比較すること．

となる．接触後の温度勾配が時間に著しく依存する場合、その最大値 (\dot{T}_{max}) を用いて、熱移動量の最大値 (q_{max}) は

$$q_{max} = C\dot{T}_{max} \quad (12)$$

となる． q_{max} は通常、指が素材に触れた直後に観察され、温冷感によく対応する [116]．Fig. 21 に、布地を試料として川端らが報告した q_{max} と温冷知覚の対応を示す¹⁷．

q_{ave} と q_{max} のどちらを使うべきかについてであるが、ほとんどの場合、これらは非常に相関の高い量であると考えられ、どちらを使用しても良いだろう． q_{ave} については、平均値を算出する区間について統一的な合意が無い．そのことを考えると、 q_{max} の利用が無難であると言えるかもしれない．しかし、 q_{max} は瞬間最大値であるという性質上、計測誤差が生じやすいことに留意しなければならない．

ここまでは、熱量が統制されたプローブによる研究例を紹介してきたが、Fig. 22 に、手が素材に接触した後の温度変化の例 [119] を示す．左から、発泡スチロール、ひのき材、みかげ石、アル

¹⁷岡島ら [115] と川端ら [116] の温冷感に関する先駆的な研究は、1976 年という同時期に別々の学会で発表されており、いずれも熱移動量が温冷感とよく対応することを示した．違いは、熱移動量の平均を用いるか最大値を用いるかである．

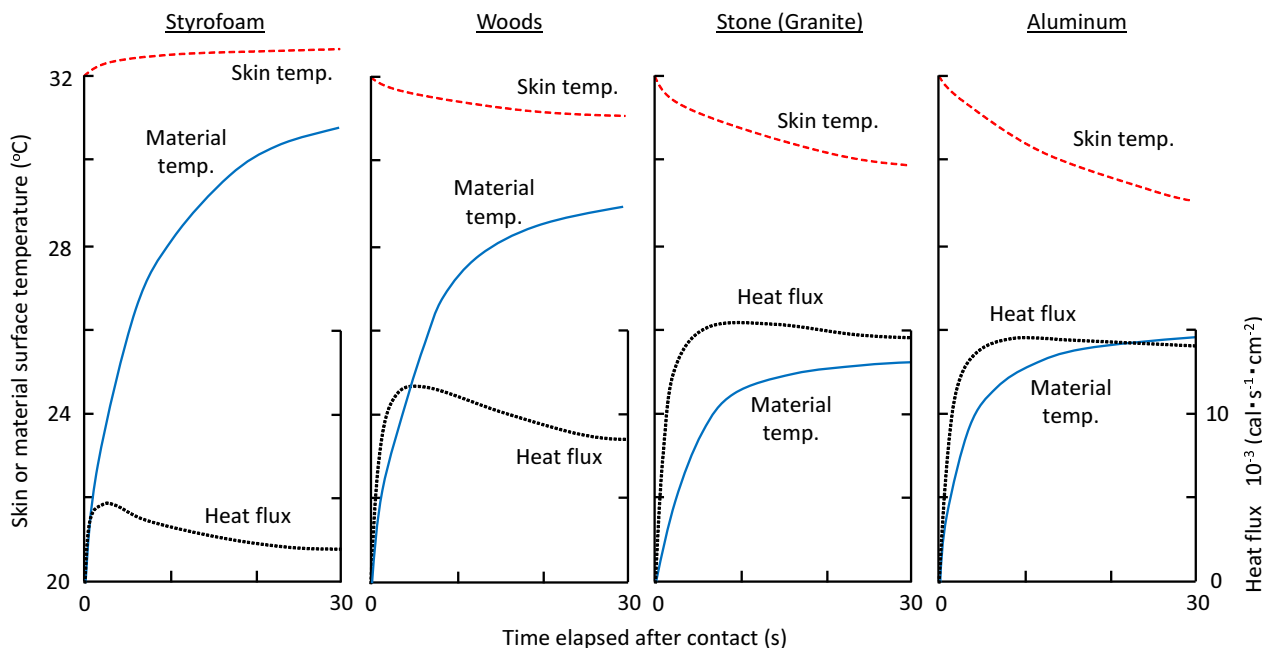


Figure 22. 手掌部で素材に触れた際の温度変化と熱移動量 ([119] より再描画). 温度は皮膚と素材の表面で計測されたもの.

ミニウムに接触したときの温度変化を示す. 接触時の皮膚の温度を 32°C として, 右側の材料にいくほど, 接触直後に皮膚の温度が大きく低下する. 同時に, 素材の表面温度は時間とともに大きくなる. これを基に計算される単位面積当たりの熱移動量も右側の材料ほど大きい. 温度勾配は, ほぼ一定の材料もあれば, 時間とともに変化する材料もある. 発泡スチロールは熱の移動量が小さいため, 発熱によって接触部の手の温度はむしろ上昇している. このように, 接触後の温度変化と熱移動量は密接に関係しているため, 熱移動量の代わりに, 接触後の手の温度変化を用いても, 温冷感とよく対応する指標となる [120]. これは, 式 (10), (12) から明らかである.

ここまで, 熱移動量や手の温度変化について述べてきたが, これらは手やプローブが物に実際に触れた際に移動する熱量に関するものであった. つまり, 物に対して定義される量ではなかった. あくまでも物に対する物理量を温冷知覚と対応付けたい場合には, 熱の移動し難さを表す熱抵抗が勧められる [3, 101]. これは, 接触する 2 物体間で, 温度の高い物体から低い物体へと 1 W で熱が移動する (1 J の熱が 1 s で移動) ために必要な 2 物体間の温度差によって定義される. 熱抵抗は温冷知覚に関する便利な物理量ではあるが, 静的なものとして定義される. 実際には既に述べたように熱の移動もしくは温度変化のダイナミクスが重要である [116, 121, 122].

熱移動量や熱抵抗は指と物体の間で定義され, 物体の素材のみでなく, 構造にも拠るマクロな指標である. すなわち, 物体表面の凹凸や形も, その物体の温冷知覚を決定する要素となる. 例えば, 同じ素材からなる 2 種類の物体があり, 一方の表面は粗く仕上げられており, もう一方は滑らかに仕上げられているとき, 前者の方が接触面積が限られており熱抵抗が大きいため, 温かく感じられる. また, 同じ素材でも中が空洞な物体と, 密な物体では, 前者の熱抵抗が大きくて温かく感じられる.

