

入門編

ヒトの触覚のメカニズム

電気通信大学 知能機械工学科

下条 誠

専門: ロボティクス・メカトロニクス 人間工学

ヒトの皮膚

- 成人では $1.6 \sim 1.8\text{m}^2$ の面積と $3 \sim 5\text{Kg}$ の重量を有する最大の器官である。
- 侵害刺激からの保護、体温調節、分泌排泄、合成、免疫、呼吸、経皮吸収、および**感覚受容**の7つの機能を担っている。
- 皮膚構造と機械受容器の位置などが、触覚情報処理に大きな影響を及ぼす。

五感の中の触覚

器官 集中型 通信量

視覚:眼	10 ⁷ bit/s
聴覚:耳	10 ⁵ bit/s
嗅覚:鼻	10 ³ bit/s
味覚:舌	10 ³ bit/s

触覚:皮膚	10 ⁶ bit/s
-------	-----------------------



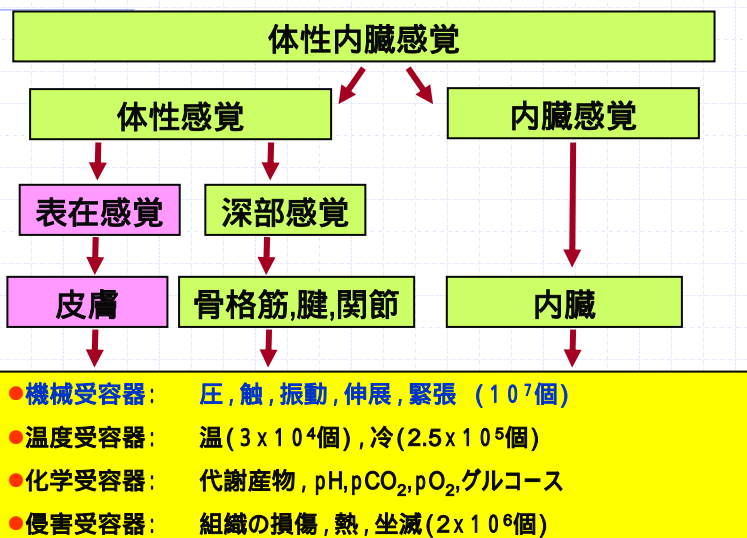
大脳での触感覚領域の広さ

[Penfield et al., 1950]

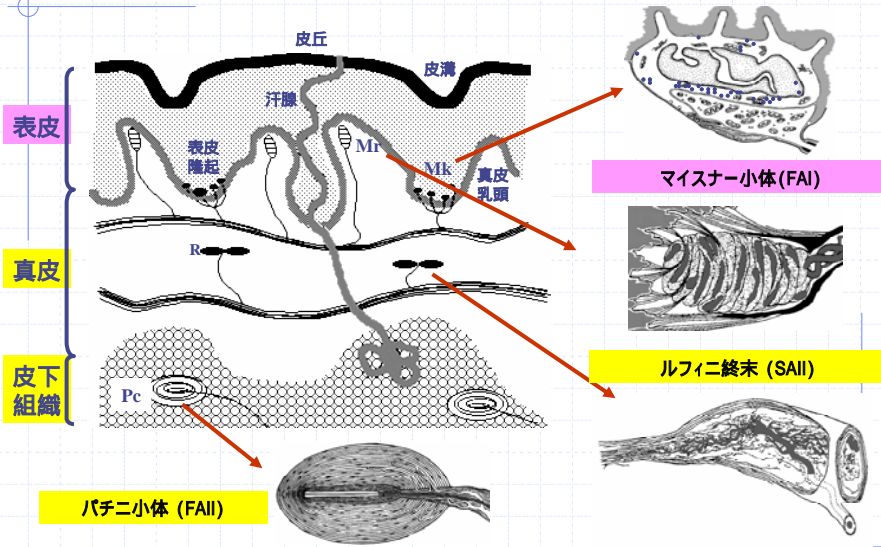
分散型

成人では1.6 ~ 1.8m²の面積と3 ~ 5Kgの重量を有する最大の器官である

身体のすべてに存在する触感覚

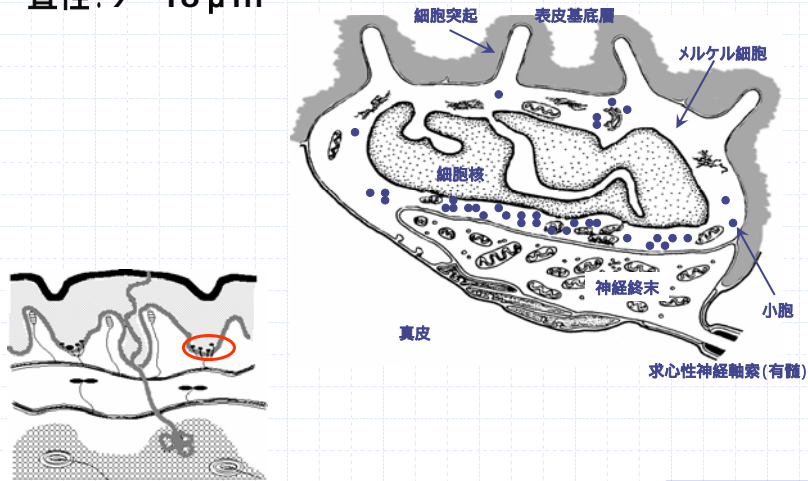


皮膚構造



メルケル細胞 (SAI)

直径: 9 ~ 16 μm

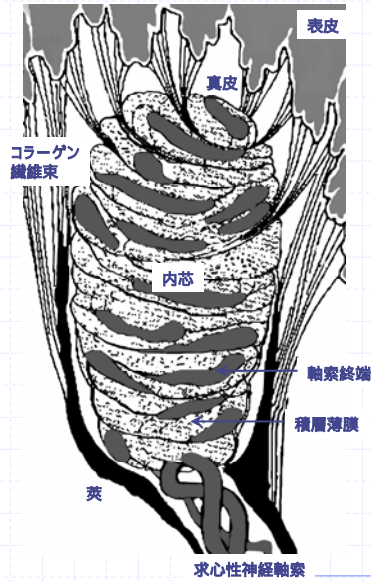
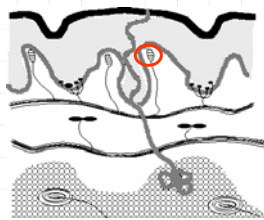


マイスナー小体 (FAI)

長さ80 ~ 150 μm

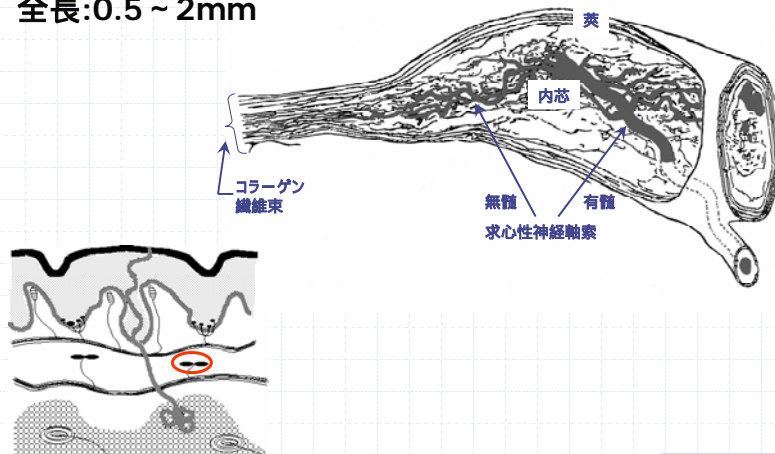
直径20 ~ 40 μm

指尖腹部で10 ~ 24個 / mm^2 の
高い密度で分布する。



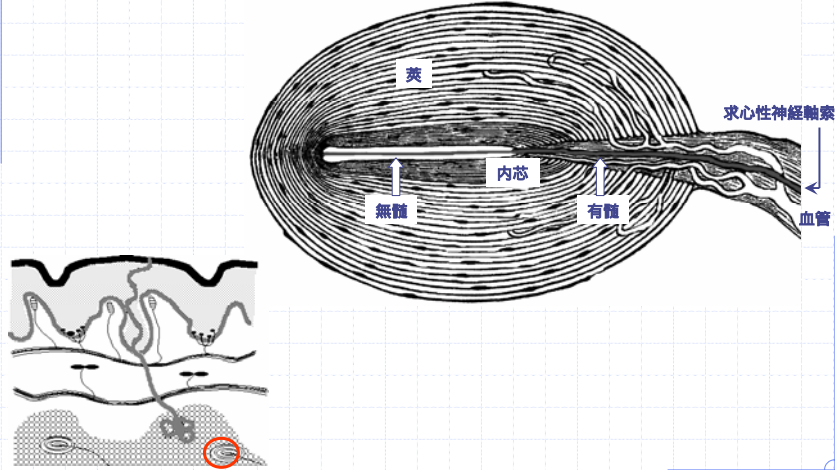
ルフィニ終末 (SAII)

