



VRのための触覚インタフェース

電気通信大学
梶本裕之



Sutherland “The Ultimate Display” (1965)



We live in a physical world whose properties we have come to know well through long familiarity. We sense an involvement with this physical world which gives us the ability to predict its properties well. For example, we can predict where objects will fall, how well known shapes look from other angles, and how much force is required to push objects against friction. We lack corresponding familiarity with the forces on charged particles, forces in non-uniform fields, the effects of nonprojective geometric transformations, and high-inertia, low friction motion. A display connected to a digital computer gives us a chance to gain familiarity with concepts not realizable in the physical world. It is a looking glass into a mathematical wonderland.

The ultimate display would, of course, be a room within which the computer can control the existence of matter. A chair displayed in such a room would be good enough to sit in. Handcuffs displayed in such a room would be confining, and a bullet displayed in such a room would be fatal. With appropriate programming such a display could literally be the Wonderland into which Alice walked.



触覚 = 体性感覚 + 皮膚感覚



触覚 = 接触によって生じる感覚

- 皮膚表面の変形 (皮膚感覚 / Cutaneous Sense, Skin Sense)
- 筋肉の伸縮, 関節角 (深部感覚・力覚 / Proprioception, Force Sense)

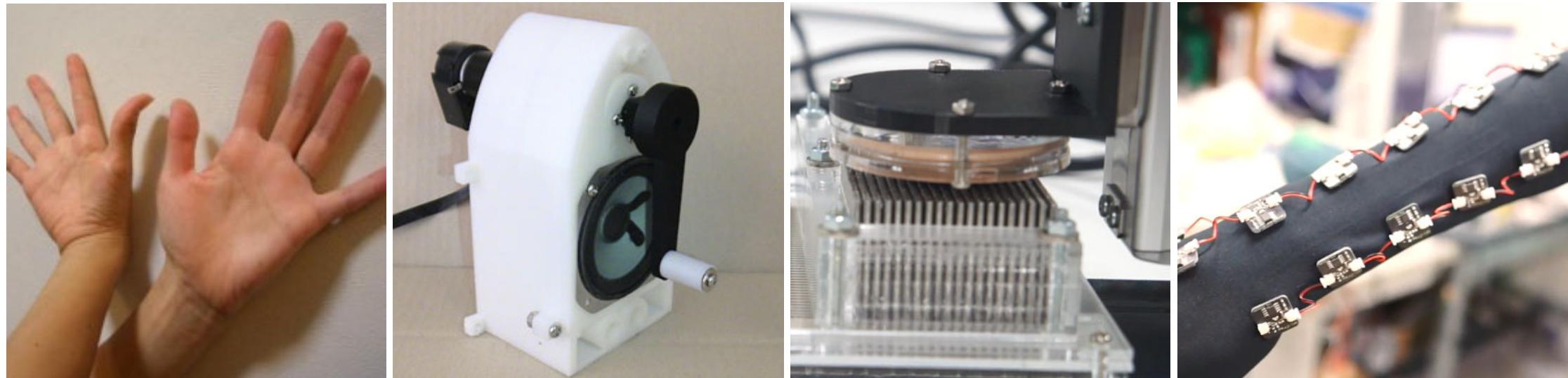
今日の話：狭義の皮膚感覚 / Today's Talk focuses on skin

この時間で得られること

- ざっくりとした人の触覚に関する理解
- ざっくりとした触覚提示原理の理解

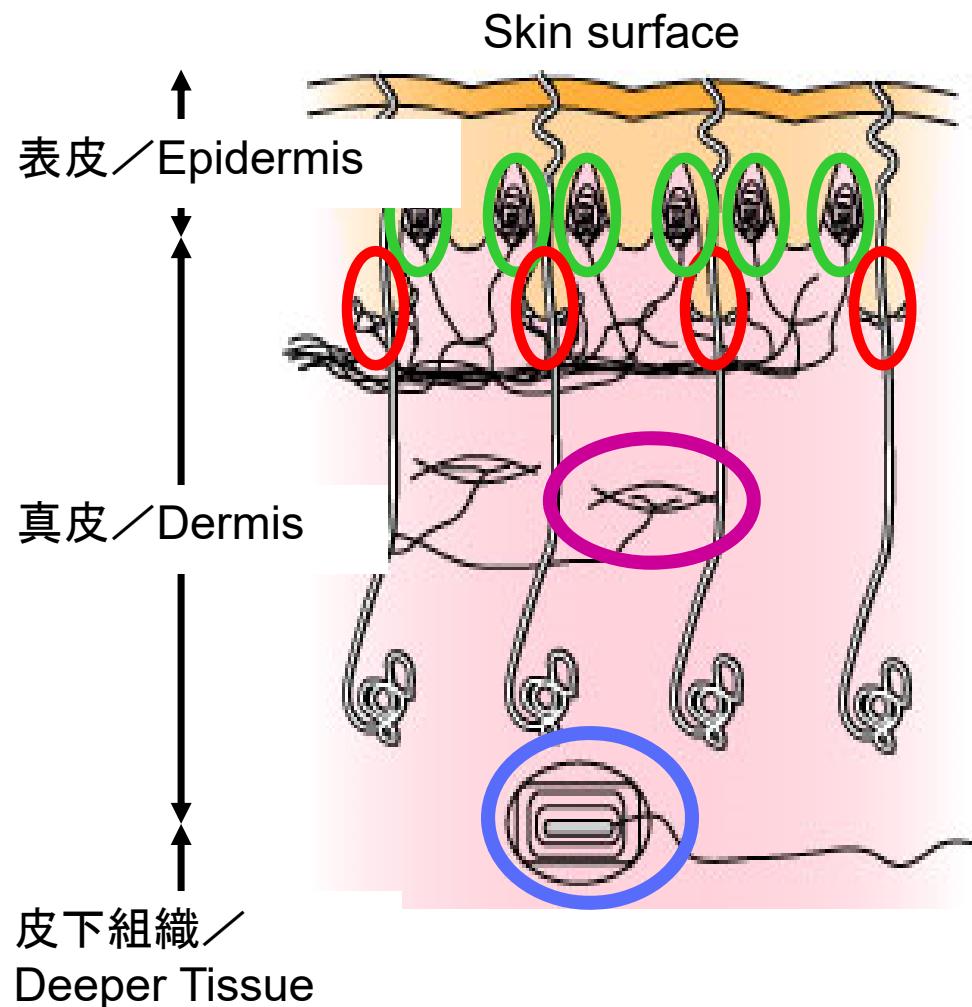
大学院の90分講義2回分のダイジェストになります。講義動画をアップロードしていますので、興味があれば「**インタラクティブシステム特論**」で検索してください（触覚は第6回から7回）。

この時間の流れ



1. 触覚の基礎知識
2. 触覚ディスプレイと触感再現

皮膚構造（無毛部） Skin Structure (Hairless Parts)



機械受容器：機械的変形に応答

Mechanoreceptor: Sense Mechanical Deformation

浅部／Shallow part

- マイスナー小体／MeissnerCorpuscle
- メルケル細胞／Merkel Cell

深部／Deep part

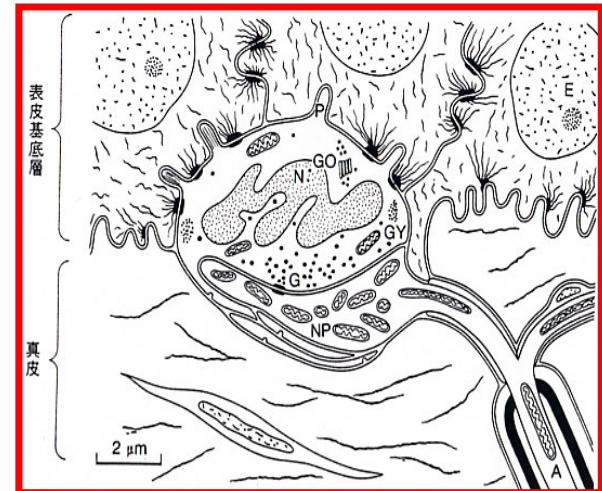
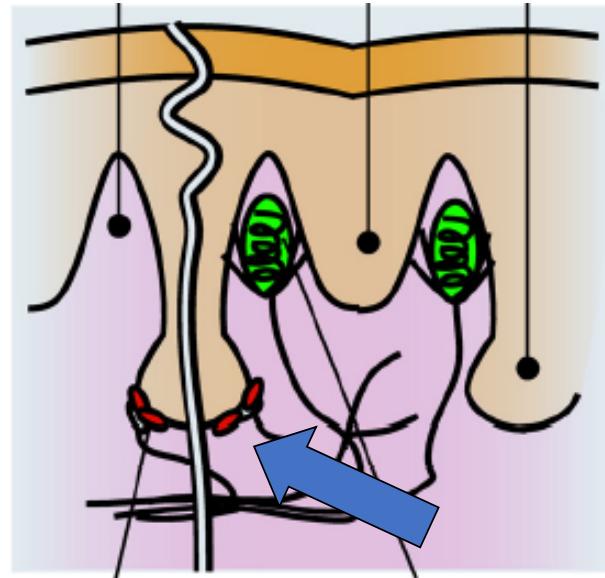
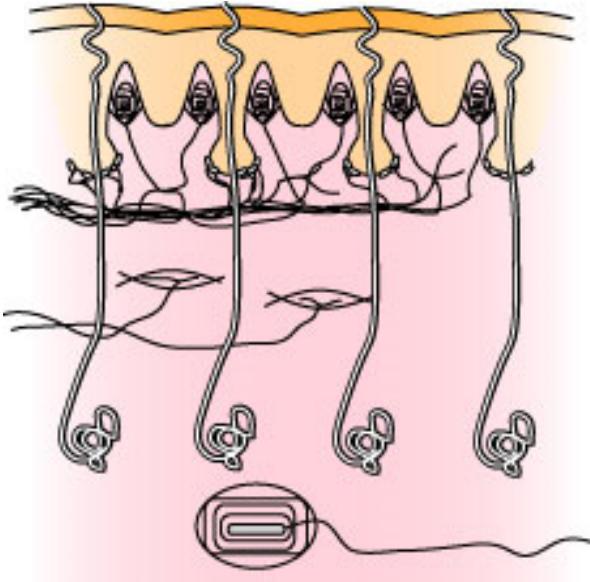
- ルフィニ終末／Ruffini Ending
- パチニ小体／Pacinian Corpuscle