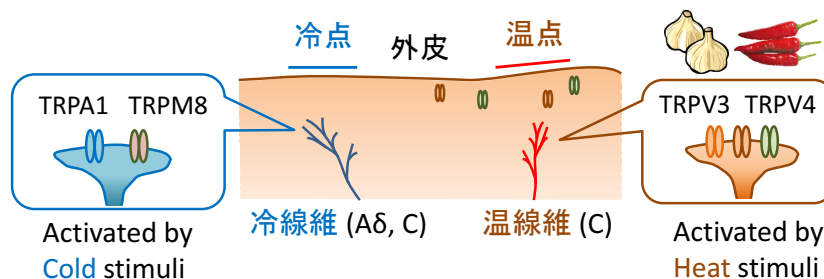


Figure 23. 温度の受容. 皮膚の温冷点, 温冷線維および自由神経終末およびケラチノサイト中の温度受容体 (TRP イオンチャネル)

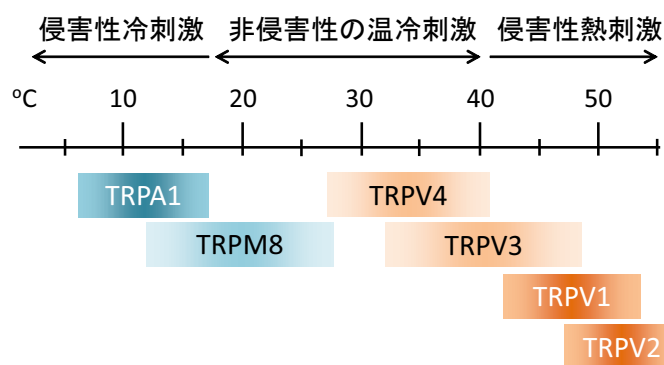


Figure 24. 温度受容体の感応帯 ([123] より再描画)

4.3 温冷知覚の受容体

温冷の知覚機序に関して、温刺激もしくは冷刺激のみに選択的に反応する皮膚上の微小領域（温点・冷点）や、温冷のそれぞれの刺激にのみ選択的に反応する神経線維（温線維・冷線維）の存在が永らく知られていた（Fig. 23）。温点は冷点に比べてずっと疎であり、温線維の伝達速度は冷線維のそれよりも遅い。1990年代後半に、自由神経終末などに存在するTRPイオンチャネルの温冷知覚への関与が明らかになり、温冷知覚原理の研究は状況が急変し、現在では、これらが温度受容体であることが定着している [26, 123, 124, 125]¹⁸。これらは、限られた帯域の温度刺激に応答することで、温と冷の両方の感覚を生じさせる。例えば、TRPV1と呼ばれる受容体は、およそ43°C以上の侵害的な熱刺激（痛みを伴う刺激）によって活性化する¹⁹。その他に、TRPV2, TRPV3, そして、TRPV4が存在し、それぞれが異なった温度帯で活性化する（Fig. 24）。これらの受容体は人の体温よりも温かい刺激に対する受容体であり、体温よりも低い刺激に対しては、TRPA1²⁰とTRPM8が反応する。以上の6種類の温度受容TRPチャネルが物質の温度知覚に関与している。ここでも機能が限られたメカニズムを複数種類併用して、広い帯域の刺激に対応していることに注意したい。また、以上のイオンチャネルは皮膚に存在するものであるが、臓器や舌

¹⁸TRPはTransient Receptor Potentialの略で、初期に発見されたイオンチャネルが刺激に対して一過性の応答を示すということが名前の由来である。

¹⁹イオンチャネルが活性化される温度閾値は、条件によって変化する。

²⁰TRPA1が侵害性の冷刺激に応答し、冷感を生じさせるかどうかは議論がある [126]。

にだけ存在するものもある。

TRP イオンチャネルの中には温度以外に化学物質（典型的には刺激物）にも反応するものがあり、マルチモーダルな受容機構と言われる。例えば、TRPV1はカプサイシン受容体であり、熱のみでなく、酸やトウガラシの辛味成分として有名なカプサイシンにも応答する²¹。また、TRPM8はメントールやミントの成分にも応答する。したがって、カプサイシンとメントールによって温感と冷感が感じられるわけは、これらの化学物質が温冷感を生起させる受容体を活性化させるからである。

温冷感に関係するイオンチャネルは、感覚神経に発現する以外に、皮膚外表の角化した部分（ケラチノサイト）にも存在し、温度受容に貢献している可能性が高い [127]。特に、温刺激に反応するTRPV3とTRPV4は、むしろ角化した表皮中に多く存在し、周辺の自由神経終末へと情報を伝えている [128]。また、以上のTRPチャネルは温冷感を生起させる以外の重要な生理的役割を果たしている。

触覚の話はまだつづく：痛いかな、温いかな、冷たいかな？

痛くない（非侵襲性）程度の温刺激と冷刺激を近接させて皮膚に同時に与えたらどのようなことが生じるか？こんな風変わりな実験を行った人たちが居る。その結果は実に意外である。温と冷の刺激に同時に触れると、温刺激のみに触れたときよりも、より温かく感じられる。むしろ、熱いと感じて反射的に回避してしまうこともある。このような錯覚現象を thermal grill illusion という。grill は、焼き料理のときに使う網のことである。網のように、温刺激と冷刺激を交互に並べて提示したときに生じる錯覚現象である。

²¹炎症性疼痛の治療薬としてカプサイシン軟膏が用いられるのは、TRPV1がこれらの疼痛と関与するからである。

5 結びに

以上の知覚機序は Table 2 のようにまとめることができる。個々の感覚受容器の機能は実に限定的であるにも関わらず、複数の感覚受容器と触れ方を併用することにより、多次元かつ広帯域の触知覚が実現されている。それぞれの次元の情報を知覚するには、適した触れ方があり、それは知覚機序から自ずと決定する。ヒトはそのような合理的な触察行動を無意識にとることが知られている [129, 130, 131, 132].