全長: 0.5 ~ 2mm

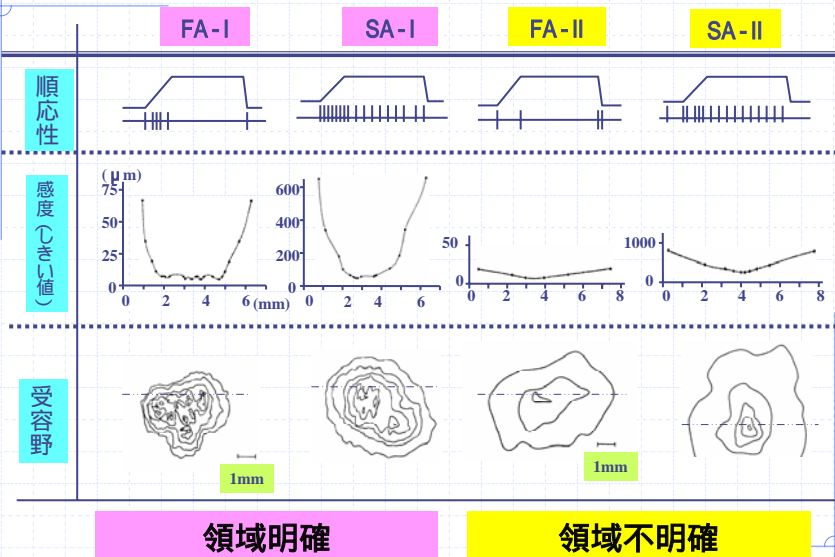


パチニ小体 (FAII)

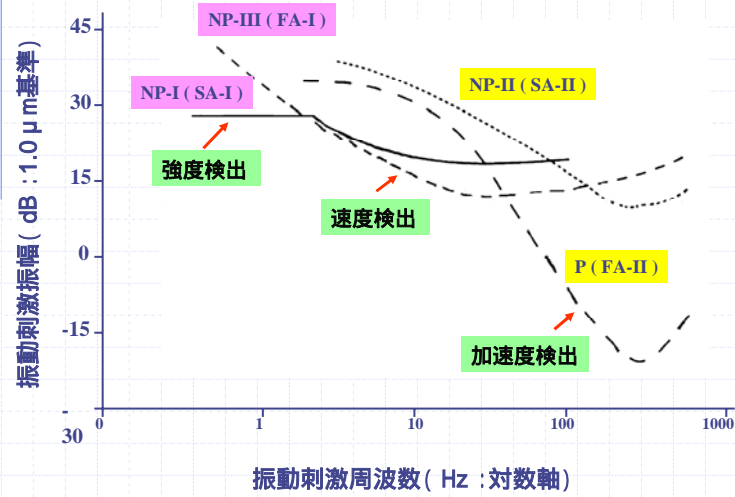
2500 x 750 μmの卵型



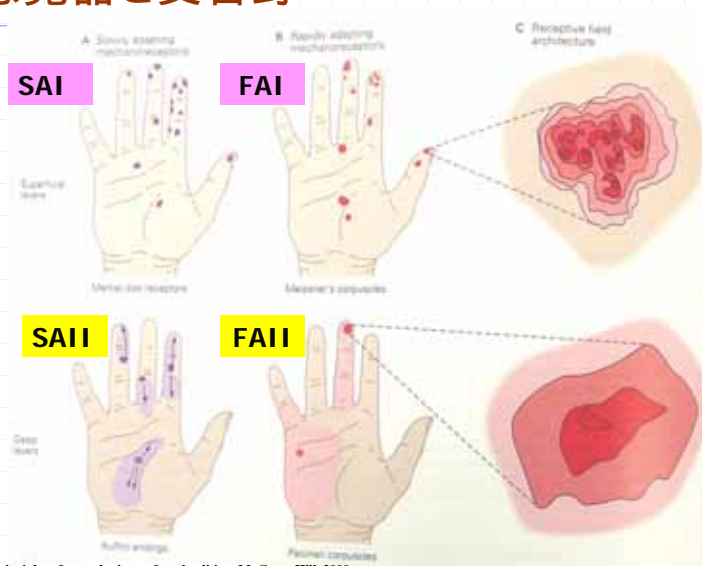
順応性と受容野



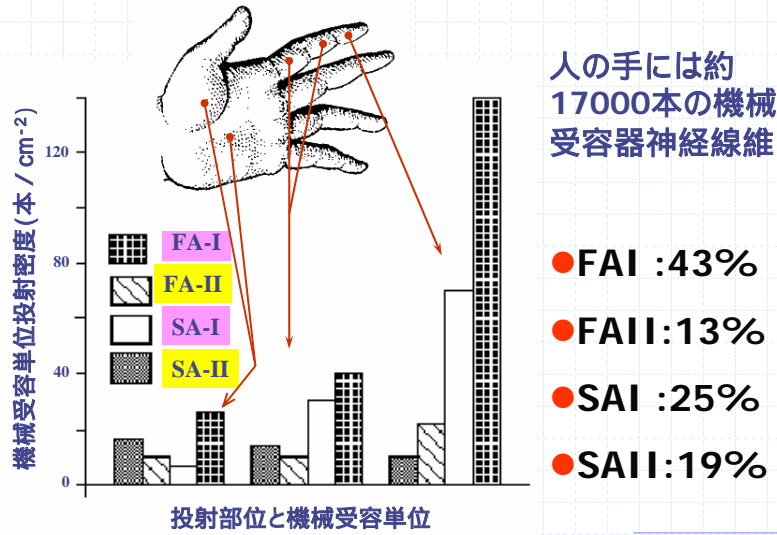
機械受容器の周波数特性



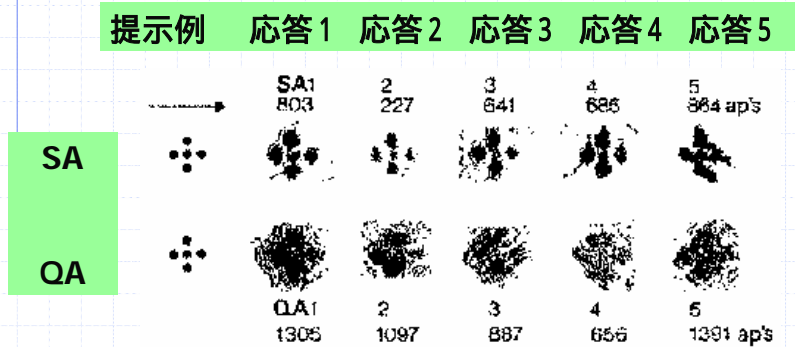
各感覚器と受容野



機械受容器と配置密度



空間分解の比較 (SAとFA)

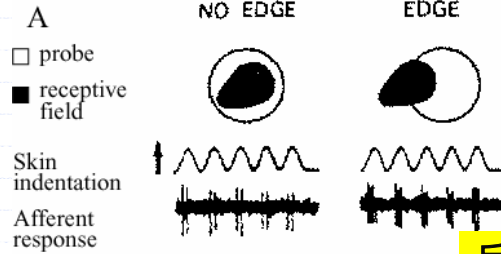


指(サル)にドットパターンを少しづつ、ずらしながら押付けた時のSA、QA(ヒトのFA)受容器の示す応答の集合

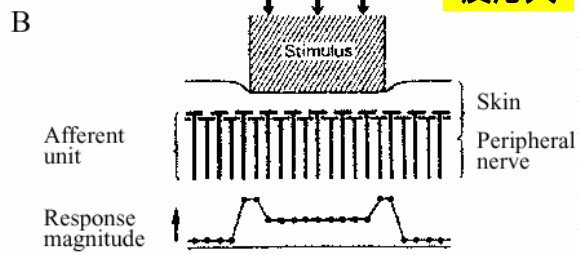
側抑制効果

側抑制による
エッジ強調

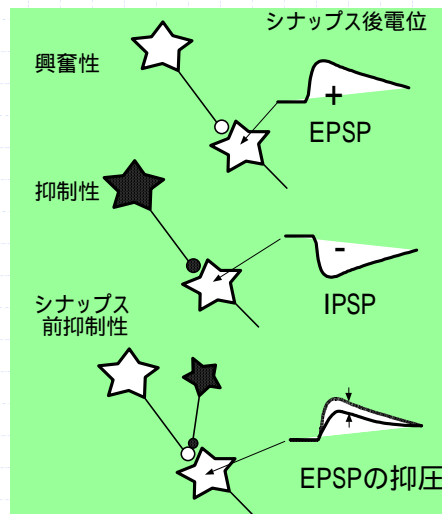
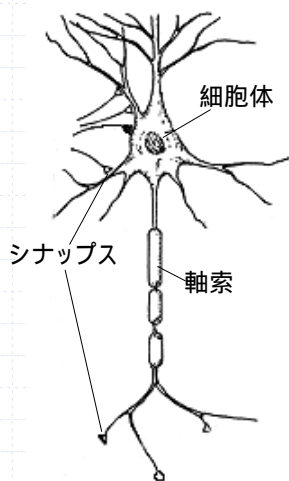
受容野： 内部 横切る