その他／Misc

自由神経終末(痛覚、温度感覚)

FreeEnding (Pain, Temperature)

メルケル細胞／Merkel Cell



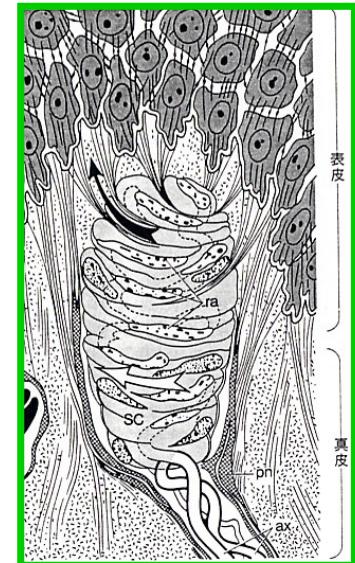
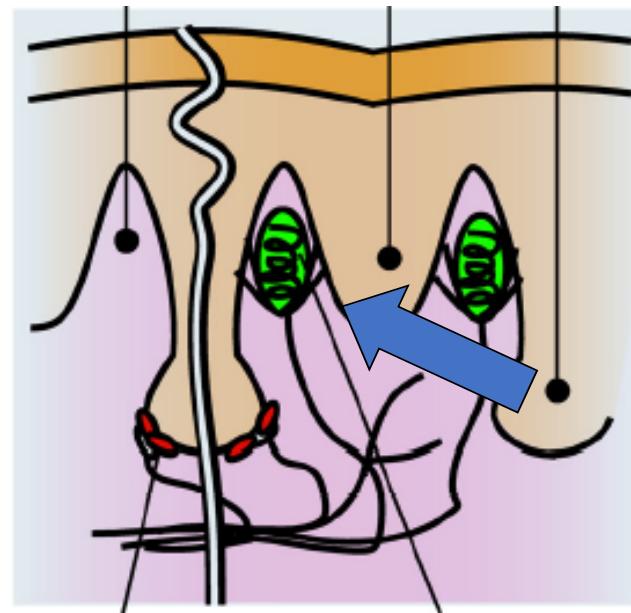
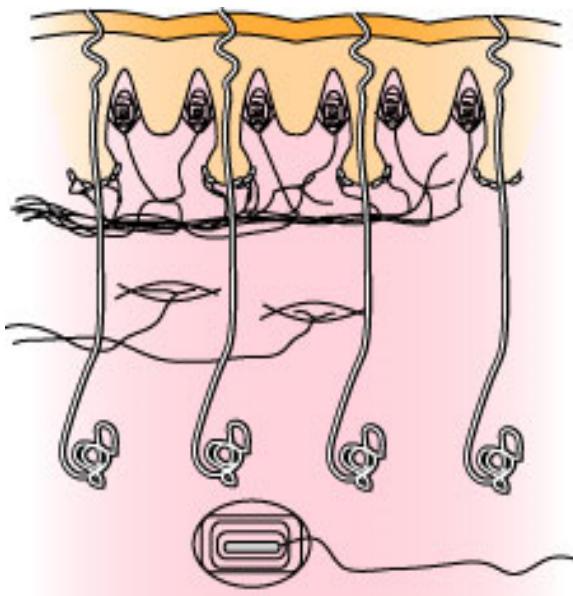
新編 感覚・知覚心理学ハンドブック
<http://www.seishinshobo.co.jp/book/b88071.html>



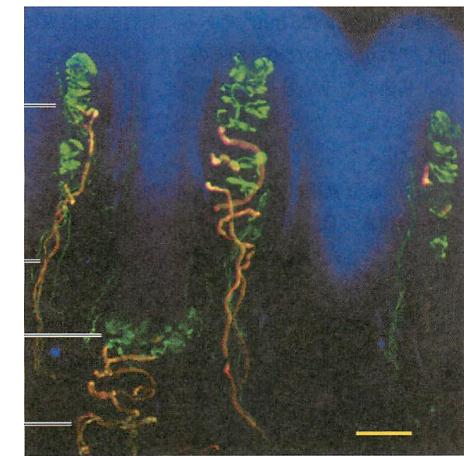
- 表皮と真皮の境界に密に存在。
- 唯一の細胞性受容器。神経とシナプス接合
- 静的な歪に応答
- 発火頻度は歪の大きさに比例
- 単独の活動では純粹な圧覚を生成

カンデル神経科学(Principles of Neural Science)
<https://www.medsi.co.jp/kandeli/syousai/index.html> 7

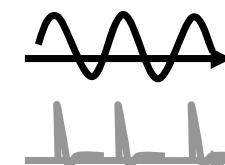
マイスナー小体／Meissner Corpuscle



新編 感覚・知覚心理学ハンドブック
<http://www.seishinshobo.co.jp/book/b88071.html>

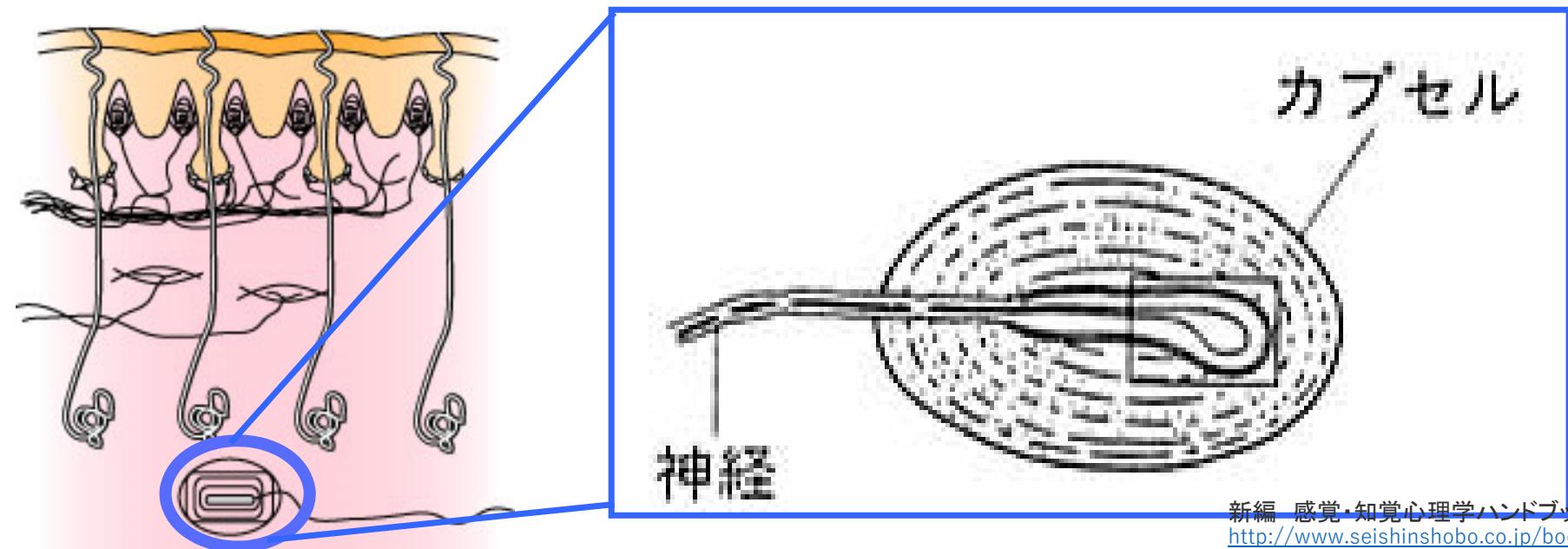


- 真皮乳頭部に密に存在。
- 低周波振動(15-100Hz)に応答 (共振30Hz)
- 発火周波数～振動周波数
- 単独の活動では**振動感覚**、パタパタ感を生じる