本資料を公開するに至った理由は、日本語のテクスチャ触知覚を解説する導入書がほとんど見当たらないからである。一方で、さらに勉強を進めるために下記の良書がある。いずれも、物理学者、心理学者、神経生理学者、機械工学者らが執筆したものであるが、各分野のしかし触覚を専門としない学者向けに執筆されたものであり、専門外の学習者にとっては十分に理解しきれる内容ではない。本資料は特に、諸分野のバランスおよび俯瞰視点に配慮しており、良き導入となれば幸いである。

- 物理・心理物理学をバックグラウンドとする方にお勧めの文献
 - Bergmann Tiest, W.M.: Tactual perception of material properties. *Vision Research*. 50(24), 2775–2782 (2010)
- 神経生理学をバックグラウンドとする方にお勧めの文献
 - Bensmaïa, S.J.: Texture from touch. *Scholarpedia*. 4(8), 7956 (2009)
 - 吉岡 隆: 触覚によるテクスチャ知覚. *生体の科学*, 63(4), 263–275 (2012)
- 機械工学をバックグラウンドとする方にお勧めの文献
 - van Kuilenburg, J., Van Der Heide, E.: A review of fingerpad contact mechanics and friction and how this affects tactile perception. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part J. Journal of Engineering Tribology*. 229(3), 243–258 (2015)
- 心理学をバックグラウンドとする方およびハプティック・インタフェースに関心のある方にお勧めの文献
 - Klatzky, R.L., Pawluk, D., Peer, A.: Haptic perception of material properties and implications for applications. *Proceedings of the IEEE* 101(9), 2081–2092 (2013)
 - Okamoto, S., Nagano, H., Yamada, Y.: Psychophysical dimensions of tactile perception of textures. *IEEE Transactions on Haptics*. 6(1), 81–93 (2013)
- マクロ・マイクロ粗さの知覚機序に関するすばらしい解説記事
 - Hollins, M., Bensmaïa, S.: The coding of roughness. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 61(3), 184–195 (2007)

Table 2. 触覚の5次元の知覚機序

| 知覚次元 | 触察動作 | 知覚機序 | 受容単位・受容体 | 関係する物理量 |
|--------|----------|---------------|-----------|---------|
| マクロ粗さ | 押す | 圧分布 | SA ユニット | 表面粗さ |
| マイクロ粗さ | 擦る | 皮膚の振動 | FA ユニット | 表面粗さ |
| 柔らかさ | 押す | 接触面積・圧分布 | SA ユニット | 剛性・弾性係数 |
| 硬さ | 叩く | 物体の振動 | FA ユニット | 剛性・減衰係数 |
| 摩擦 | 擦る | 皮膚のせん断変形・摩擦振動 | - | 摩擦 |
| 温冷 | 押す・軽く触れる | 熱の移動 | TRP チャンネル | 熱抵抗 |

* SA ユニット: 遅順応型ユニット (メルケル小体), FA ユニット: 速順応型ユニット (マイスナー小体, パチニ小体). 各次元と触察動作の関係については, 文献 [129] を参照.

触覚の話は尽きることがない: ブーバ, ルーキ, タケテ, デクター

文字化けしているわけではない。これは、触感の多感覚性に関するキーワード（音象）である。触感の官能評価では通常、形容詞が用いられるが、Etziら [133] は、意味のない言葉として、ブーバとキキ、タケテとマルマ、ルウラとルキ、デクターとボボロウを対にして用いて、採点課題を行った。その結果、粗い表面は、キキ、ルキ、タケテ、デクターの点数が高く、滑らかな表面ではルウラやボボロウの点数が高かった。さらにこれらの音印象は感性的な応答とも結びつくことが知られており、多感覚的である。例えば、食品の味覚・食感についてこんな研究がある。ポテトチップスのような割れる音がする食べ物や、クランベリーソースのような酸味のあるものは、タケテがあてはまる [134]。ミントチョコにはキキが良いという具合である。図形に対する視覚的評価では、丸みをおびたものはブーバであり、角の立ったものはキキである [134, 135]。これらの意味のない言葉は、感覚を超えた概念的な性質である。音象が喚起するイメージと触感の対応についての研究は、製品のイメージやコンセプトを象徴する名づけの根拠になる。例えば、キッコロとモリゾーというキャラクター（愛知万博のイメージキャラクター）がいるが、前者がとげとげした元気なキャラ、後者が丸みを帯びた風ぼうの癒しキャラであり、外観や設定と名前が対応させられている。

韓国・平昌には、BULLET MAN（図）という芸術像が屋外展示されており、日本では「モルゲッソヨ像」として知られる。ある日本の新聞記者が現地の若者に、あの像は何であるかと問うたところ、若者がモルゲッソヨ（知りません）と回答し、記者の勘違いからモルゲッソヨ像として報じられ、知られることとなった^a。私は、モルゲッソヨという名称が定着した理由の一つとして、音印象と芸術像の印象が一致したからではないかと考えている。ある仮説を基に、学生144名に、像の頭部と体部に「モル」もしくは「ゲッソヨ」の名前を付けるように回答を依頼した。すると、122名の学生が頭部が「モル」であり、体部が「ゲッソヨ」であると回答した。この像は、モルの部分とゲッソヨの部分から構成されると解釈できる。像は、男性（人間）の多面性を表現したものであり^b、モルの側面とゲッソヨの側面が表現されていると言える。このように、名前が一役を買って、像が衆目を集めることとなったのかもしれない。



^aこの逸話には矛盾がある。現地の若者が韓国語でモルゲッソヨと回答したならば、記者は韓国語で質問したはずである。韓国語の話者・学習者がモルゲッソヨの意味を理解できなかったというのはおかしい。