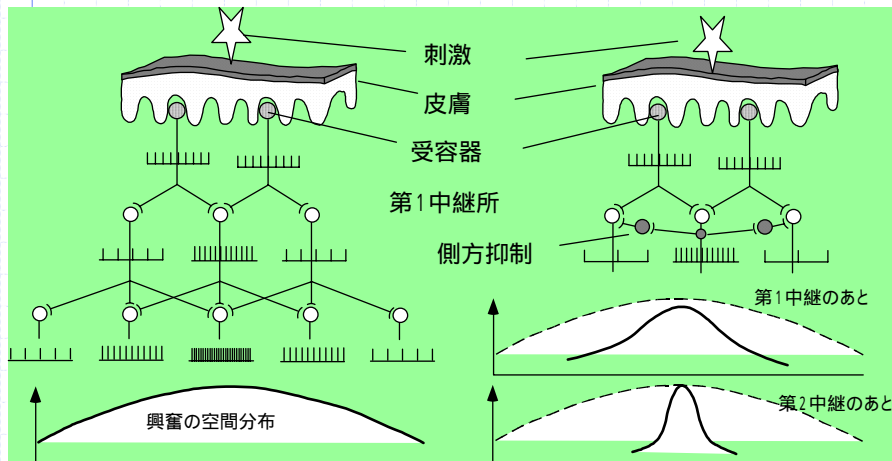
反応大



側抑制 1

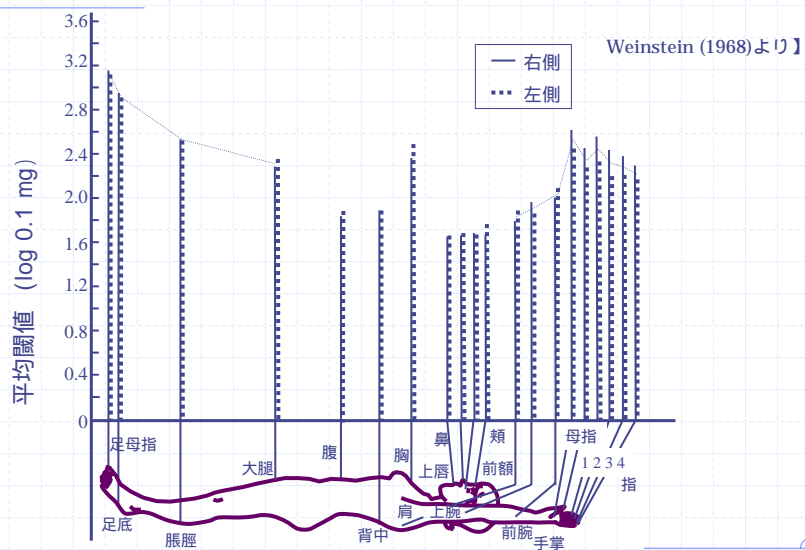


側抑制 2

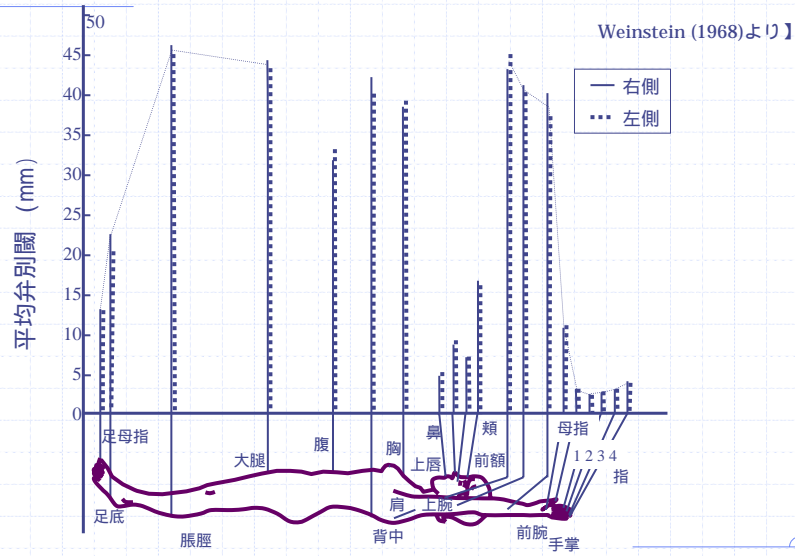


Schmitz, R.F. (岩村他訳), "感覚生理学第2版" 金芳堂, 1991.

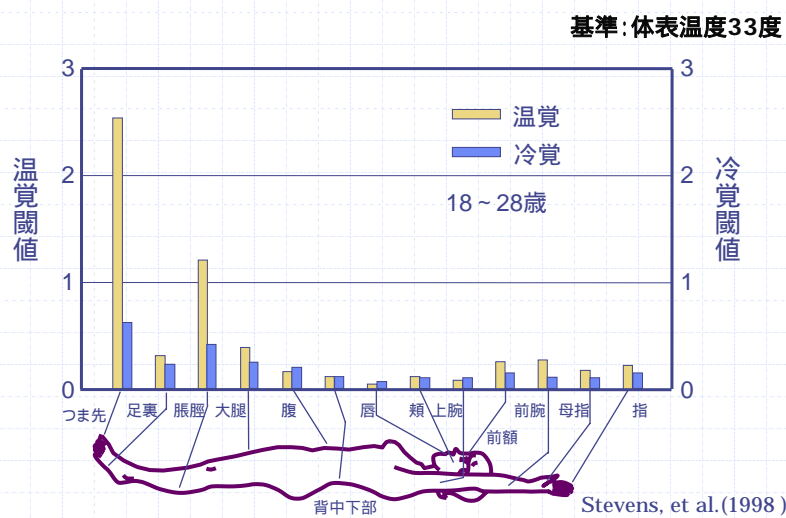
体表部における圧覚の閾値



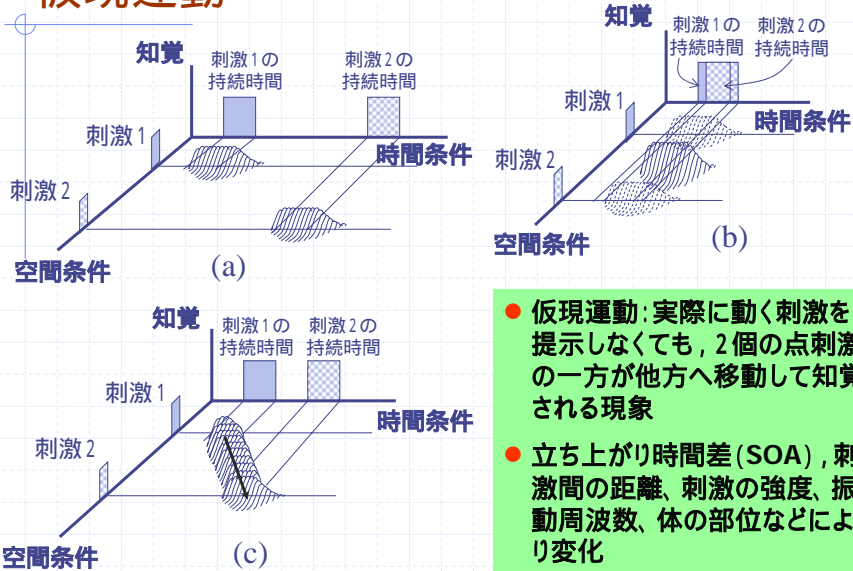
体表部における触2点弁別閾



体表部における温・冷覚の弁別閾値

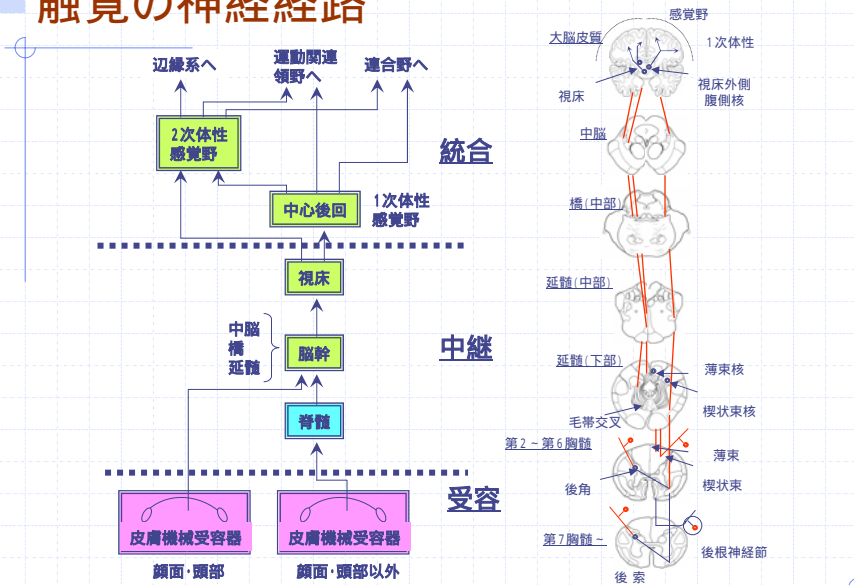


仮現運動

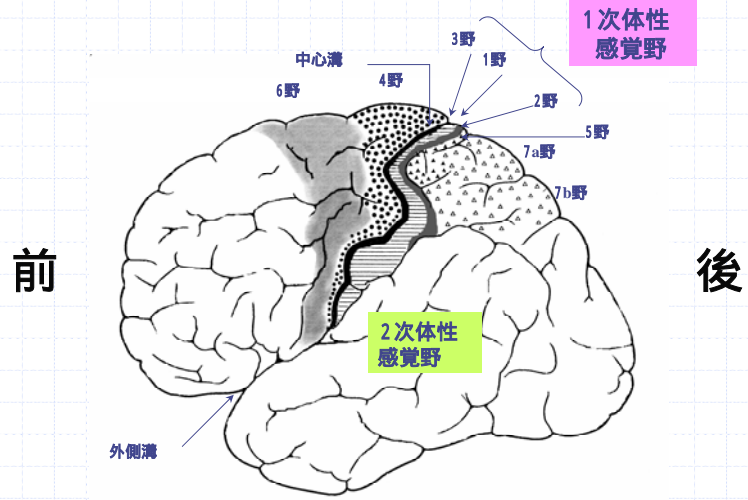


- 仮現運動: 実際に動く刺激を提示しなくても, 2個の点刺激の一方が他方へ移動して知覚される現象
- 立ち上がり時間差 (SOA), 刺激間の距離, 刺激の強度, 振動周波数, 体の部位などにより変化