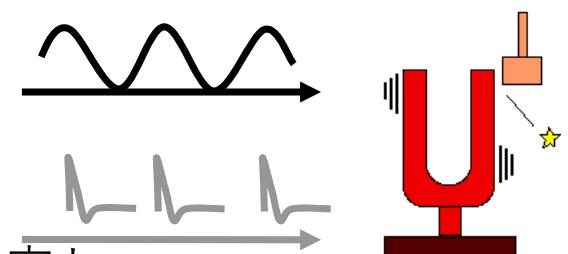
カンデル神経科学(Principles of Neural Science)
<https://www.medsi.co.jp/kande/l/syousai/index.html>

パチニ小体／Pacinian Corpuscle

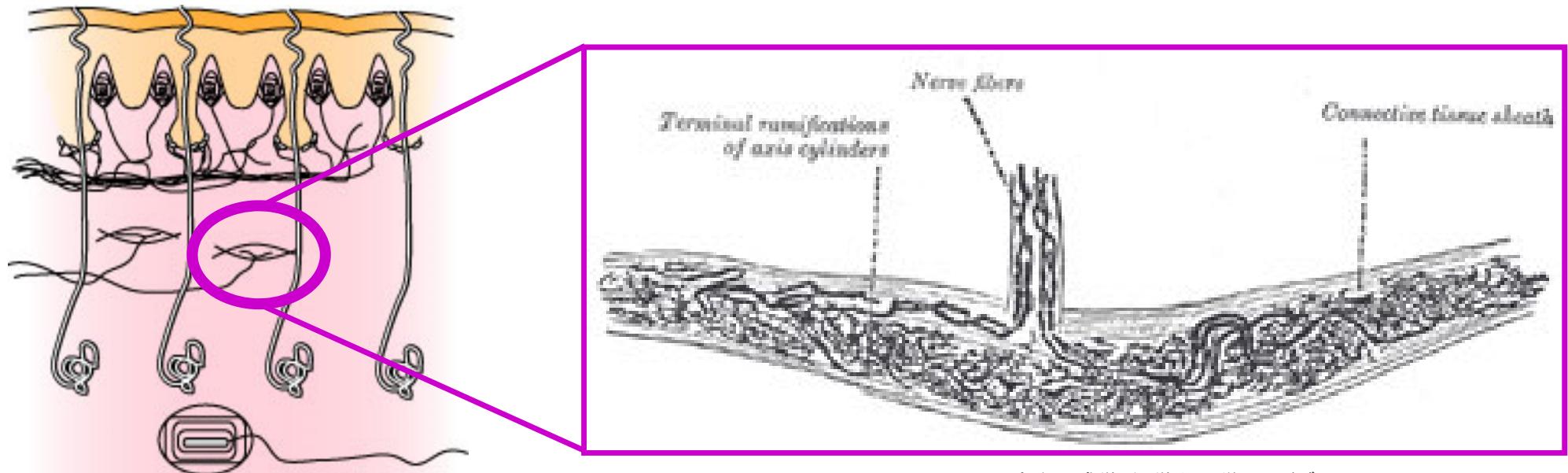


新編 感覚・知覚心理学ハンドブック
<http://www.seishinshobo.co.jp/book/b88071.html>

- ・皮下組織にまばらに存在。
- ・高周波振動に応答(60-800Hz)(共振250Hz)
- ・**発火周波数～振動周波数**
- ・単独の活動では音叉に触れたような**振動感覚**、指全体の痺れ



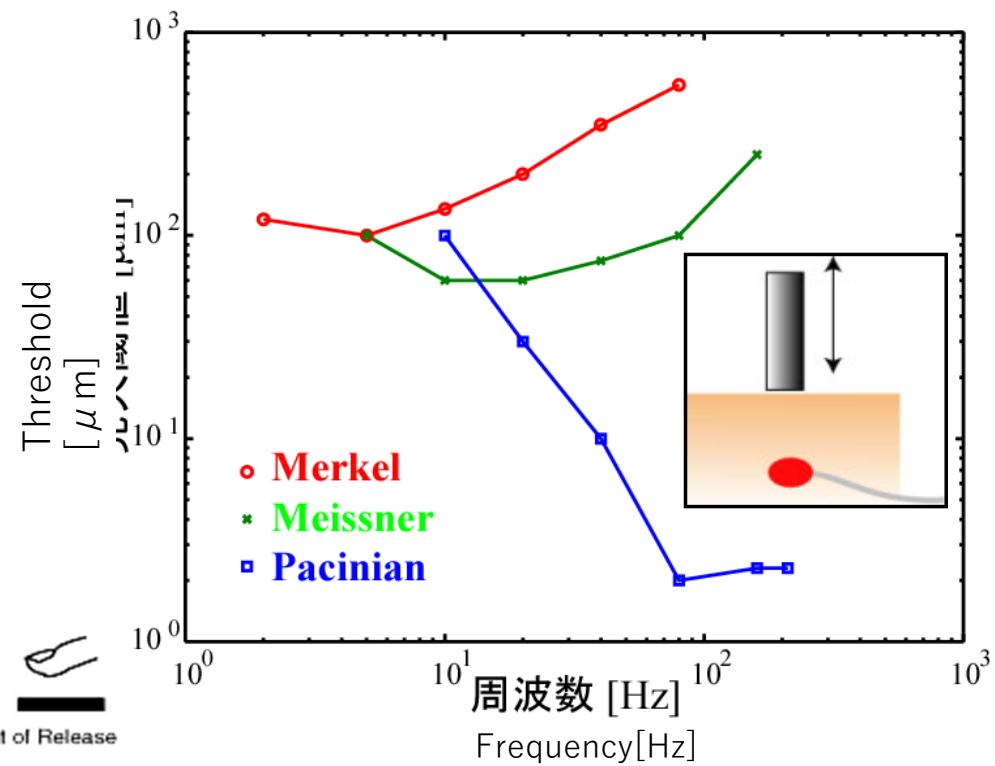
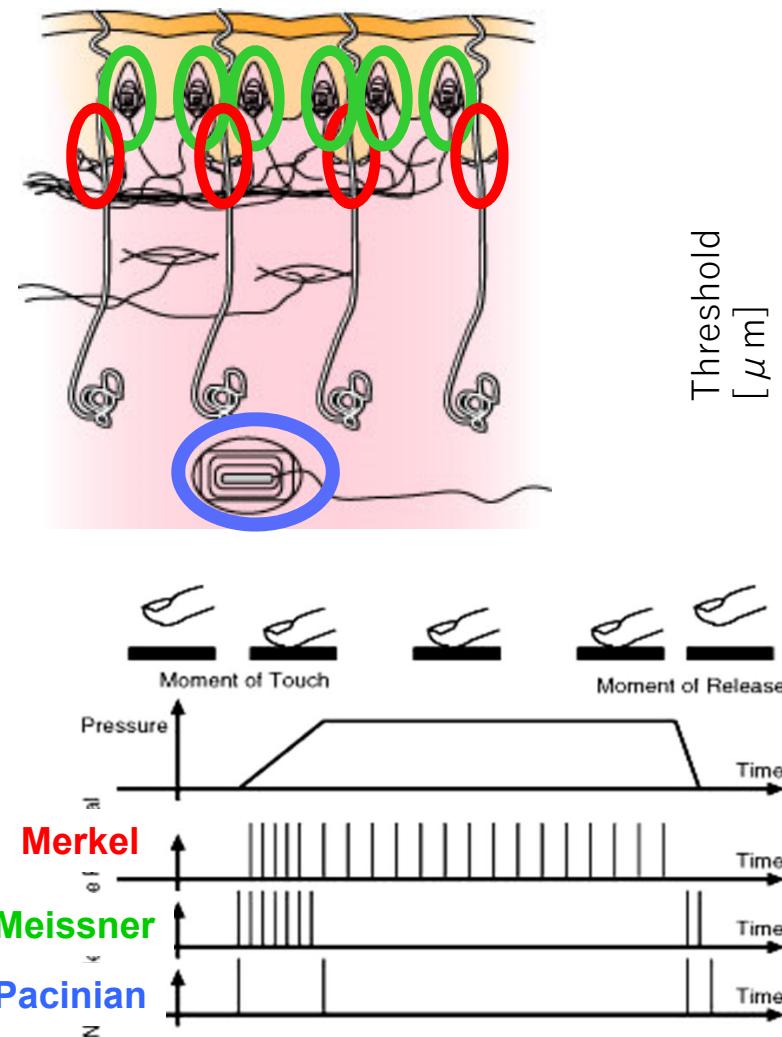
ルフィニ終末／Ruffini Ending