^bhttps://www.asahi.com/articles/ASL2V5HSKL2VUEHF00D.html?iref=sp_ss_date

参考文献

- [1] S. Okamoto, H. Nagano, and Y. Yamada, “Psychophysical dimensions of tactile perception of textures,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 6, no. 1, pp. 81–93, 2013.
- [2] S. J. Bensmaïa, “Texture from touch,” *Scholarpedia*, vol. 4, no. 8, p. 7956, 2009.
- [3] W. M. Bergmann Tiest, “Tactual perception of material properties,” *Vision Research*, vol. 50, no. 24, pp. 2775–2782, 2010.
- [4] R. L. Klatzky, D. Pawluk, and A. Peer, “Haptic perception of material properties and implications for applications,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 9, pp. 2081–2092, 2013.
- [5] J. van Kuilenburg, M. A. Masen, and E. van der Heide, “A review of fingerpad contact mechanics and friction and how this affects tactile perception,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 229, no. 3, pp. 243–258, 2015.
- [6] T. Yoshioka, J. C. Craig, G. C. Beck, and S. S. Hsiao, “Perceptual constancy of texture roughness in the tactile system,” *Journal of Neuroscience*, vol. 31, no. 48, pp. 17 603–17 611, 2011.
- [7] 吉岡隆, “触覚によるテクスチャ知覚,” *生体の科学*, vol. 63, no. 4, pp. 263–275, 2012.
- [8] N. Kudoh, “Tactile perception of textured surfaces: Effects of temporal frequency on perceived roughness by passive touch,” *Tohoku Psychologica Folia*, vol. 47, pp. 21–28, 1988.
- [9] Z. M. Boundy-Singer, H. P. Saal, and S. J. Bensmaïa, “Speed invariance of tactile texture perception,” *Journal of Neurophysiology*, vol. 118, pp. 2371–2377, 2017.
- [10] H. Nagano, S. Okamoto, and Y. Yamada, “Semantically layered structure of tactile textures,” in *Haptics: Neuroscience, Devices, Modeling, and Applications, Part I, Lecture Notes in Computer Science*, M. Auvray and C. Duriez, Eds. Springer, 2014, vol. 8618, pp. 3–9.
- [11] X. Chen, C. J. Barnes, T. H. C. Childs, B. Henson, and F. Shao, “Materials’ tactile testing and characterization for consumer products’ affective packaging design,” *Materials and Design*, vol. 30, pp. 4299–4310, 2009.
- [12] S. Guest, J. M. Dessirier, A. Mehrabyan, F. McGlone, G. Essick, G. Gescheider, A. Fontana, R. Xiong, R. Ackerley, and K. Blot, “The development and validation of sensory and emotional scales of touch perception,” *Attention, Perception & Psychophysics*, vol. 73, pp. 531–550, 2011.
- [13] T. Matsuoka, H. Kanai, H. Tsuji, T. Shinya, and T. Nishimatsu, “Predicting texture image of covering fabric for car seat by physical properties,” *Journal of Textile Engineering*, vol. 54, no. 3, pp. 63–74, 2008.
- [14] S. Okamoto, H. Nagano, K. Kidoma, and Y. Yamada, “Specification of individuality in causal relationships among texture-related attributes, emotions, and preferences,” *International Journal of Affective Engineering*, vol. 15, no. 1, pp. 11–19, 2016.
- [15] K. Kidoma, S. Okamoto, H. Nagano, and Y. Yamada, “Graphical modeling method of texture-related affective and perceptual responses,” *International Journal of Affective Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 27–36, 2017.

-
- [16] K. Drewing, C. Weyel, H. Celebi, and D. Kaya, “Feeling and feelings: Affective and perceptual dimensions of touched materials and their connection,” *Proceedings of IEEE World Haptics Conference*, pp. 25–30, 2017.
- [17] I. H. M. Hashim, S. Kumamoto, K. Takemura, T. Maeno, S. Okuda, and Y. Mori, “Tactile evaluation feedback system for multi-layered structure inspired by human tactile perception mechanism,” *Sensors*, vol. 17, p. 2601, 2017.
- [18] R. Fagiani, F. Massi, E. Chatelet, Y. Berthier, and A. Akay, “Tactile perception by friction induced vibrations,” *Tribology International*, vol. 44, pp. 1100–1110, 2011.
- [19] G. D. Lamb, “Tactile discrimination of textured surfaces: Psychophysical performance measurements in humans,” *Journal of Physiology*, vol. 338, pp. 551–565, 1983.
- [20] E. M. Meftah, L. Belingard, and C. E. Chapman, “Relative effects of the spatial and temporal characteristics of scanned surfaces on human perception of tactile roughness using passive touch,” *Experimental Brain Research*, vol. 132, no. 3, pp. 351–361, 2000.
- [21] M. Hollins and S. R. Rinser, “Evidence for the duplex theory of tactile texture perception,” *Attention, Perception & Psychophysics*, vol. 62, no. 4, pp. 695–705, 2000.
- [22] A. Dépeault, E.-M. Meftah, and C. E. Chapman, “Tactile perception of roughness: Raised-dot spacing, density and disposition,” *Experimental Brain Research*, vol. 197, no. 3, pp. 235–244, Aug 2009.
- [23] 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,” *Journal of Neuroscience*, vol. 17, no. 19, pp. 7480–7489, 1997.
- [24] C. E. Connor, S. S. Hsiao, J. R. Phillips, and K. O. Johnson, “Tactile roughness: Neural codes that account for psychophysical magnitude estimates,” *Journal of Neuroscience*, vol. 10, no. 12, pp. 3823–3836, 1990.
- [25] T. Yoshioka, B. Gibb, A. Dorsch, S. S. Hsiao, and K. O. Johnson, “Neural coding mechanisms underlying perceived roughness of finely textured surfaces,” *Journal of Neuroscience*, vol. 21, no. 17, pp. 6905–6916, 2001.
- [26] R. J. Schepers and M. Ringkamp, “Thermoreceptors and thermosensitive afferents,” *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, vol. 34, pp. 177–184, 2010.
- [27] J. R. Phillips, R. S. Johansson, and K. O. Johnson, “Responses of human mechanoreceptive afferents to embossed dot arrays scanned across fingerpad skin,” *Journal of Neuroscience*, vol. 12, no. 3, pp. 827–839, 1992.
- [28] D. R. Lesniak and G. J. Gerling, “Predicting SA-I mechanoreceptor spike times with a skin-neuron model,” *Mathematical Biosciences*, vol. 220, no. 1, pp. 15–23, 2009.
- [29] K. O. Johnson, “The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors,” *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 11, pp. 455–461, 2001.
- [30] J. R. Phillips and K. O. Johnson, “Tactile spatial resolution. II. Neural representation of bars, edges, and gratings in monkey primary afferents,” *Journal of Neurophysiology*, vol. 46, no. 6, pp. 1192–1203, 1981.