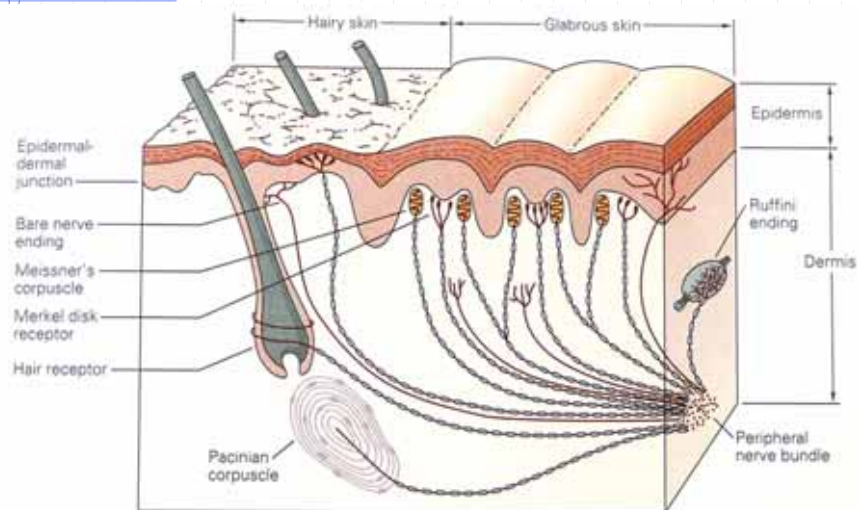
触覚の神経経路



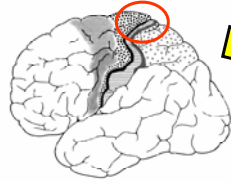
触覚の中樞 (体性感覚野)



皮膚レベル

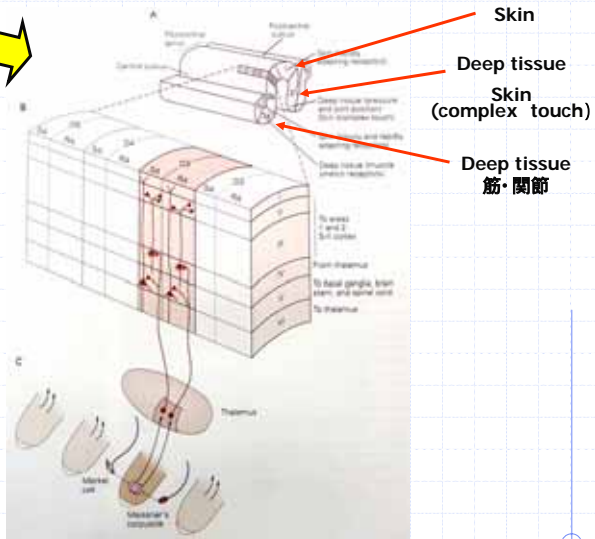


各レベルにおける神経接続



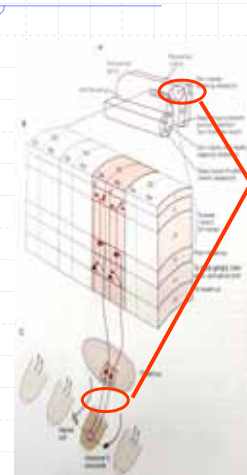
中枢での各指の
受容野の配置

指先でのRAとSAの
受容野の重なり



E.R. Kandel et al, Principles of neural science, fourth edition, McGraw-Hill, 2000.

触覚マッピング



浮き出た文字をサルの指先に押し当てた場合の中樞3b野でのマッピングの様子

神経経路レベル

SA神経イメージ

RA神経イメージ

中枢レベル

3b領域 SAイメージ

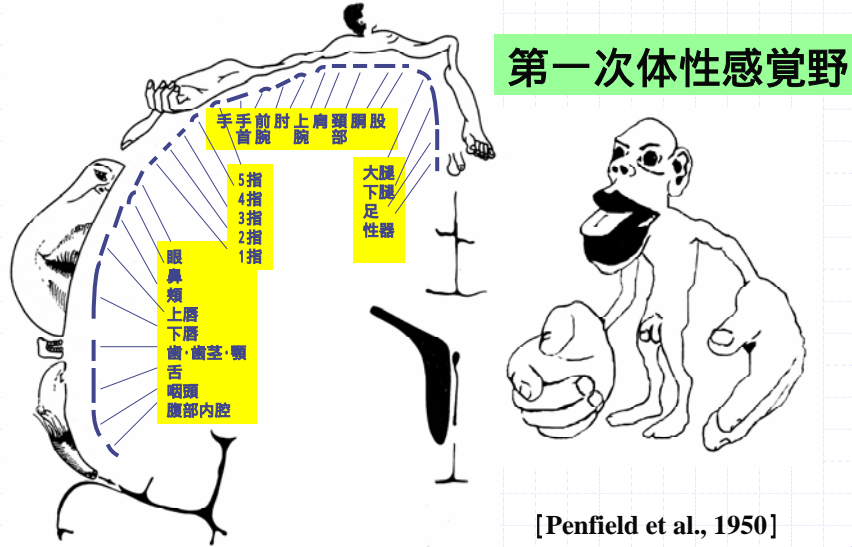
3b領域 RAイメージ

1領域 SAイメージ

1領域 RAイメージ

E.R. Kandel et al, Principles of neural science, fourth edition, McGraw-Hill, 2000.

触感覚のマッピング



感覚野における再現地図の比較

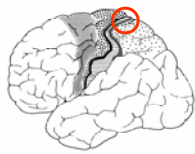


第一次体性感覚野における再現地図の比較 (カンデルより)

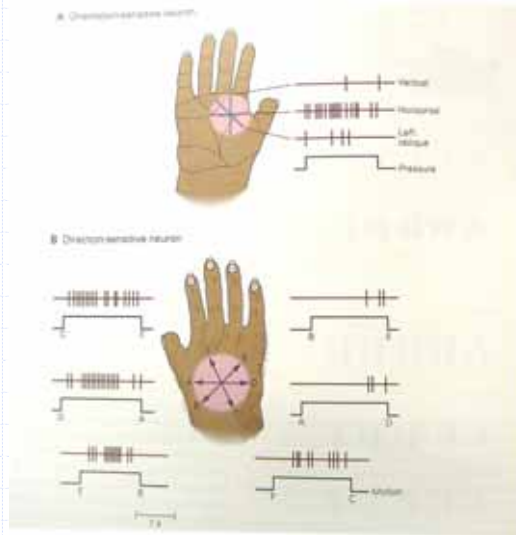
触覚の特徴抽出細胞

接触方向判別

動作方向判別



中枢の2野に存在



E.R. Kandel et.al, Principles of neural science, fourth edition, McGraw-Hill, 2000.

触覚の生理心理おわり

触覚の生理・心理学の初歩

下 条 誠

2007年3月版

目次

第1章	触覚の生理・心理学	1
1.1	皮膚構造と触覚受容器	1
1.2	触覚の情報量	2
1.3	触覚の空間分解能	2
1.4	機械的刺激の感度と分解能	4
1.5	時間分解能	5
1.6	表面凹凸判別	5
1.7	ずれの検知	6
1.8	温度特性 [2]	6
1.9	ハプティクス知覚による材質感認識	7
	参考文献	9

図目次

1.1	皮膚の構造と機械受容器	2
1.2	ヒトの無毛部皮膚機械受容器の分類	3
1.3	体表部における触 2 点弁別閾 (Weinstein, 1968)	4
1.4	体表部における圧覚の閾値 (Weinstein, 1968)	5
1.5	4 つの機械受容器の周波数閾値特性 (Bolanowsky et al., 1988)	6
1.6	体表部における温・冷覚の弁別閾値、(Stevens, et al.,(1998) 改変清水	7
1.7	ハプティクスによる材質感の認識	8

第 1 章

触覚の生理・心理学

人間の触覚のメカニズム

人間の五感のうち視・聴・味・嗅覚は集中した感覚器官であるが、触覚は全身に分布している唯一の感覚器官である。また皮膚は身体で最も大きな器官で全体重のほぼ 1/6 を占める。本解説ではまずこの触覚の主に生理・心理学について述べる。

1.1 皮膚構造と触覚受容器

図 1.1 に皮膚構造と触覚受容器の配置を示す。皮膚の構造は表皮 (Epidermis)、真皮 (Dermis)、皮下組織 (Subcut) からなる。表皮は手掌での厚さ約 0.7mm 程である。真皮は厚さ 0.3-2.4 mm 程で強い繊維性結合組織である。また手掌のようにかなりの摩擦力を受ける部位での表皮と真皮の境界では、下方へ突出する表皮のヒダ (表皮隆起) と、上方に突出する真皮乳頭とが噛み合っており表皮と真皮の癒着を強めている。皮下組織は、緩い網状の疎性結合組織である。通常は真皮と固く結合し骨膜、筋膜、腱膜とは緩く結合している [1]。この皮膚の手掌面内にはおよそ 17,000 の機械受容器がある。これら機械受容器の種類としては、皮膚変形刺激に対する、(1) 応答の時間変化の違いと、(2) 受容野の広さの特徴から次のように分類されている [2],[3]。まず、ステップ状に皮膚を押し込むと受容器は刺激に応じて発火しパルスを出力する。このとき 刺激の強度に応じて発火する遅順応型 (Slowly Adapting: SA) と、 刺激の時間変化に応じて発火する速順応型 (Fast Adapting: FA) とがある。また受容野の特徴からは I 型と II 型にわけられる。I 型は受容野が狭く境界が明瞭である。

II 型は受容野が広く境界が不明瞭である。よって、これら特徴の組合せとして SAI, SAII, FAI, FAII の 4 つのタイプに分類されている。これら機能的分類と形態学的に同定された受容器、即ちメルケル細胞 (Merkel cell) (SAI)、ルフィニ終末 (Ruffini endings) (SAII)、マイスナー小体 (Meissner corpuscles) (FAI)、パチニ小体 (Pacinian corpuscles) (FAII) がそれぞれ対応するものと現在のところ推定されている。メルケル細胞は、狭義のメルケル細胞と神経終末であるメルケル触覚円板が一体となったものである。表 1.1 には機械受容器の特性による分類を、図 1.2 には受容器の特性をまとめたものを示す。