新編 感覚・知覚心理学ハンドブック
<http://www.seishinshobo.co.jp/book/b88071.html>

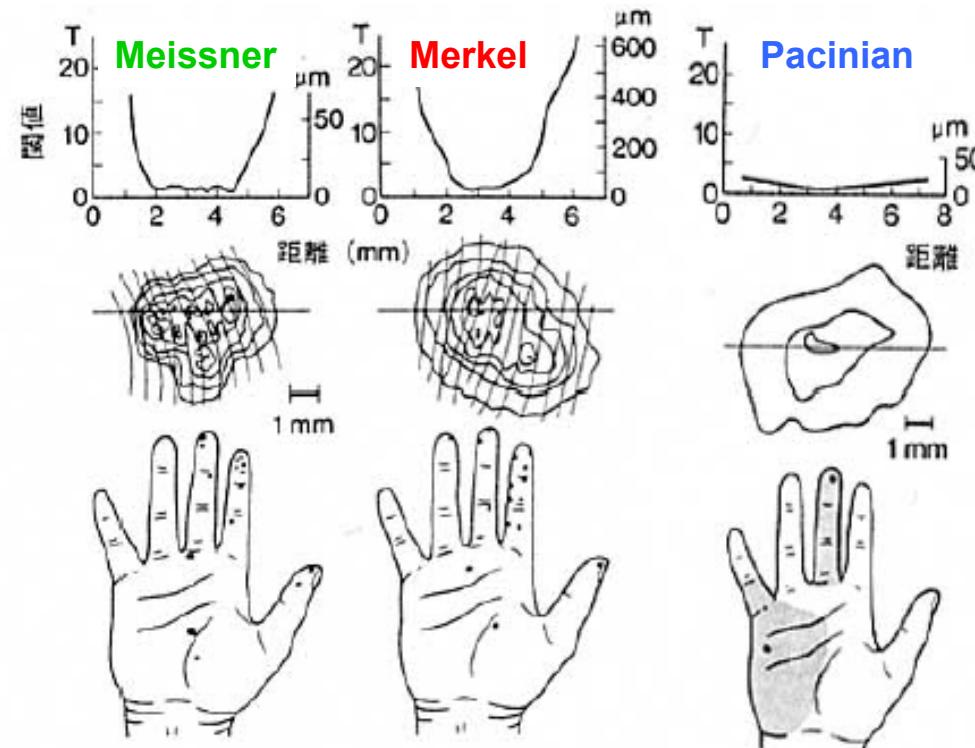
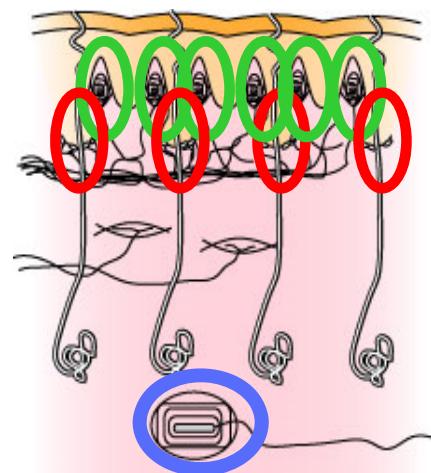
- ・皮下組織に疎らに存在。
- ・静的な横ずれに応答
- ・発火頻度は横ずれの大きさに比例
- ・単独の活動では**感覚を生じない**

時間的役割分担



- Merkel : 直流成分／圧力
- Meissner : 低周波成分／速度
- Pacinian : 高周波成分／加速度

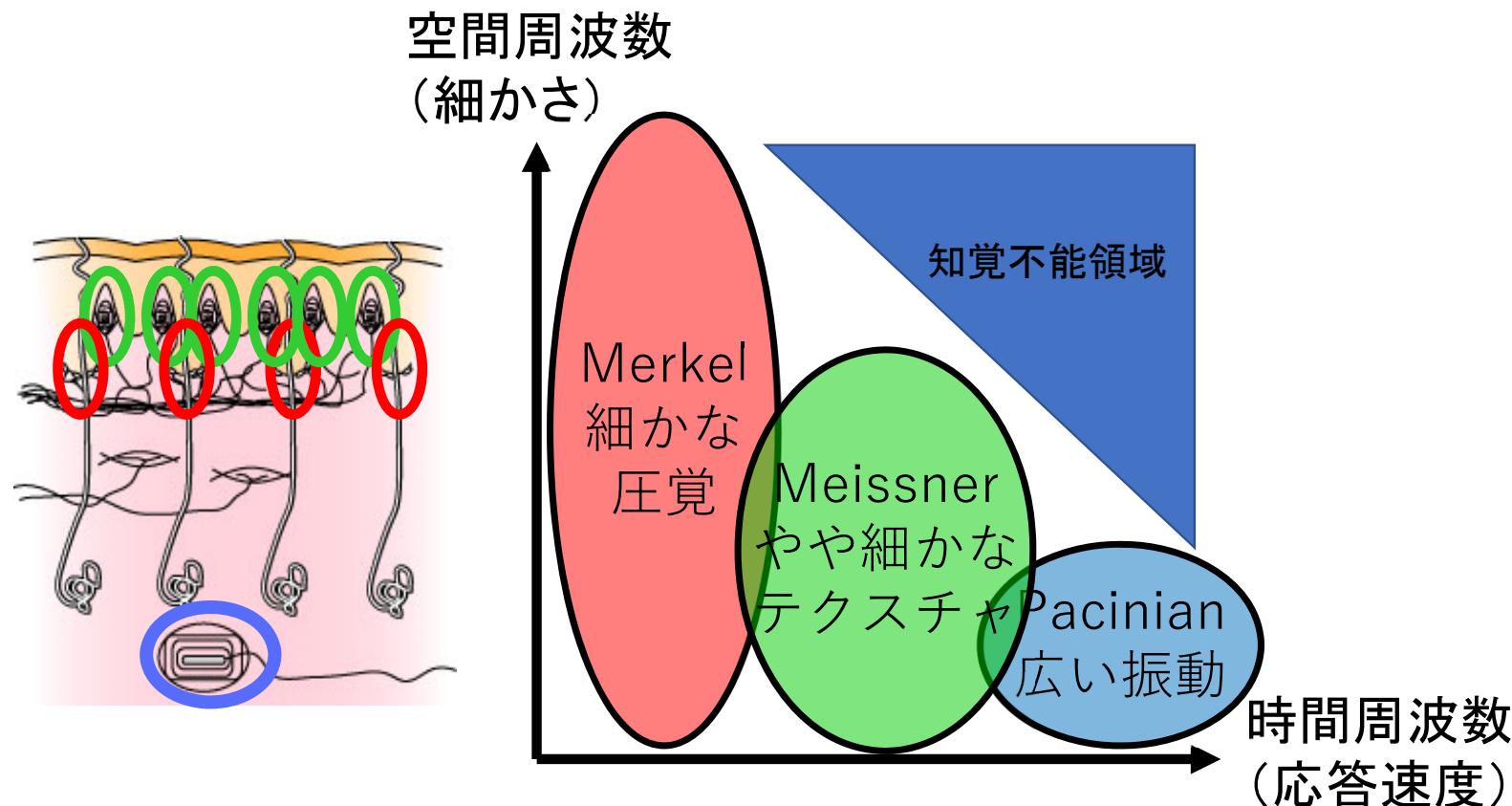
空間的役割分担／Spatial Roles



新編 感覚・知覚心理学ハンドブック
<http://www.seishinshobo.co.jp/book/b88071.html>

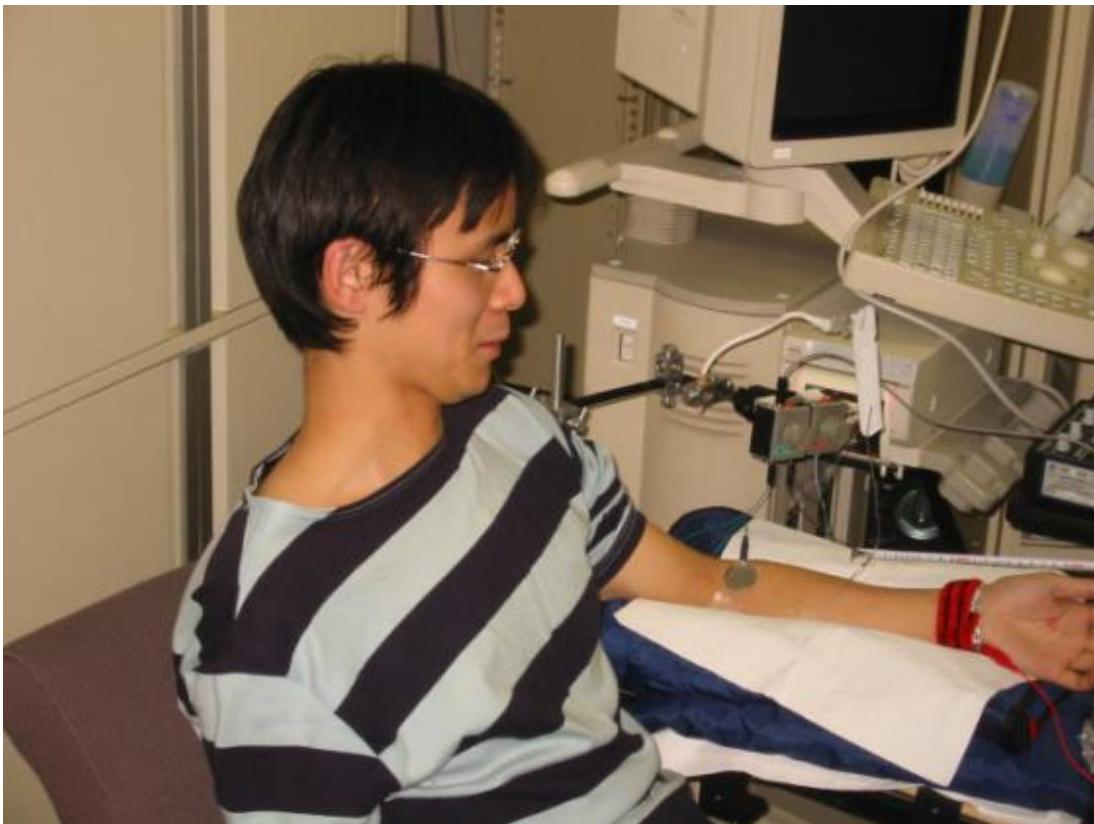
- Merkel : 細かいパターン／Small Pattern
- Meissner : 皮膚上の細かい動き／Small Area Movement
- Pacini : 広い面積の動き／Large Area Movement