- [31] C. E. Connor and K. O. Johnson, “Neural coding of tactile texture: Comparison of spatial and temporal mechanisms for roughness perception,” *The Journal of Neuroscience*, vol. 12, no. 9, pp. 3414–3426, 1992.
- [32] A. I. Weber, H. P. Saala, J. D. Lieberb, J.-W. Chenga, L. R. Manfredia, J. F. D. III, and S. J. Bensmaïa, “Spatial and temporal codes mediate the tactile perception of natural textures,” *PNAS*, vol. 110, no. 42, pp. 17 107–17 112, 2013.
- [33] M. A. Lawrence, R. Kitada, R. L. Klatzky, and S. J. Lederman, “Haptic roughness perception of linear gratings via bare finger or rigid probe,” *Perception*, vol. 36, pp. 547–557, 2007.
- [34] K. Drawing, “Judged roughness as a function of groove frequency and groove width in 3D-printed gratings,” in *Haptics: Science, Technology, and Applications*, D. Prattichizzo, H. Shinoda, H. Z. Tan, E. Ruffaldi, and A. Frisoli, Eds. Springer International Publishing, 2018, pp. 258–269.
- [35] M. M. Taylor and S. J. Lederman, “Tactile roughness of grooved surfaces: A model and the effect of friction,” *Perception & Psychophysics*, vol. 17, no. 1, pp. 23–36, 1975.
- [36] K. Sathian, A. W. Goodwin, K. T. John, and I. Darian-Smith, “Perceived roughness of a grating: Correlation with responses of mechanoreceptive afferents innervating the monkey’s fingerpad,” *Journal of Neuroscience*, vol. 9, no. 4, pp. 1273–1279, 1989.
- [37] M. A. Muniak, S. Ray, S. S. Hsiao, J. F. Dammann, and S. J. Bensmaïa, “The neural coding of stimulus intensity: Linking the population response of mechanoreceptive afferents with psychophysical behavior,” *Journal of Neuroscience*, vol. 27, no. 43, pp. 11 687–11 699, 2007.
- [38] A. Sutu, E. Meftah, and E. Chapman, “Physical determinants of the shape of the psychophysical curve relating tactile roughness to raised-dot spacing: Implications for neural coding of roughness,” *Journal of Neurophysiology*, vol. 109, no. 5, pp. 1403–1415, 2013.
- [39] T. Yoshioka and J. Zhou, “Factors involved in tactile texture perception through probes,” *Advanced Robotics*, vol. 23, no. 6, pp. 747–766, 2009.
- [40] R. Klatzky, S. Lederman, C. Hamilton, M. Grindley, and R. Swendsen, “Feeling textures through a probe: Effects of probe and surface geometry and exploratory factors,” *Perception & Psychophysics*, vol. 65, no. 4, pp. 613–631, 2003.
- [41] S. J. Bensmaïa and M. Hollins, “The vibrations of texture,” *Somatosensory and Motor Research*, vol. 20, no. 1, pp. 33–43, 2003.
- [42] S. J. Lederman, “Tactile roughness of grooved surfaces: The touching process and effects of macro- and microsurface structure,” *Perception & Psychophysics*, vol. 16, no. 2, pp. 385–395, 1974.
- [43] C. J. Cascio and K. Sathian, “Temporal cues contribute to tactile perception of roughness,” *The Journal of Neuroscience*, vol. 21, no. 14, pp. 5289–5296, 2001.
- [44] T. Miyaoka, T. Mano, and M. Ohka, “Mechanisms of fine-surface-texture discrimination in human tactile sensation,” *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 105, pp. 2485–2492, 1999.
- [45] S. J. Bensmaïa and M. Hollins, “Pacian representations of fine surface texture,” *Perception & Psychophysics*, vol. 67, no. 5, pp. 842–854, 2005, s. J. Bensmaia; Mark Hollins.
- [46] M. Hollins, S. J. Bensmaïa, and S. Washburn, “Vibrotactile adaptation impairs discrimination of fine, but not coarse, textures,” *Somatosensory & Motor Research*, vol. 18, no. 4, pp. 253–262, 2001.

-
- [47] M. Hollins, A. Fox, and C. Bishop, “Imposed vibration influences perceived tactile smoothness,” *Perception*, vol. 29, no. 12, pp. 1455–1465, 2000.
- [48] W. M. Bergmann Tiest and A. M. L. Kappers, “Kinaesthetic and cutaneous contributions to the perception of compressibility,” in *Haptics: Perception, Devices and Scenarios, Lecture Notes in Computer Science*, M. Ferre, Ed. Springer, 2008, vol. 5024, pp. 255–264.
- [49] M. A. Srinivasan and R. H. LaMotte, “Tactual discrimination of softness,” *Journal of Neurophysiology*, vol. 73, no. 1, pp. 88–101, 1995.
- [50] W. M. Bergmann Tiest and A. M. L. Kappers, “Cues for haptic perception of compliance,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 2, no. 4, pp. 189–199, 2009.
- [51] T. Irie, N. Fujita, H. Nakanishi, and M. Ohta, “Sensory perception mechanism on softness,” *The transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers. A*, vol. J91, no. 1, pp. 162–171, 2008.
- [52] F. E. van Beek, D. J. F. Heck, H. Nijmeijer, W. M. Bergmann Tiest, and A. M. Kappers, “The effect of damping on the perception of hardness,” in *Proceedings in IEEE World Haptics Conference*, 2015, pp. 82–87.
- [53] R. M. Friedman, K. D. Hester, B. G. Green, and R. H. LaMotte, “Magnitude estimation of softness,” *Experimental Brain Research*, vol. 191, pp. 133–142, 2008.
- [54] R. M. Peters, E. Hackeman, and D. Goldreich, “Diminutive digits discern delicate details: Fingertip size and the sex difference in tactile spatial acuity,” *Journal of Neuroscience*, vol. 29, no. 50, pp. 15 756–15 761, 2009.
- [55] A. Bicchi, E. P. Scilingo, and D. De Rossi, “Haptic discrimination of softness in teleoperation: the role of the contact area spread rate,” *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, vol. 16, no. 5, pp. 496–504, 2000.
- [56] K. Fujita and H. Ohmori, “A new softness display interface by dynamic fingertip contact area control,” *Proceedings of 5th World Multiconference on Systemics, Cybernetics, and Informatics*, pp. 78–82, 2001.
- [57] F. Kimura, A. Yamamoto, and T. Higuchi, “Development of a 2-dof softness feeling display for tactile tele-presentation of deformable surfaces,” *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1822–1827, 2010.
- [58] E. P. Scilingo, M. Bianchi, G. Grioli, and A. Bicchi, “Rendering softness: Integration of kinesthetic and cutaneous information in a haptic device,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 3, no. 2, pp. 109–118, 2010.
- [59] H. Z. Tan, N. I. Durlach, G. L. Beauregard, and M. A. Srinivasan, “Manual discrimination of compliance using active pinch grasp: The roles of force and work cues,” *Perception & Psychophysics*, vol. 57, pp. 495–510, 1995.
- [60] A. M. Okamura, M. R. Cutkosky, and J. T. Dennerlein, “Reality-based models for vibration feedback in virtual environments,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 6, no. 3, pp. 245–252, 2001.