表 1.1: 皮膚感覚受容器の分類

	順応遅い (静圧力応答)	順応はやい (速度加速度応答)
受容野狭い (受容器浅い)	SAI(Merkel) メルケル細胞	FAI (Meissner) マイスナー小体
受容野広い (受容器深い)	SAII(Ruffini) ルフィニ終末	FAII(Pacinian) パチニ小体

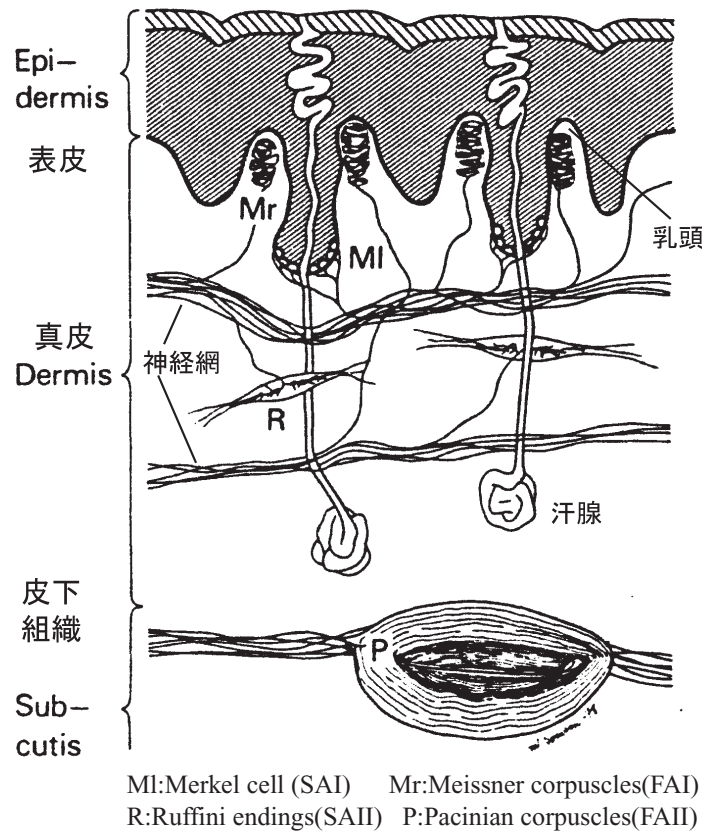


図 1.1: 皮膚の構造と機械受容器

1.2 触覚の情報量

この感覚受容器の数は全身体では 10^7 個、痛覚（自由神経終末）が 2×10^6 個、温点が 3×10^4 個、冷点が 2.5×10^5 個あるとされている。また大脳皮質への神経伝達繊維本数は 10^6 本で感覚受容器と信号線数の比は 10 となっている [6]。感覚受容器の密度が高いとされる指先の例では大脳皮質の感覚野に伝達する神経線維は 1mm^2 当り 1 本といわれている。このことは指先での空間分解能が 1~2mm 程度とされていることに関係すると思われる。通信容量からみると、触覚は 10^6 (bit/s) であるといわれている [6]。ちなみに、視覚は 10^7 (bit/s)、聴覚は 10^5 (bit/s)、嗅覚は 10^3 (bit/s)、味覚は 10^3 (bit/s) である。さすがに視覚は多いが、触覚もその 1 割程度もあり、なかなか多くの情報を担っている。

1.3 触覚の空間分解能

皮膚感覚の空間的弁別能については、代表的なものとして、1) 2 点弁別能、2) 継時 2 点弁別能がある [2]。

1. 2 点弁別能では、コンパスのような器具を用いて空間的に離れた 2 点刺激を加え、これが 1 点か 2 点を識別できる最も短い距離を計測する方法である。図にはウェインシュタインの結果を示す [8]。例えば指先では 2mm、前額部では 25mm、背中では 70mm ほどの値となる。
2. 継時 2 点弁別とは、コンパスの両端を順々に呈示した 2 つの点と同じ位置であるか否かを判断させる方

	SAI	SAII	FAI	FAII
受容器	Merkel	Ruffini	Meissner	Pacinian
順応性	遅い	遅い	速い	速い
受容野の境界	明瞭	不明瞭	明瞭	不明瞭
平均的受容野面積 ⁴⁾	11.0 mm ²	59.0 mm ²	12.6 mm ²	101.0 mm ²
受容器当たりの抹消感覚機構 ⁴⁾	4-7	1	12-17	1
皮膚表面からの相対的深さ	浅い	深い	浅い	深い
形状・寸法 ²⁾	卵円形 (6-12 μm) 触覚円板(直径 7 μm, 厚さ 1 μm)	紡錘形 (長さ 0.5mm・2mm)	楕円体(長軸:40-100 μm,短軸:30-60 μm)	楕円体(長軸: 2.0~45mm,短 軸:10~20mm)
手掌面における神経支配密度 ³⁾	25% (4250 本)	19% (3230 本)	43% (7310 本)	13% (2210 本)
空間加算特性 ¹²⁾	なし	--	なし	あり
時間加算特性 ¹²⁾	--	あり	なし	あり
皮膚表面温度影響 ¹²⁾	あり	あり(100Hz以上)	なし	あり
感覚発生に必要なパルス数 ^{6,19)}	連続パルス(20程度)	少しでは関与なし	単一パルス	連続パルス
触神経電気刺激による発生感覚 ¹⁸⁾	Pressure	--	Tapping(1Hz) Flutter(10Hz) Vibration(50Hz)	Tickling/Vibration
周波数レンジ	0.4-100Hz	0.4-100Hz	10-200Hz	70-1000Hz
最小閾値(周波数)	10 μm(50Hz)	3 μm(50Hz)	6 μm(40Hz)	0.1 μm(250Hz)
機能的特徴	強度検出 空間パターン検出 皮膚曲率検出	皮膚の引っ張り検出	速度検出 空間パターン検出 皮膚曲率変化検出	加速度検出 振動検出
刺激(皮膚変形)と 応答(発火頻度) ⁶⁾				
神経線維	伝導速度が速い(40-70m/s)、太い直径(8-13 μm以上)の有髄神経線維。 体性感覚野まで2つ程度の中継で伝達。			

図 1.2: ヒトの無毛部皮膚機械受容器の分類

法である。この結果は2点弁別能の値と高い相関を示す。だが値としてはより小さくなる。例えば指先では1.5mm, 前額部では5mm, 背中では12.5mmほどの値である。触覚の空間分解能の特徴は, 場所により感度をはっきりと異なることである。空間的鋭敏さは指先で最大で, 手首に向かうにつれて低下する。例えば指先での2点弁別能は2mm, 手掌では10mm程である。

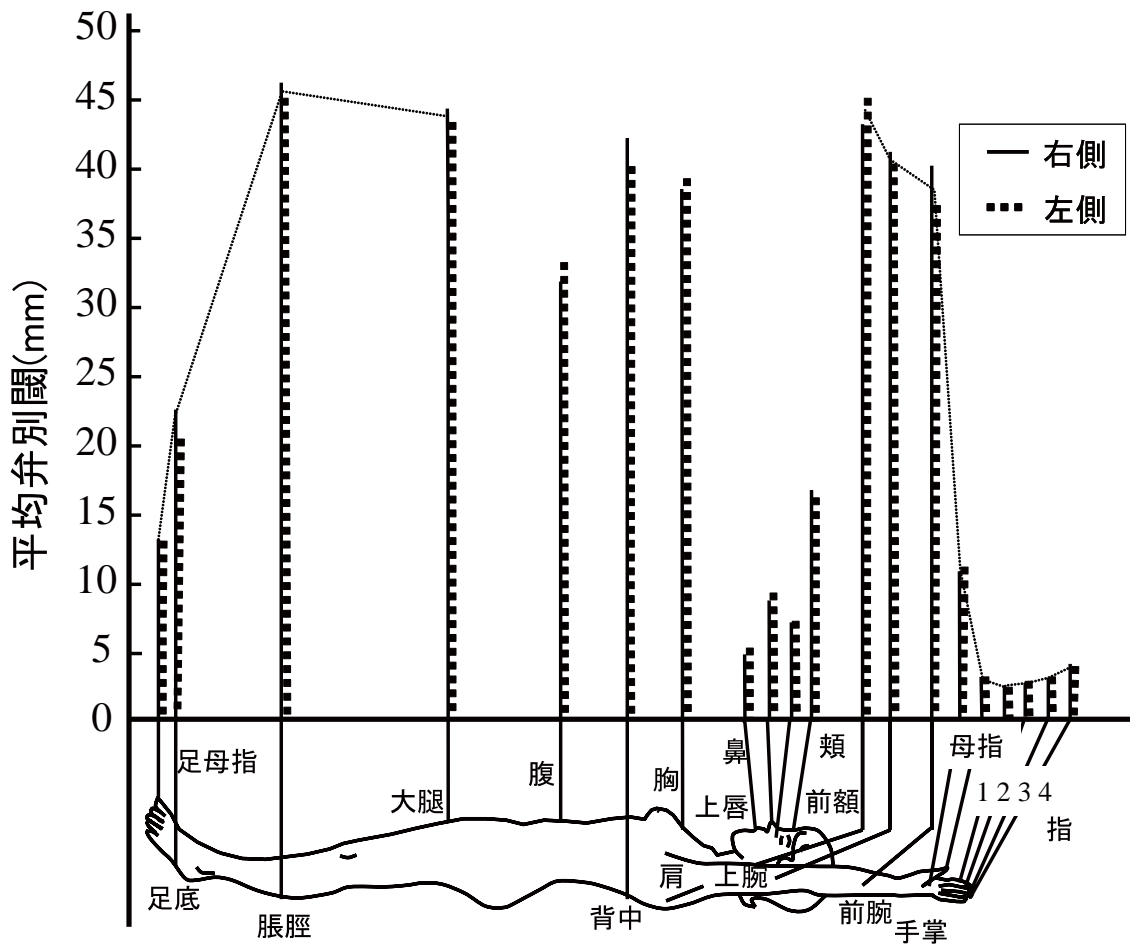


図 1.3: 体表部における触 2 点弁別閾 (Weinstein, 1968)