各機械受容器の役割分担



ポイント：時間的，空間的な相補性

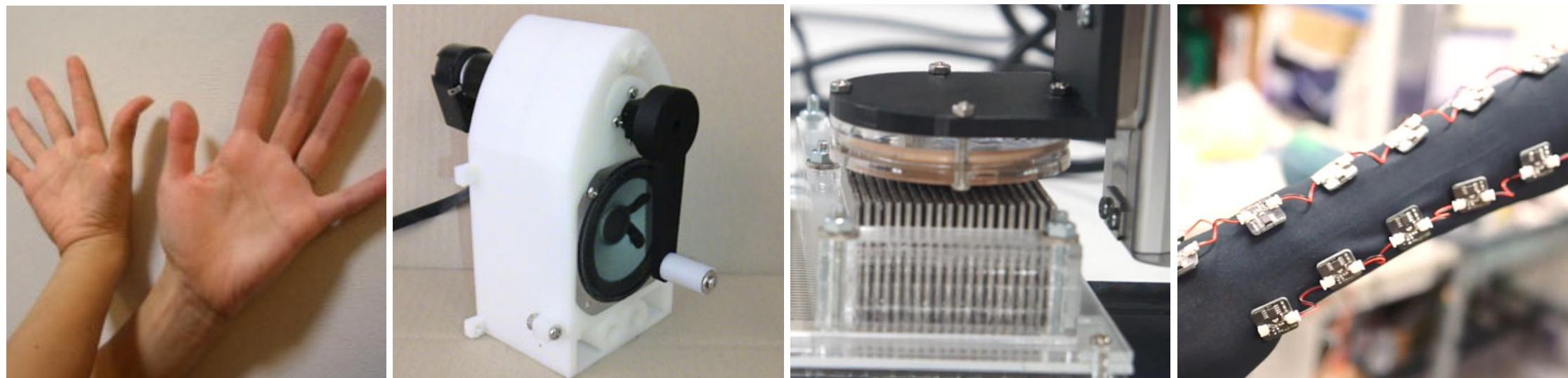
どうやって調べる？：神経活動



By using needle, we can directly measure nerve activities.

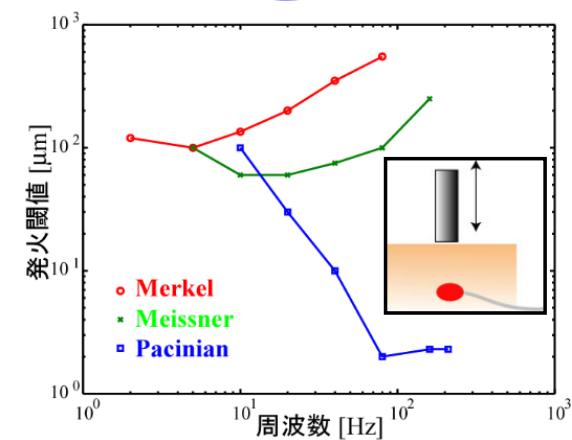
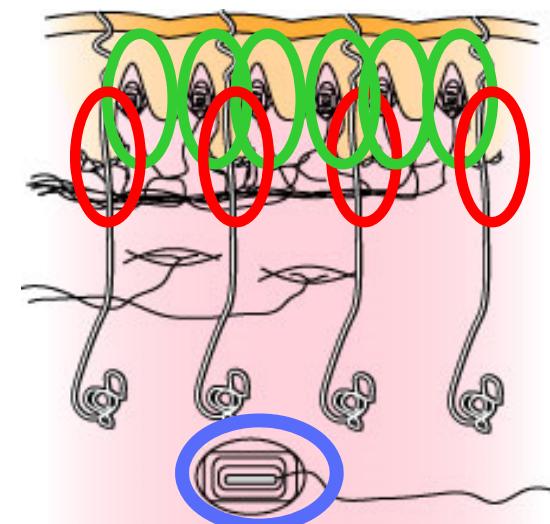
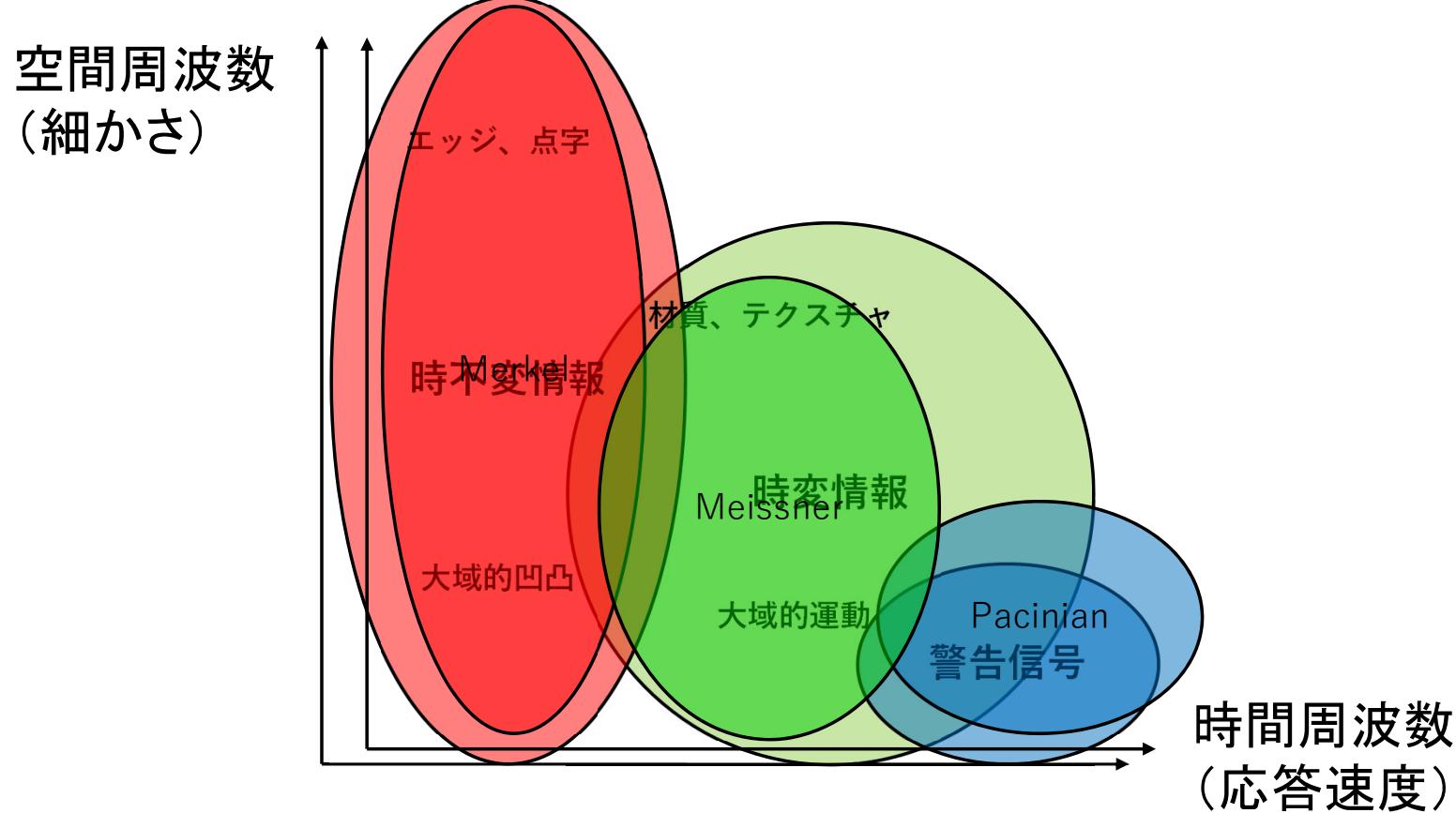
Vallbo, "Sensations evoked from the glabrous skin of the human hand by electrical stimulation of unitary mechanosensitive afferents," Brain Res., 1981.