- [61] K. J. Kuchenbecker and G. Niemeyer, “Improving telerobotic touch via high-frequency acceleration matching,” *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3893–3898, 2006.
- [62] K. Higashi, S. Okamoto, and Y. Yamada, “Effects of mechanical parameters on hardness experienced by damped natural vibration stimulation,” *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pp. 1539–1544, 2015.
- [63] —, “What is the hardness perceived by tapping?” in *Haptics: Perception, Devices, Control, and Applications, Part I*, ser. Lecture Notes in Computer Sciences, F. Bello, H. Kajimoto, and Y. Visell, Eds., vol. 9774. Springer, 2016, pp. 3–12.
- [64] K. Higashi, S. Okamoto, Y. Yamada, H. Nagano, and M. Konyo, “Hardness perception by tapping: Effect of dynamic stiffness of objects,” *Proceedings of IEEE World Haptics Conference*, pp. 37–41, 2016.
- [65] K. Higashi, S. Okamoto, and Y. Yamada, “Perceived hardness through actual and virtual damped natural vibrations,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 11, no. 4, pp. 646–651, 2018.
- [66] P. Wellman and R. D. Howe, “Towards realistic display in virtual environments,” in *Proceedings of ASME Dynamic Systems and Control Division*, vol. 57, 1995, pp. 713–718.
- [67] J. D. Hwang, M. D. Williams, and G. Niemeyer, “Toward event-based haptics: Rendering contact using open-loop force pulses,” in *Proceedings of IEEE Haptics Symposium*, 2004, pp. 24–31.
- [68] K. Kuchenbecker, J. Fiene, and G. Niemeyer, “Improving contact realism through event-based haptic feedback,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 12, no. 2, pp. 219–230, 2006.
- [69] K. Higashi, S. Okamoto, H. Nagano, M. Konyo, and Y. Yamada, “Perceived hardness by tapping: The role of a secondary mode of vibration,” in *Haptic Interaction: Science, Engineering and Design*, ser. , Lecture Notes in Electrical Engineering, S. Hasegawa, M. Konyo, K.-U. Kyung, T. Nojima, and H. Kajimoto, Eds., vol. 432. Springer, 2016.
- [70] A. Ban, “Soft feel grain for hard plastic,” *日本ロボット学会誌*, vol. 30, no. 5, pp. 494–495, 2012.
- [71] G. Ekman, J. Hosman, and B. Lindström, “Roughness, smoothness, and preference: A study of quantitative relations in individual subjects,” *Journal of Experimental Psychology*, vol. 70, no. 1, pp. 18–26, 1965.
- [72] A. M. Smith, C. E. Chapman, M. Deslandes, J. S. Langlais, and M. P. Thibodeau, “Role of friction and tangential force variation in the subjective scaling of tactile roughness,” *Experimental Brain Research*, vol. 144, no. 2, pp. 211–223, 2002.
- [73] A. M. Smith and G. Basile, “Roughness of simulated surfaces examined with a haptic tool: Effects of spatial period, friction, and resistance amplitude,” *Experimental Brain Research*, vol. 202, no. 1, pp. 33–43, 2010.
- [74] M. Hollins, S. J. Bensmaïa, K. Karlof, and F. Young, “Individual differences in perceptual space for tactile textures: Evidence from multidimensional scaling,” *Attention, Perception & Psychophysics*, vol. 62, no. 8, pp. 1534–1544, 2000.