1.4 機械的刺激の感度と分解能

機械的刺激は皮膚に変位を与える。刺激として、定常、速度一定、加速度一定などの与え方がある。定常刺激に対する感覚を圧覚とし、振動刺激に対する感覚を振動覚とすると次に示すような特性がある。

1. 圧覚：図には剛毛（フォンフライの毛）を用いて触刺激を加えたときの力の閾値を示す。鼻，上唇，額などは感度が高く，大腿，脛などでは感度が低い。
2. 振動覚：振動刺激に対する感度が振動覚である。Bolanowski らは図 1.5 に示すような 4 種の機械受容器の振動閾値の周波数特性を計測した [11]。この閾値については刺激子の面積，身体部位，刺激 ON 時間，皮膚温など多くのパラメータの影響を受ける。刺激としては皮膚変位を取り， $1 \mu\text{m}$ を 0dB として示してある。SAI は非常に低い周波数（数十 Hz）において最も感度が高く 100Hz 程度まで広がっている。皮膚が緩やかに動いているように感じられる低い正弦周波数では，SA タイプの受容器が決定的な情報を担っていると考えられる。FAI は数 Hz から 100Hz 程度まで広がっている。 $5\text{Hz} \sim 40\text{Hz}$ の周波数のパタパタした感じ (flutter) の検出は FAI が担っていると思われる。FAII は 250Hz 当たりにも最小値を持つ U 字型の特性を示し，最小閾値は $0.2 \mu\text{m}$ 以下となる。なお $1 \mu\text{m}$ 程度の閾値を持つのは FAII のみである。このことから我々が日常生活で微小刺激の存在を感じるのには主にこの FAII によるも

のであろう。

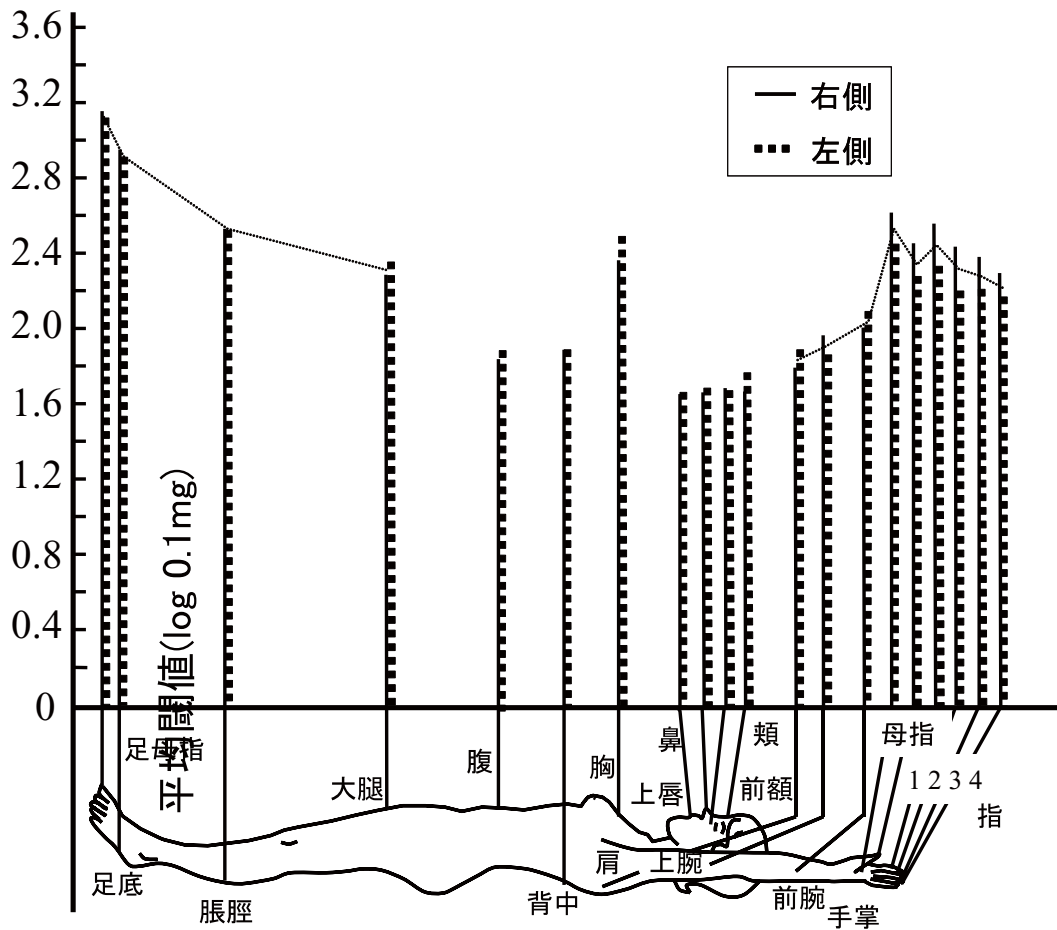


図 1.4: 体表部における圧覚の閾値 (Weinstein, 1968)

1.5 時間分解能

触覚の時間分解能とは、2つの刺激提示時間間隔が短くなった場合にそれが2つであることを区別できる最小時間間隔を指す。加える刺激の強さによって変化し、強い場合は10ms程度、弱くすると50ms程度との報告がある。また、5秒間で知覚できる連続刺激は9つまでとの報告もある [3]。

1.6 表面凹凸判別

人間が検出可能な表面凹凸についての幾つかの研究がある。Johansson[12])は人間の指先検知能力をドットパタンの直径が $50\mu\text{m}$ では $6\mu\text{m}$ 、 $500\mu\text{m}$ では $1\mu\text{m}$ の凸を検出可能としている。また、表面の細かな凹凸の判別には対象と指先との相対的運動が必要で、対象物が動く受動触と、指先を動かす能動触との実験結果に実質的な差はないとしている。滑り検出についてはSrinivasanら [13]は、平面のみ及び $1\mu\text{m}$ ドットパターン付平面などの試験片を用いて実験を行った。その結果、被験者は滑りの有無に関わらずこれら試験片の引張り方向を検知できるが、しかしドットパターンが無いと滑り状態は検知できないことを示した。これはSAIIの作用により方向を判別し、FAI, FAIIにより滑りによって生ずる振動を検知しているのではないかと

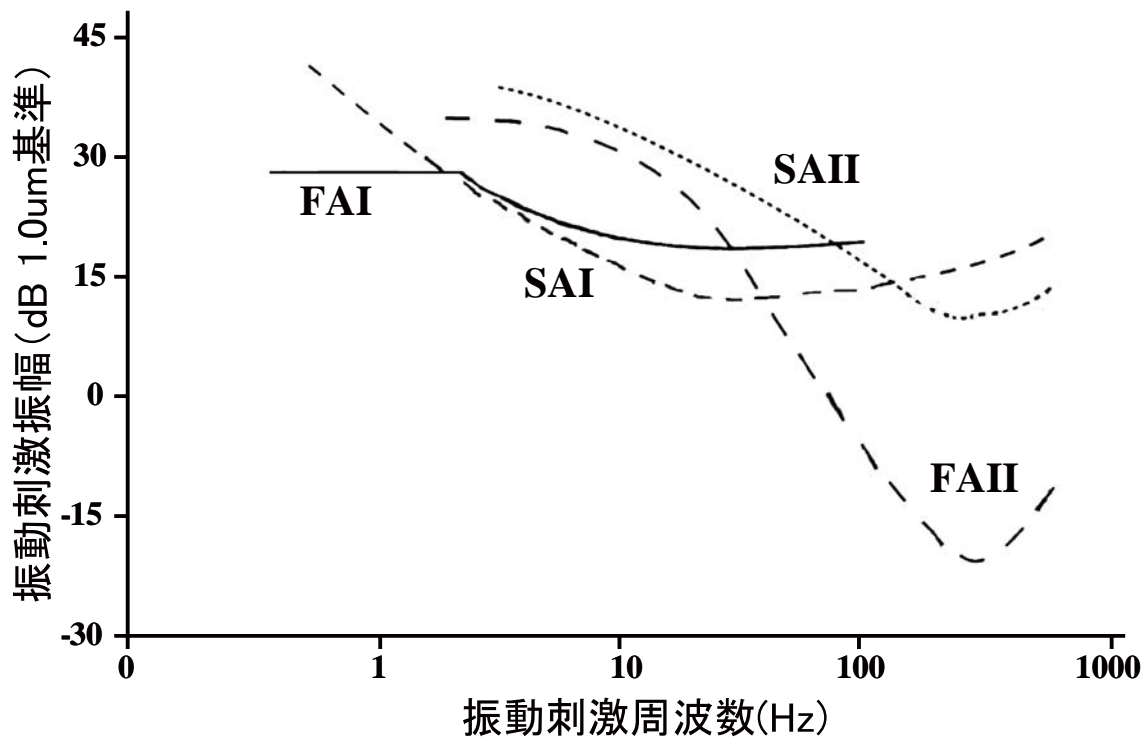


図 1.5: 4つの機械受容器の周波数閾値特性 (Bolanowsky et al., 1988)

している。K.O.Johansson[9]も同様に、表面状態(アラサ)の検出は、その違いによる振動パターンの差異をFAI, FAIIの発火の相違によって検出しているとの仮説を報告している。