この時間の流れ



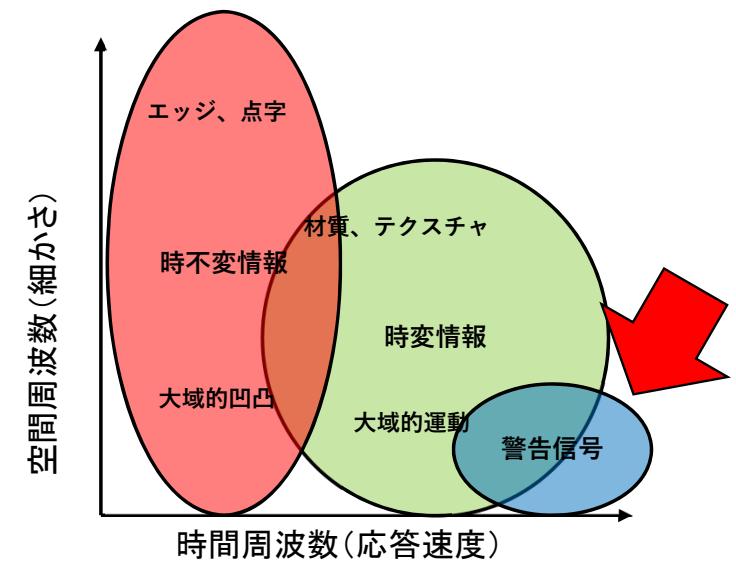
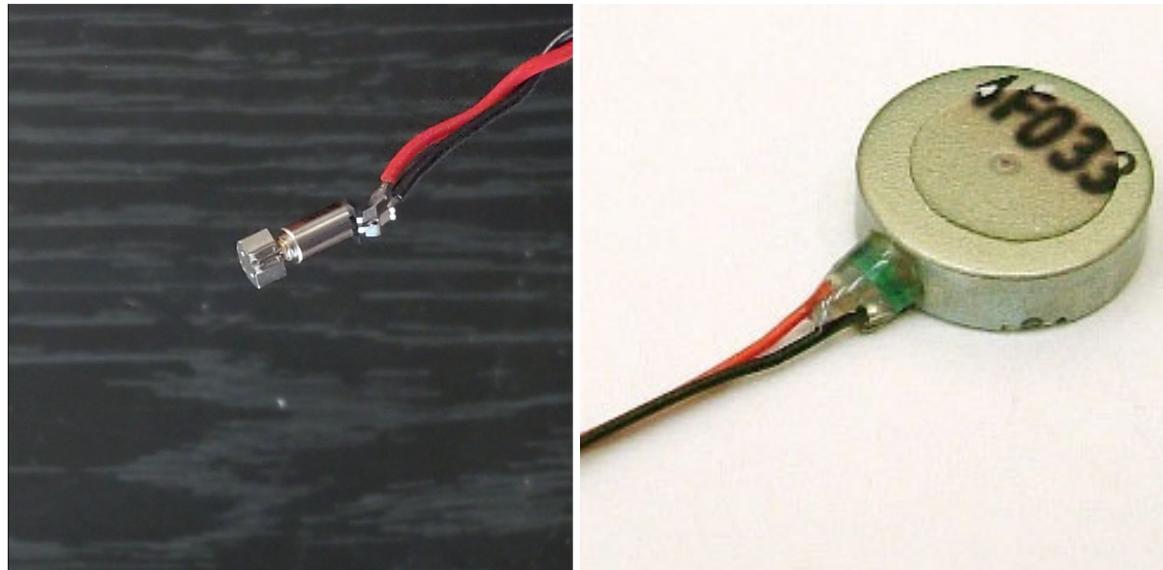
1. 触覚の基礎知識
2. 触覚ディスプレイと触感再現

提示したい情報



提示したい情報 ⇒ 必要なスペック
ハードウェアと密接な関係 (すべての領域を提示できる手法は無い)

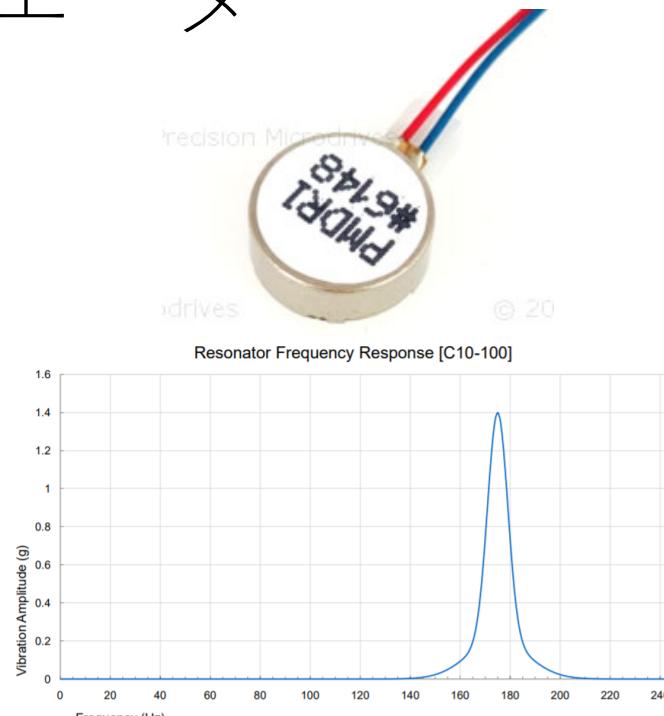
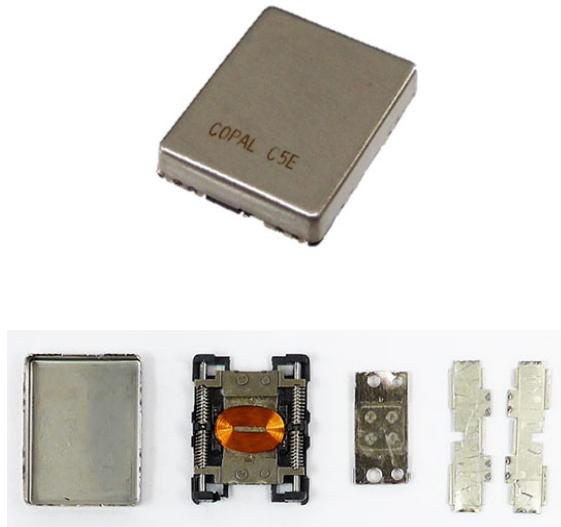
振動モータによる警告/Vibration Motor



・モータ + 偏心おもり

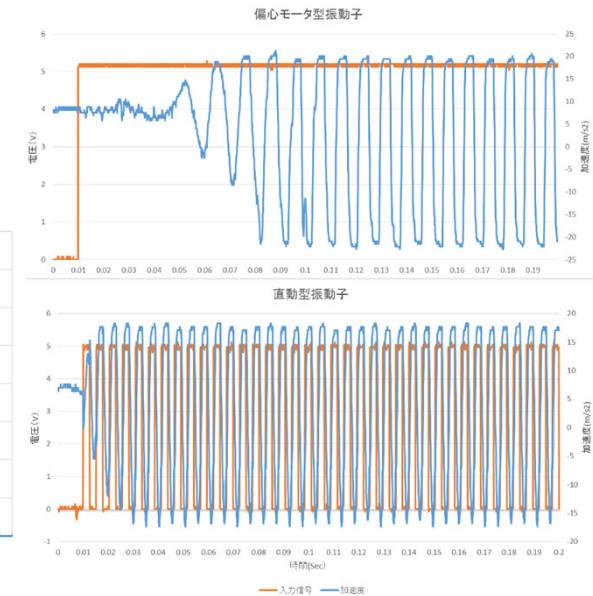
- ・電圧を変えると振動の周波数と振幅が同時に変更。
- ・材質、テクスチャの表示には向き。
- ・定格電圧でPacini小体の周波数領域で振動するように設計。
- ・警告信号、大域的運動に好適。