- [75] R. Ackerley, K. Saar, F. McGlone, and H. B. Wasling, “Quantifying the sensory and emotional perception of touch: Differences between glabrous and hairy skin,” *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, vol. 8, no. 34, 2014.
- [76] S. Ballesteros and M. A. Heller, “Haptic object identification,” in *Human Haptic Perception: Basics and Applications*, M. Grunwald, Ed. Birkhauser, Basel, 2008, pp. 212–213.
- [77] T. Yoshioka, S. J. Bensmaïa, J. C. Craig, and S. S. Hsiao, “Texture perception through direct and indirect touch: An analysis of perceptual space for tactile textures in two modes of exploration,” *Somatosensory and Motor Research*, vol. 24, no. 1-2, pp. 53–70, 2007.
- [78] L. Skedung, K. Danerlöv, U. Olofsson, C. M. Johannesson, M. Aikala, J. Kettle, M. Arvidsson, B. Berglund, and M. W. Rutland, “Tactile perception: Finger friction, surface roughness and perceived coarseness,” *Tribology International*, no. 44, pp. 505–512, 2011.
- [79] T. Ules, A. Hausberger, M. Grießer, S. Schlögländ, and D. P. Gruber, “Introduction of a new in-situ measurement system for the study of touch-feel relevant surface properties,” *Polymers*, vol. 12, no. 6, p. 1380, 2020.
- [80] N. Kawasegi, M. Fujii, T. Shimizu, N. Sekiguchi, J. Sumioka, and Y. Doi, “Physical properties and tactile sensory perception of microtextured molded plastics,” *Precision Engineering*, vol. 38, pp. 292–299, 2014.
- [81] K. Inoue, S. Okamoto, Y. Akiyama, and Y. Yamada, “Effect of material hardness on friction between a bare finger and dry and lubricated artificial skin,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 13, no. 1, pp. 123–129, 2020.
- [82] K. Horiuchi, A. Kashimoto, R. Tsuchiya, M. Yokoyama, and K. Nakano, “Relationship between tactile sensation and friction signals in cosmetic foundation,” *Tribology Letters*, vol. 36, pp. 113–123, 2009.
- [83] N. Arakawa and S. Okamoto, “Less frictional skin-like materials are felt softer in a physically inconsistent manner,” in *Proceedings of IEEE World Haptics Conference*, 2019, p. WPI.10.
- [84] J. Peck and T. L. Childers, “Individual differences in haptic information processing: The “need for touch” scale,” *Journal of Consumer Research*, vol. 30, no. 3, pp. 430–442, 2003.
- [85] —, “If i touch it i have to have it: Individual and environmental influences on impulse purchasing,” *Journal of Business Research*, vol. 59, pp. 765–769, 2006.
- [86] K. Matsui, S. Okamoto, and Y. Yamada, “Relative contribution ratios of skin and proprioceptive sensations in perception of force applied to fingertip,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 7, no. 1, pp. 78–85, 2014.
- [87] F. E. van Beek, R. J. King, C. Brown, M. Di Luca, and S. Keller, “Static weight perception through skin stretch and kinesthetic information: detection thresholds, jnds, and pses,” *IEEE Transactions on Haptics*, 2020.
- [88] K. Drewing and M. O. Ernst, “Integration of force and position cues for shape perception through active touch,” *Brain Research*, vol. 1078, no. 1, pp. 92–100, 2006.
- [89] W. R. Provancher and N. D. Sylvester, “Fingerpad skin stretch increases the perception of virtual friction,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 2, no. 4, pp. 212–223, 2009.

- [90] M. J. Zigler, "An experimental study of the perception of stickiness," *American Journal of Psychology*, vol. 34, no. 1, pp. 73–84, 1923.
- [91] I. Birznieks, P. Jenmalm, A. W. Goodwin, and R. S. Johansson, "Encoding of direction of fingertip forces by human tactile afferents," *The Journal of Neuroscience*, vol. 20, no. 20, pp. 8222–8237, 2001.
- [92] R. S. Johansson and I. Birznieks, "First spikes in ensembles of human tactile afferents code complex spatial fingertip events," *Nature Neuroscience*, vol. 7, no. 2, pp. 170–177, 2004.
- [93] G. Westling and R. S. Johansson, "Responses in glabrous skin mechanoreceptors during precision grip in humans," *Experimental Brain Research*, vol. 66, pp. 128–140, 1987.
- [94] A. M. Smith and S. H. Scott, "Subjective scaling of smooth surface friction," *Journal of Neurophysiology*, vol. 75, no. 5, pp. 1957–1962, 1996.
- [95] S. Guest, A. Mehrabyan, G. Essick, N. Phillips, A. Hopkinson, and F. Mcglone, "Physics and tactile perception of fluid-covered surfaces," *Journal of Texture Studies*, vol. 43, no. 1, pp. 77–93, 2012.
- [96] Y. Nonomura, T. Fujii, Y. Arashi, T. Miura, T. Maeno, K. Tashiro, Y. Kamikawa, and R. Monchi, "Tactile impression and friction of water on human skin," *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, vol. 69, pp. 264–267, 2009.
- [97] M. Konyo, H. Yamada, S. Okamoto, and S. Tadokoro, "Alternative display of friction represented by tactile stimulation without tangential force," in *Haptics: Perception, Devices and Scenarios, Lecture Notes in Computer Science*, M. Ferre, Ed. Springer, 2008, vol. 5024, pp. 619–629.
- [98] A. V. Terekhov and V. Hayward, "Minimal adhesion surface area in tangentially loaded digital contacts," *Journal of Biomechanics*, vol. 44, no. 13, pp. 2508–2510, 2011.
- [99] S. Kawabata and M. Niwa, "Formulas KN-101 and KN-201 for the translation of basic mechanical properties of fabric into hand values and KN-301 from the hand values into total hand value," *Journal of the Textile Machinery Society of Japan*, vol. 33, no. 2, pp. 164–169, 1980.
- [100] M. Yoshida, "Dimensions of tactual impressions (1)," *Japanese Psychological Research*, vol. 10, no. 3, pp. 123–137, 1968.
- [101] H. Shirado and T. Maeno, "Modeling of human texture perception for tactile displays and sensors," *Proceedings of IEEE World Haptics Conference*, pp. 629–630, 2005.
- [102] Y. Tanaka and S. Sukigara, "Evaluation of "shittori" characteristic for fabrics," *Journal of Textile Engineering*, vol. 54, no. 3, pp. 75–81, 2008.
- [103] S. Okamoto, H. Kojima, A. Yamagishi, K. Kato, and A. Tamada, "Layered-modeling of affective and sensory experiences using structural equation modeling: Touch experiences of plastic surfaces as an example," *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2019.
- [104] T. Okajima and Y. Takeda, "Tactile dryness of building materials," *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, vol. 327, pp. 12–19, 1983.
- [105] M. J. Zigler, "An experimental study of the perception of clamminess," *The American Journal of Psychology*, vol. 34, no. 4, pp. 550–561, 1923.