1.7 ずれの検知

皮膚感覚の一つとしてずれを検知する能力がある。このずれについて井野らは粗さのあるアルミ平板を用いた結果について報告している(15)。ずれの検知能力は指先に対する変位方向によって変わり、その閾値は縦<斜め<横の順である。即ち縦方向のずれに対して感覚が鋭くなっている。またその閾値は移動速度によって変わり、速度が大きいほど小さな変位量での検知が可能としている。例えば、指先縦方向の結果として0.2mm/sでは50 μ m, 4mm/sでは20 μ mである。回転については、21.6deg/sでは0.046deg/s, 0.72deg/sでは0.265deg/sである。ずれの検知に関わる受容器としてSAIIがある。SAIIの特徴は横方向へ皮膚を引っばったときに鋭い感度を示す。この時皮膚を引っばる方向が重要である。即ち特定の方向に引っばれば求心性発火は増加するが、他の方向では発火を減少させる(6)。このSAII受容器の主たる役割は、皮膚内、および皮膚と深部組織の間に生じる横方向の張力の方向と強さに関する情報を提供することと考えられる。

1.8 温度特性 [2]

ヒトの場合温度感覚は、皮膚上の冷点と温点によって検出される。その受容器は未だ完全には解明されていないが神経線維の自由神経終末といわれている。この2種の受容器が示す発火頻度曲線は温度に対して鐘状をなし、冷覚では29℃、温覚では43℃あたりで最大値を示す。冷点と温点の密度を比較すると冷点の方が明らかに多く、手の表面には1cm²あたり1-5個の冷点が存在するが温点は0.4個程度である。ぬるめの湯に浸かると始めは温感を生ずるが時間が経過するとこの感覚はなくなる。これはこの温度に対して順応したためであ

る．このように温度感覚は体表面温度の変化によって生じる．図には，Stevens らによる体表部における温・冷覚の弁別閾値を示す．これは体表温度が 33 度のとき温度を上下させ温感と冷感が生じる．

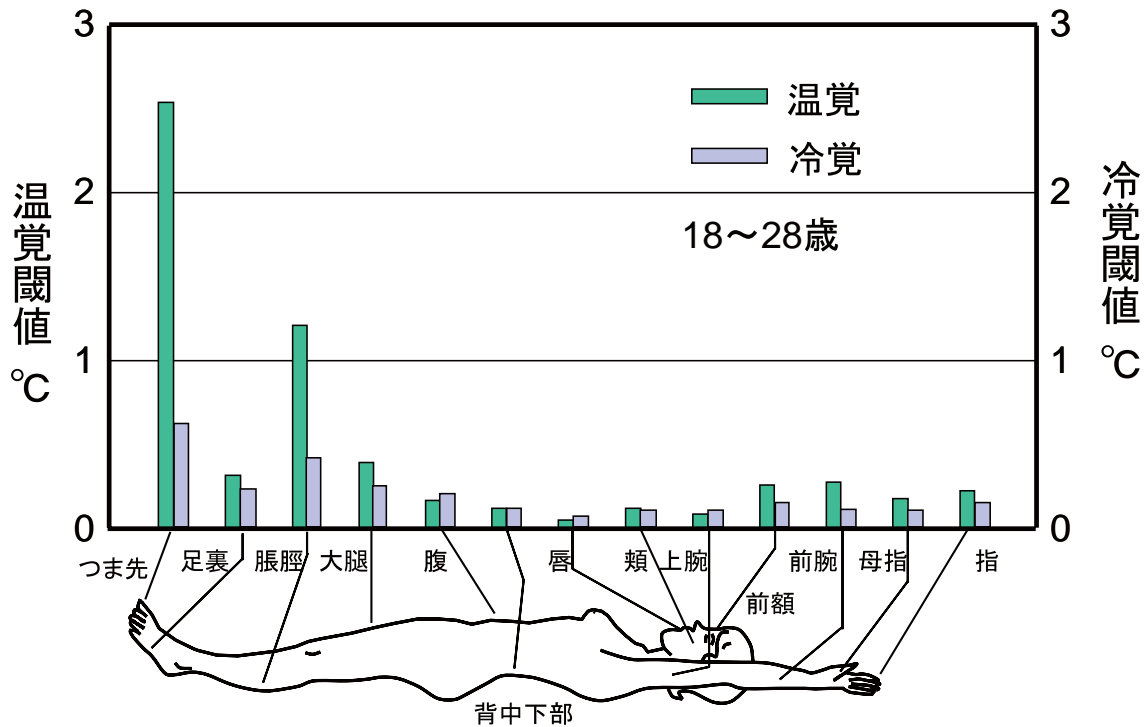


図 1.6: 体表部における温・冷覚の弁別閾値、(Stevens, et al.,(1998) 改変清水

1.9 ハプティクス知覚による材質感認識

従来触覚は，圧力，温度，振動などの物理的刺激とそれに対応する皮膚感覚受容器の同定，並びに刺激の物理量と感覚量との関係付けなど，主に受動的認識機構としての研究が行われてきた．外界の認識に対しても，皮膚感覚受容器からの情報が脳の体性感覚野にその位置関係が忠実にマッピングされていること，すなわち体部位再現性 (somatotopy) から皮膚受容器からの情報がそこに再現されることで外界を認識されたとする，どちらかといえば受動的な枠組で考えられていた．しかしながら，材質・表面状態などの物性情報認識のためには，ただ単に手指を押し当てるのではなく，手で対象を探る，または指でなぞる等の何らかの意図に基づいた探索的な要素が必要となる．例えば，人間は触運動を用いることによって，ガラス表面の $1 \mu\text{m}$ のアラサも検知可能となる．Gibson はこのような触覚知覚における皮膚感覚と運動感覚との統合をアクティブタッチとしてその重要性を述べてる 1)．しかしながら Gibson は，探索的触運動を行うとき手などを動かす筋肉への運動指令が，同時に体性感覚野へも投射されていること（遠心性コピー情報）をあまり重要視していおらず，例えば人に手をガイドしてもらいながら触運動を行った場合と自主的に行った場合での違いを説明し得なかった．このような経緯から，皮膚感覚受容器情報，筋肉・関節角等の運動感覚情報，それと遠心性コピー情報との組み合わせから，現在では人間の触覚モードを 5 種に分けている 2)．この中で能動的ハプティクス知覚といわれるものが近年ロボット工学における触覚を用いた認識の方式として利用され始めているのである．このハプティクス知覚を材質認識を例に図 1.7 を用いて説明する．この図は Taylor³⁾ および岩村⁴⁾ の図に修正・加筆したものである．我々が対象の材質を認識する場合，まず硬さ，表面状態，温度特性などを調べ，それらを統合した知覚像とこれまでの経験による記憶像との照合を基に判断を行っている．この過程を大

まかに分けてみると，対象理解のための探索的戦略をつくり手指に探索的運動を行わせる行動生成部分と，手指部受容器からの情報から知覚像の形成を行い，記憶像の照合を行う感覚情報処理部分とに大別される．まず行動生成部は，

1. 押す・撫でるといった探索行動戦略の決定，
2. 手指の動作・力の入れ方などの探索動作の制御と運動アルゴリズムの生成，
3. 探索動作に関わる個々の筋活動の制御を行い，手指に触運動等の探索的運動を行わせる．

次に感覚情報処理部では，

1. 手指の運動に伴い皮膚と対象との力学的相互干渉による発生する皮膚感覚受容器からの情報（温度変化，振動，変形，測方向力）と，
2. 手指運動による筋・関節からの運動感覚情報が，
3. 手指の運動制御系にフィードバックされると同時に，
4. 遠心性コピー情報とが統合され知覚像の形成が行われ，
5. その知覚像とこれまでの経験による記憶像との照合を行うことによって材質の判別が行われる．
6. そして照合が一致すれば材質が判別されたとし，一致しなければ探索行動のループを再度繰返すことになる．

すなわち，探索戦略の決定 行動 検証 戦略の変更というループを経て対象の材質の認識を行うことになる．このような手順は触覚センサを用いた物性情報認識技術に対しても有用な知見を与えてくれるものと考えられる．