直動共振アクチュエータ



<http://akizukidensi.com/catalog/g/gP-06838/>

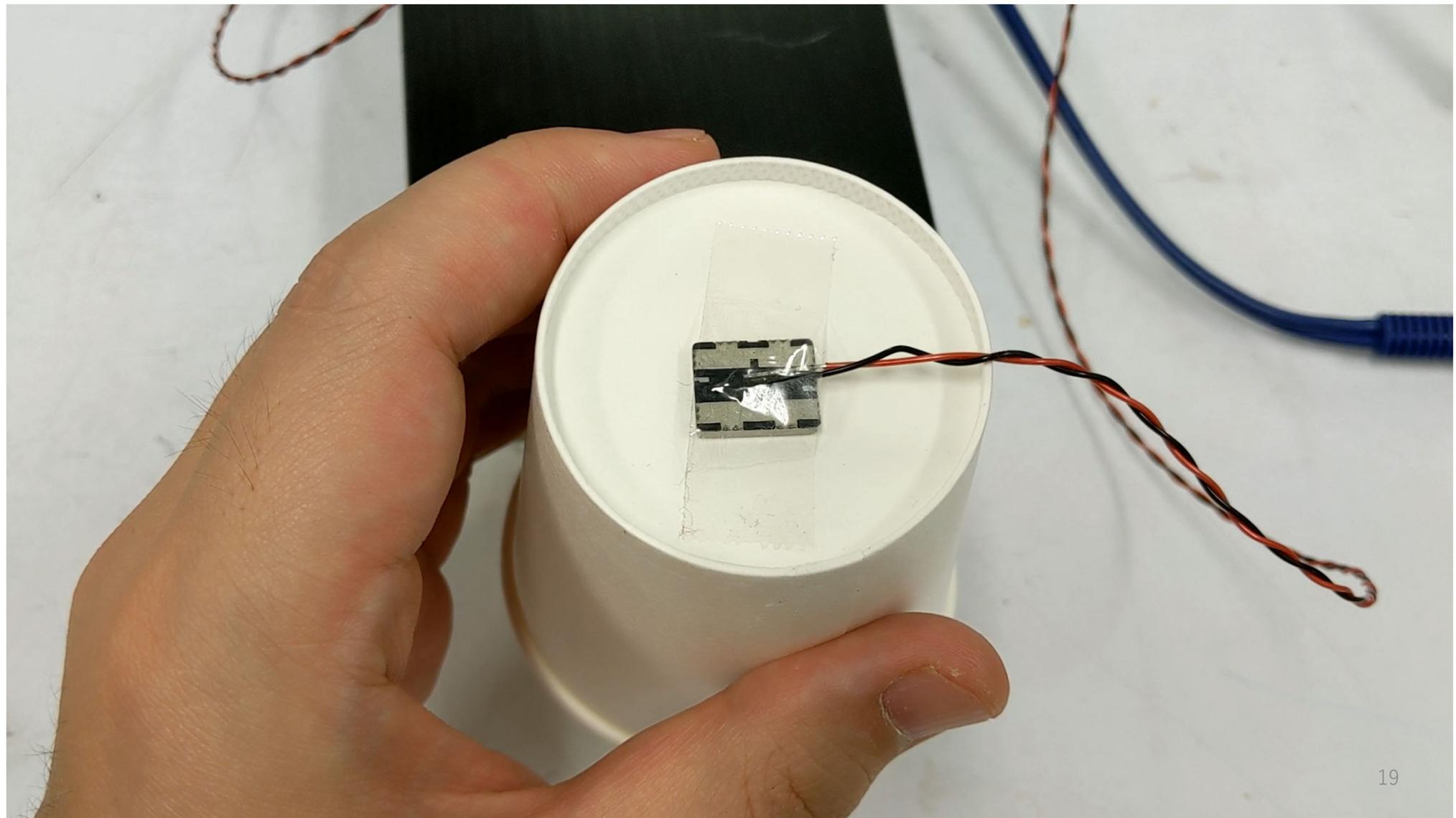
<https://www.precisionmicrodrives.com/product/c10-100-10mm-linear-resonant-actuator-4mm-type>



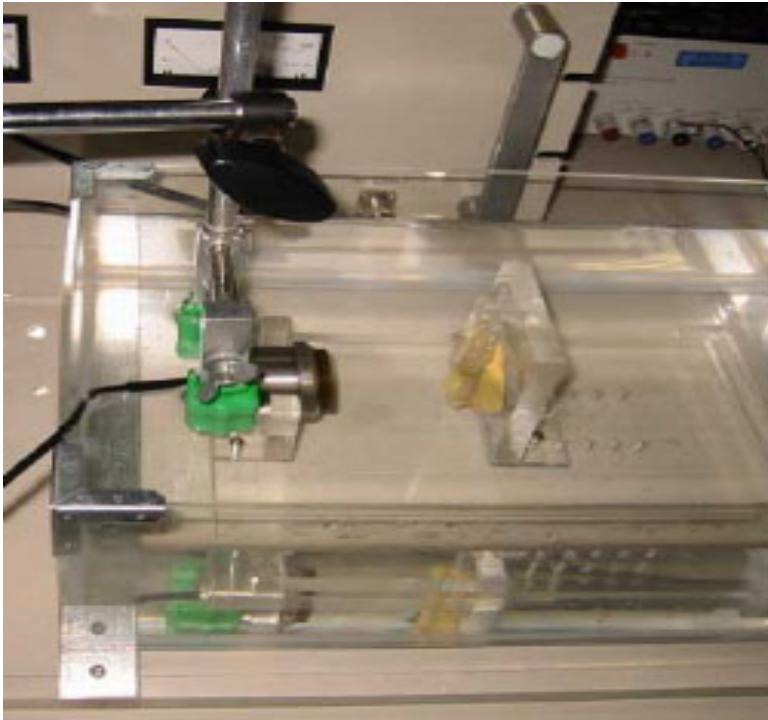
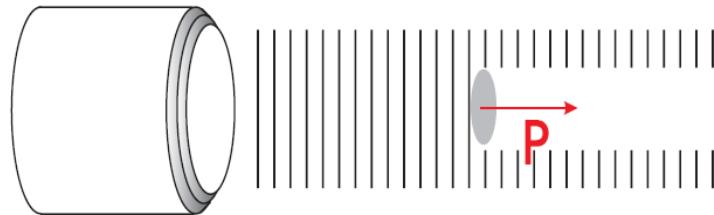
田辺他:多数の直動型振動子を用いた手全体への触覚提示が可能なグローブの開発,SICE-SI2014

- 偏心おもり：一定回転速度に達するまでの時間遅れ：80ms程度
- ボイスコイル振動子に共振特性をもたせたLRA：遅延10ms以下.
- 共振周波数150Hz～200Hz. Pacini領域を狙う
- 現在スマートフォン、スマートウォッチに内蔵

直動共振アクチュエータ



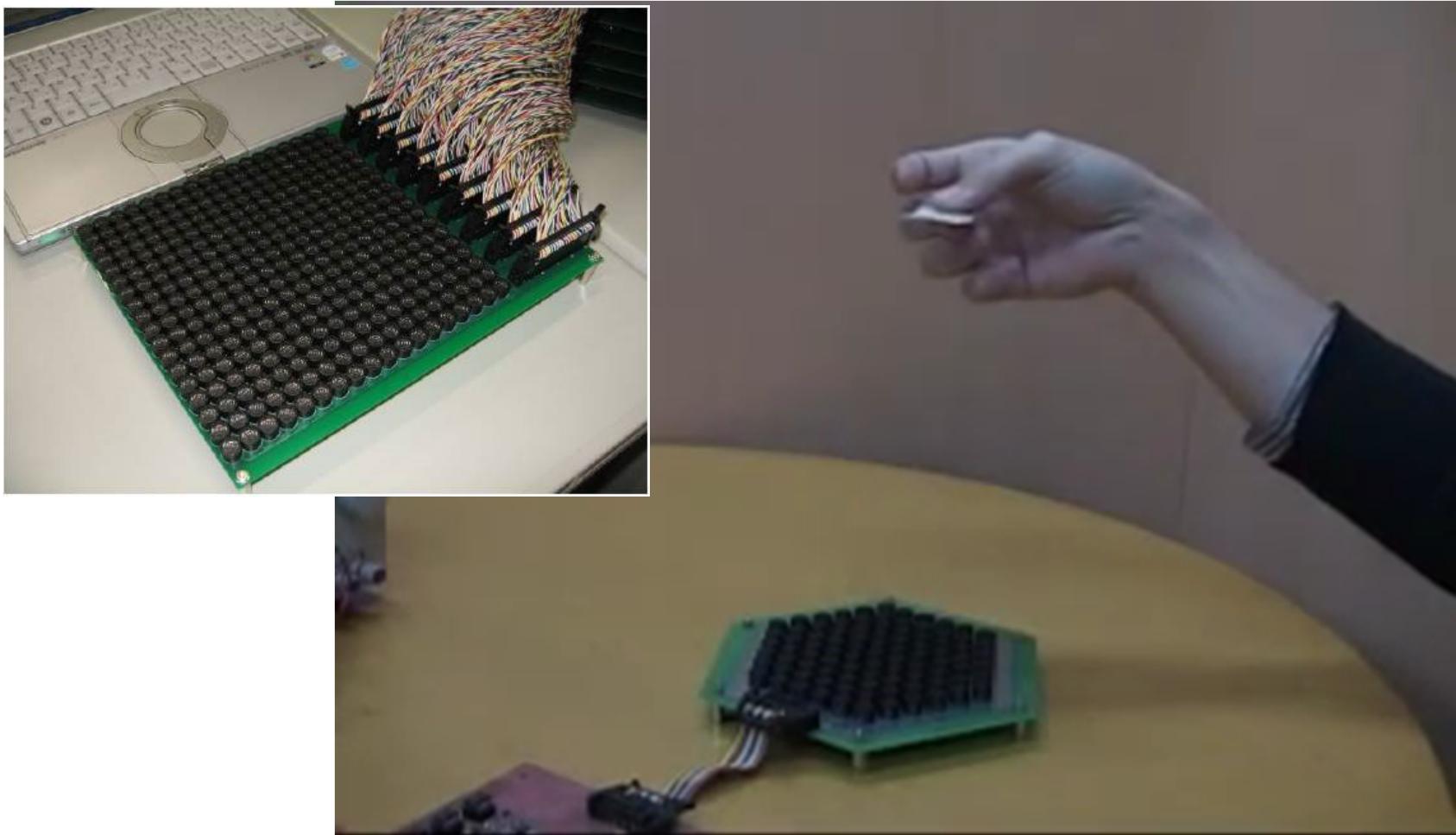
Actuator should disappear?