- [106] M. Shibahara and K. Sato, *Illusion of wet sensation by controlling temperature and softness of dry cloth*, 2016, no. 2, pp. 512–520.
- [107] K. Kikegawa, R. Kuhara, J. Kwon, M. Sakamoto, R. Tsuchiya, N. Nagatani, and Y. Nonomura, “Physical origin of a complicated tactile sensation: ‘shittori feel’,” *Royal Society Open Science*, vol. 6, no. 7, p. 190039.
- [108] R. K. Sivamani, J. Goodman, N. V. Gitis, and H. I. Maibach, “Friction coefficient of skin in real-time,” *Skin Research and Technology*, vol. 9, pp. 235–239, 2003.
- [109] M. Egawa, M. Oguri, T. Hirao, M. Takahashi, and M. Miyakawa, “The evaluation of skin friction using a frictional feel analyzer,” *Skin Research and Technology*, vol. 8, pp. 41–51, 2002.
- [110] A. A. Koudine, M. Barquins, P. H. Anthoine, L. Aubert, and J.-L. Lévêque, “Frictional properties of skin: proposal of a new approach,” *International Journal of Cosmetic Science*, vol. 22, pp. 11–20, 2000.
- [111] M. J. Adams, B. J. Briscoe, and S. A. Johnson, “Friction and lubrication of human skin,” *Tribology Letters*, vol. 26, no. 3, pp. 239–253, 2007.
- [112] B. M. Dzidek, M. Adams, Z. Zhang, S. Johnson, S. Bocheau, and V. Hayward, “Role of occlusion in non-coulombic slip of the finger pad,” in *Haptics: Neuroscience, Devices, Modeling, and Applications*, M. Auvray and C. Duriez, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 109–116.
- [113] A. B. Cua and K. W. H. Maibach, “Frictional properties of human skin: relation to age, sex and anatomical region, stratum corneum hydration and transepidermal water loss,” *British Journal of Dermatology*, vol. 123, no. 4, pp. 473–479.
- [114] C. P. Hendriks and S. E. Franklin, “Influence of surface roughness, material and climate condition on the friction of human skin,” *Tribology Letter*, vol. 37, pp. 361–373, 2010.
- [115] T. Okajima, I. Tanahashi, T. Yasuda, and Y. Takeda, “Tactile warmth of building materials,” *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, vol. 245, pp. 1–7, 1976.
- [116] S. Kawabata and Y. Akagi, “Relation between thermal feeling and thermal absorption property of clothing fabric,” *Journal of Textile Machinery Society of Japan*, vol. 30, no. 1, pp. T13–T22, 1977.
- [117] M. Campero, J. Serra, H. Bostock, and J. Ochoa, “Slowly conducting afferents activated by innocuous low temperature in human skin,” *Journal of Physiology*, vol. 535, no. 3, pp. 855–865, 2001.
- [118] H.-N. Ho and L. Jones, “Modeling the thermal responses of the skin surface during hand-object interactions,” *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 130, no. 2, p. 21005, 2008.
- [119] I. Matsui and Y. Kasai, “Study on the surface sensation of building materials: Warmth and cool: Part I,” *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, vol. 263, pp. 21–32, 1978.
- [120] —, “Study on the surface sensation of building materials : Warmth and cool : Part II,” *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, vol. 294, pp. 1–12, 1980.
- [121] A. Yamamoto, B. Cros, H. Hashimoto, and T. Higuchi, “Control of thermal tactile display based on prediction of contact temperature,” *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 1536–1541, 2004.

- [122] H.-N. Ho and L. Jones, “Contribution of thermal cues to material discrimination and localization,” *Perception & Psychophysics*, vol. 68, pp. 118–128, 2006.
- [123] T. Sokabe and M. Tominaga, “Molecular mechanisms underlying thermosensation in mammals,” *Brain and Nerve*, vol. 61, no. 7, pp. 867–873, 2009.
- [124] M. J. Caterina, M. A. Schumacher, M. Tominaga, T. A. Rosen, J. D. Levine, and D. Julius, “The capsaicin receptor: a heat-activated ion channel in the pain pathway,” *Nature*, vol. 389, pp. 816–824, 1997.
- [125] A. Patapoutian, A. Peier, G. Story, and V. Viswanath, “ThermoTRPs and beyond: Mechanisms of temperature sensation,” *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 4, pp. 529–539, 2003.
- [126] 富永真琴, “温度受容体 TRP チャネル,” *生体の科学*, vol. 64, no. 5, pp. 436–437, 2013.
- [127] M. Denda and M. Tsutsumi, “Roles of Transient Receptor Potential proteins (trps) in epidermal keratinocytes,” *Advances in Experimental Medicine and Biology*, vol. 704, pp. 847–860, 2011.
- [128] S. Mandadi, T. Sokabe, K. Shibasaki, K. Katanosaka, A. Mizuno, A. Moqrich, A. Patapoutian, T. Fukumi-Tominaga, K. Mizumura, and M. Tominaga, “TRPV3 in keratinocytes transmits temperature information to sensory neurons via ATP,” *Pflügers Archiv - European Journal of Physiology*, vol. 458, pp. 1093–1102, 2009.
- [129] H. Nagano, S. Okamoto, and Y. Yamada, “Haptic invitation of textures: Perceptually prominent properties of materials determine human touch motions,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 7, no. 3, pp. 345–355, 2014.
- [130] T. Yokosaka, S. Kuroki, J. Watanabe, and S. Nishida, “Linkage between free exploratory movements and subjective tactile ratings,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 10, no. 2, pp. 217–225, 2017.
- [131] M. Shitara, H. Yoshida, M. Kamijo, G. Fujimaki, and H. Yamaguchi, “Investigation into hand movements to assess material properties of wood,” *International Journal of Affective Engineering*, pp. 173–182, 2017.
- [132] M. Cavdan, K. Doerschner, and K. Drewing, “The many dimensions underlying perceived softness: How exploratory procedures are influenced by material and the perceptual task,” in *Proceedings of IEEE World Haptics Conference*, 2019, pp. 437–442.
- [133] R. Etzi, C. Spence, M. Zampini, and A. Gallace, “When sandpaper is ‘kiki’ and satin is ‘bouba’: an exploration of the associations between words, emotional states, and the tactile attributes of everyday materials,” *Multisensory Research*, vol. 29, no. 1–3, pp. 133–155, 2016.
- [134] A. Salgado Montejó, J. Alvarado, C. Velasco, C. Salgado, K. Hasse, and C. Spence, “The sweetest thing: the influence of angularity, symmetry, and the number of elements on shape-valence and shape-taste matches,” *Frontiers in Psychology*, vol. 6, p. 1382, 2015.
- [135] B. Lyman, “Representation of complex emotional and abstract meanings by simple forms,” *Perceptual and Motor Skills*, vol. 49, no. 3, pp. 839–842, 1979.