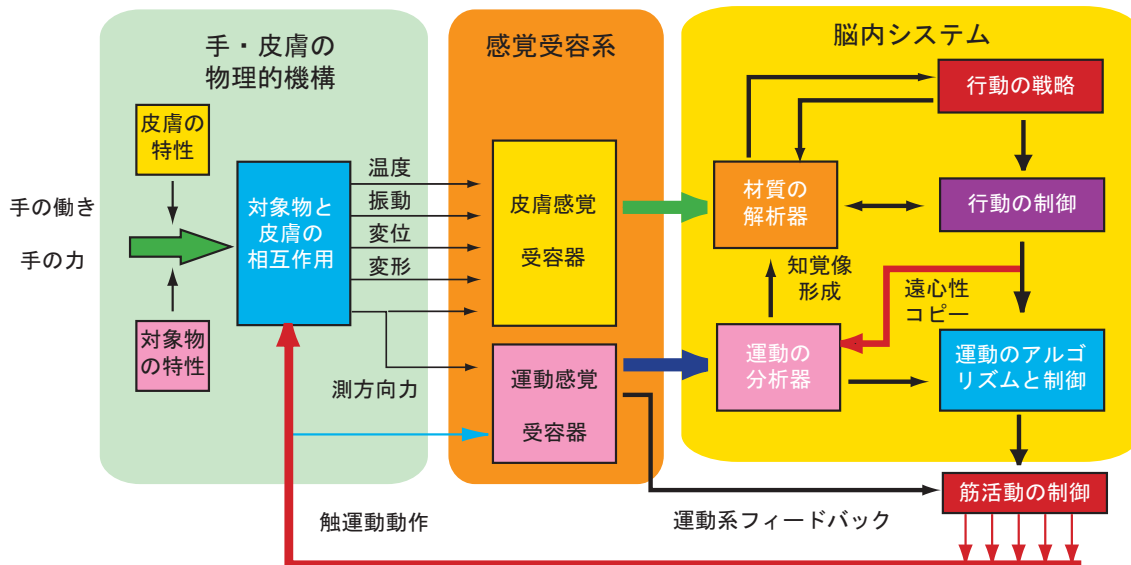


図 1.7: ハプティクスによる材質感の認識

参考文献

- [1] 小川鼎三, 山田英智: “解剖学 3 感觉器学”, 金原出版 (改定第 11 版), pp.95-128,1984.
- [2] Schmit, R.F. (岩村他訳): “感觉生理学第 2 版”, 金芳堂,1991 .
- [3] S. J. LEDERMAN: “Skin and Touch”, Encyclopedia of Human Biology, Volume 7, pp.51-63 ,1991 .
- [4] J.M. Loomis, S. J. LEDERMAN: “Tactual Perception”, In ”Handbook of perception and Human .
- [5] R S. Johansson and A. B. Vallbo: “Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand”, Trends Neurosc, 6,27, pp.27-32,1983 .
- [6] 山田雅弘: “各感覚における神経情報処理の共通点・相違点”, 電総研調査報告, No.215, 18,1986.
- [7] J. C. Craig and K. B. Lyle: “A comparison of tactile spatial sensitivity on the palm and fingerpad”, Perception & Psychophysics, 63-2, pp.337-348,2001 .
- [8] Weinstein, S. : “Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex, and laterality”, The Skin Senses, (Kenshalo, D.R., ed.), Charles C Thomas, Ill., U.S.A., pp.223-261, 1968.
- [9] K.O. Johnson: “Neural mechanisms of tactual form and texture discrimination”, Information processing in cutaneous mechanoreceptors, Federation Proceedings, 42-9, pp.2542-2547,1983.
- [10] J. R. Phillips, R. S. Johansson, and K. O. Johnson: “Responses of Human Mechanoreceptive Afferents to Embossed Dot Arrays Scanned across Fingerpad Skin”, The Journal of Neuroscience, 72(3), pp.827-839,1992.
- [11] S.J. Bolanowski, G.A.Gescheider, R.T.Verrillo, C.M.Checkosky: “Four channels mediate the mechanical aspects of touch”, J. Acoust. Soc. Am, 85(5), pp.1680-1694,1988.
- [12] R.S. Johansson, R.H. LaMotte: “Tactile detection thresholds for a single asperity on an otherwise smooth surface”, Somatosens. Res., 1, pp.21-31,1983.
- [13] R.H. Lamotte and M.A. Srinivasan: “Surface Microgeometry:Tactile Perception and Neural Encoding”, Information processing in the somatosensory system, werner-gren Int. symp. series vol.7,Stokton press, pp.49-58,1989.
- [14] Hosoe, F. Odagawa, T. Shimizu, S., Ino, S.; Izumi, T., Tukahashi, M., Ifukube, T: “Development of a tactile sensor modelled after the shearing strain perception mechanism of the human tactile sense and its application”, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 30, Issue 5, pp.577-583,1994.
- [15] Y. Shimizu: “Temporal effect on tactile letter recognition by tracing mode”, Perceptual and Motor Skills, 55, pp.343-347,1982.
- [16] D. S. Alles: “Information Transmission by Phantom Sensations”, IEEE Trans. Man-Machine Systems, Vol.MMS-11,NO.1, March, pp.85-91,1970.
- [17] H.E. Torebjork, J.L. Ochoa: “Specific sensations evoked by activity in single indentified sensory

- units in man”, *Acta Physiol Scand*, 110:pp.445-447,1980.
- [18] 宮岡徹, 間野忠明: “ 単一神経線維電気刺激による臨床検査 単一神経線維電気刺激 ”, *臨床脳波*, 29-9, pp.574-578, 1987.
- [19] 下条誠, 牧野了太, 小川博教, 鈴木隆文, 並木明夫, 斎藤敬, 國本雅成, 石川正俊, 満洲邦彦: “ ロボットハンドからの接触感覚を触覚神経系経路により提示するシステムの開発 ”, *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会*, 2P2-E08, 2002.
- [20] 前野隆司, 小林一三, 山崎信寿: “ バイオダイナミクス ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係 ”, *日本機械学会論文集 C*, 63, 607, pp.881-888, 1997.
- [21] 奈良高明, 前田太郎, 安藤繁, 館すすむ: “ 皮膚・機械受容器の動特性解析に基づく触覚提示原理に関する考察 ”, *日本 VR 学会第 5 回大会論文集*, pp.299-302, 2000.
- [22] M. SHIMOJO, M. SHINOHARA, Y. FUKUI: “ Human Shape Recognition Performance for 3D Tactile Display ”, *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, Part A*, 29, 6, pp.637-644, 1999.
- [23] 木下源一郎: “ ロボット作業における検出情報の種類とその特徴 ”, *計測と制御*, Vol.26, No.2, pp.99-102, 1987.
- [24] 緒方浩二郎, 柏木邦夫, 小野浩三: “ 力覚センサ ”, *日本ロボット学会誌*, Vol.6, No.9, pp.759-765, 1991.
- [25] 下条誠, 石川正俊: 高密度フレキシブル圧力分布イメージャ, *日本機械学会誌論文集 (C 編)*, Vol.57, No.537, pp.1568-1574, 1991 .
- [26] 関喜一, 下条誠, 佐藤滋, 高橋昭彦: “ 高柔軟性をもつ把持圧力分布センサの開発 ”, *計測自動制御学会*, Vol.31, No.9, pp.1528-1530, 1995.
- [27] M. Shimojo, A. Namiki, M. Ishikawa, R. Makino and K. Mabuchi: A tactile sensor sheet using pressure conductive rubber with electrical-wires stitched method, *IEEE Trans. Sensors*, vol.5, no.4, pp.589-596, 2004.
- [28] Tekscan, Inc: <http://www.tekscan.com/>
- [29] 石川正俊 下条誠: “ 感圧導電性ゴムを用いた 2 次元分布荷重の中心位置の測定方法 ”, *計測自動制御学会論文集*, Vol.18, No.7, pp.730-735, 1982.
- [30] 山田陽滋: “ 把握までのセンシング戦略 その 2:滑りと静摩擦係数の検出 ”, *日本ロボット学会誌*, Vol.11.No.7, PP.959-965, 1993.
- [31] 井野秀一, 伊福部達ほか: “ ヒト手指の柔軟性と感覚特性を考慮した触覚センサの試作 ”, 第 14 回日本ロボット学会学術講演会, PP.1077-1078, 1996.
- [32] 尾俣定夫: “ 硬さ測定用触覚センサ ”, *超音波 TECHNO*, Vol.9, No.3, pp.6-9, 1997.
- [33] Jae S. Son, Eduardo A. Monteverde, and Robert D. How: “ A tactile sensor for localizing transient events in manipulation ”, *Proc.Int. Conf. Robotics and Automation*, pp.471-476, 1994.
- [34] Robert D. How: “ A force-reflecting teleoperated hand system for the study of tactile sensing in precision manipulation ”, *Proc.Int. Conf. Robotics and Automation*, pp.1321-1326, 1992.
- [35] Paolo Dario, Giorgio Buttazzo: “ A force-reflecting teleoperated hand system for the study of tactile sensing in precision manipulation ”, *Robotics Research Vol.6*, No.3, pp.25-48, 1987.
- [36] 李徳信, 信太克規: “ 容量-誘導型単一構造接触センサによる材質識別 ”, *計測自動制御学会*, Vol.31, No.9, 1252-1257, 1995.
- [37] 稲葉雅幸, 星野由紀子, 井上博允: “ 導電性ファブリックを用いた全身被覆型触覚スーツの開発 ”, *日本ロボット学会誌*, vol.16, No.1, PP.80-86, 1998.
- [38] 前川仁, 小森谷清, 谷江和雄, 金子真ほか: “ 光導波型指先触覚センサに関する研究 ”, 第 10 回日本ロボット学会学術講演会, PP.651-652, 1992.

- [39] Fearing, R.S., Hollerbach, J.M.: "Basic Solid Mechanics for Tactile Sensing", *Int.J. Robotics Research*, Vol.4, No.3, pp.40-54, 1985.
- [40] M. Shimojo: "Mechanical Filtering Effect of Elastic Cover for Tactile Sensor", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 13,1, pp.128-132, 1997.
- [41] Cameron, A., Daniel, R., Duaant-Whyte, H.: "Touch and Motion", *IEEE Proc. Robotics and Automation*, pp.1062-1067, 1988.
- [42] Canepa, G., Morabito, M., Rossi, D., Caiti, A., Parisini, T.: "Shape from touch by a neuralnet", *IEEE Proc. Robotics and Automation*, pp.1062-1067, 1988.
- [43] Shinoda, H. et al.: "A Tactile Sensor using Three-Dimensional Structure", *IEEE Proc. Robotics and Automation*, Vol.1, pp.435-441, 1993.
- [44] H. Shinoda, K. Matsumoto and S. Ando: "Acoustic Resonant Tensor Cell for Tactile Sensing", *Proc. 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3087-3092, 1997.
- [45] 石川正俊: "アクティブセンシングとロボットハンド", *日本ロボット学会誌*, Vol. 11, No.7, PP.959-965, 1993.
- [46] 菅野覚, 加藤一郎, 藤本浩志: "乳癌自動診断ロボットの開発", 第9回日本ロボット学会学術講演会, PP.887890, 1996.
- [47] Kaneko, M.: "Active Antenna", *IEEE Proc. Robotics and Automation*, Vol. 3, pp.2665-2671, 1994.
- [48] 下条誠, 石川正俊: "空間フィルタ形触覚センサを用いた能動センシング", *電子情報通信学会論文誌 C-II*, Vol.J74-C, No.5, pp.309-316 (1991).