Ultrasound generates Static Pressure

[Iwamoto, Maeda and Shinoda "Focused ultrasound for tactile feeling display," In Proc. of ICAT2001.](#)

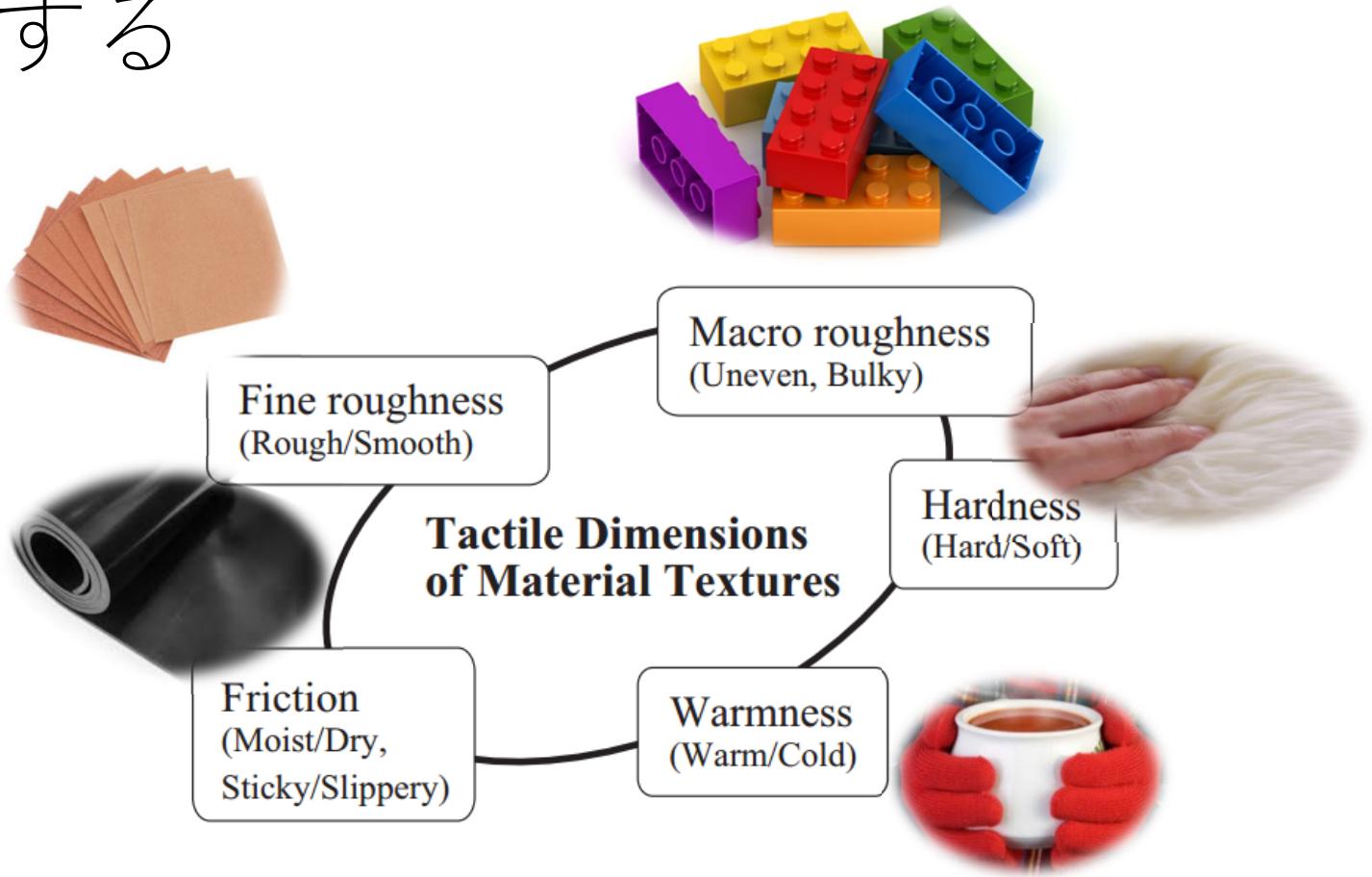
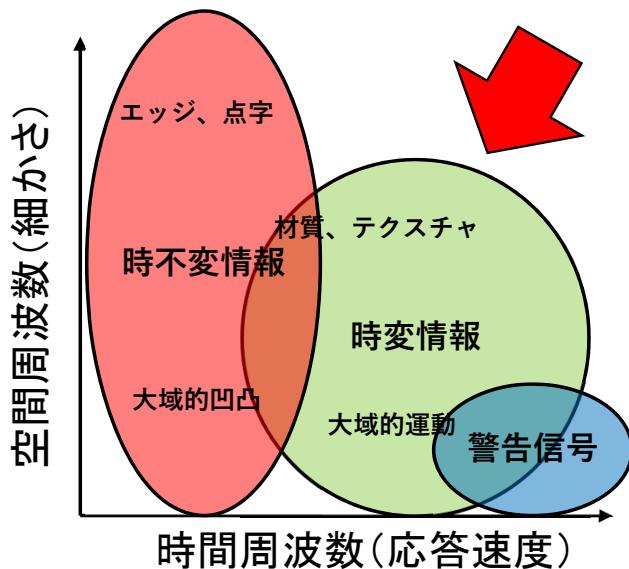
空中超音波の収束による触覚提示



<https://www.youtube.com/watch?v=hSf2-jm0SsQ>

Hiroyuki Shinoda, Airborne Ultrasound Tactile Display. Journal of the Robotics Society of Japan, 2018

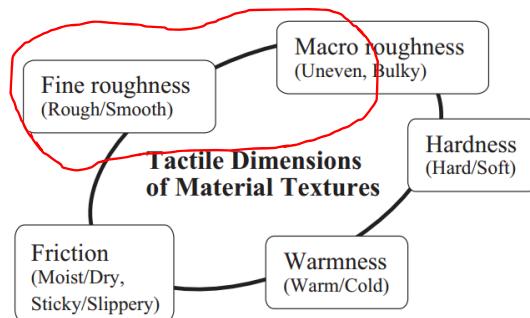
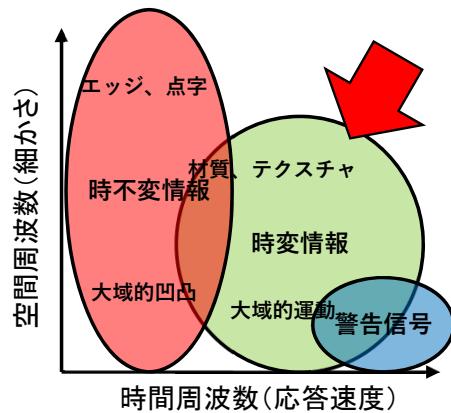
「触感」を提示する



永野, 岡本, 山田: 触覚的テクスチャの材質感次元構成に関する研究動向, TVRSJ2011

- 触感は大域的粗さ、細かな粗さ、硬柔、摩擦、温度、で構成される。
- 触感の記録・再現は遠隔触覚を実用レベルに上げうる。

理想の振動子：スピーカ



永野, 岡本, 山田:触覚的テクスチャの材質感次元構成に関する研究動向, TVRSJ2011

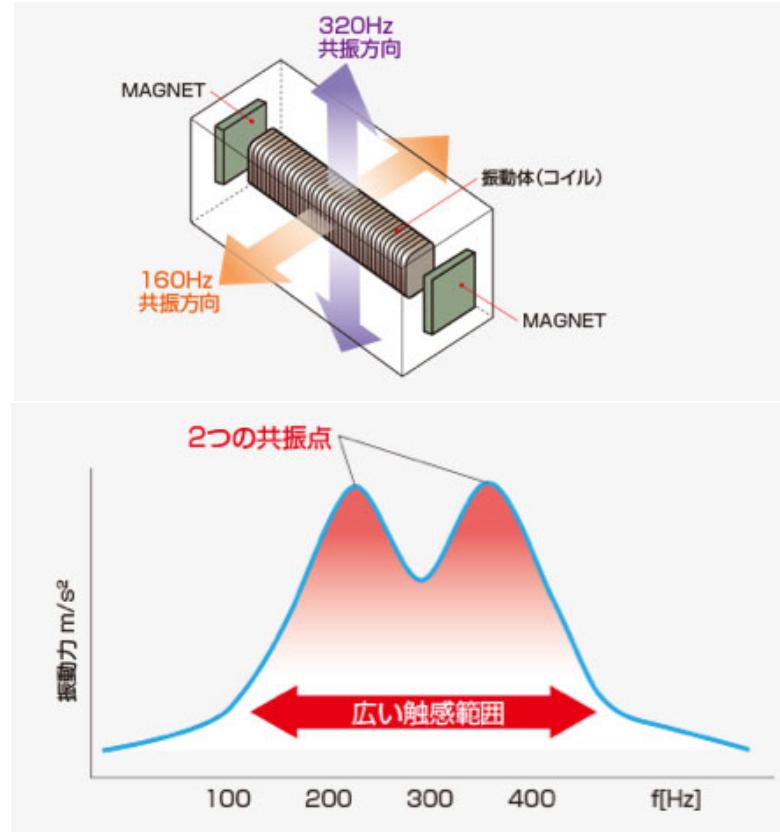


- 偏心モータ、LRAに対してエネルギー効率は落ちるものの、任意の周波数／振幅を実現。
- 駆動系はほぼオーディオアンプ。
- 比較的細かな粗さ感、主にPacini小体が捉える（が故に空間的な特徴のない）触感成分か、把持物体を介する（が故に空間的な特徴のない）触感成分が得意。

Structure of HAPTIC Reactor (Alps Alpine)

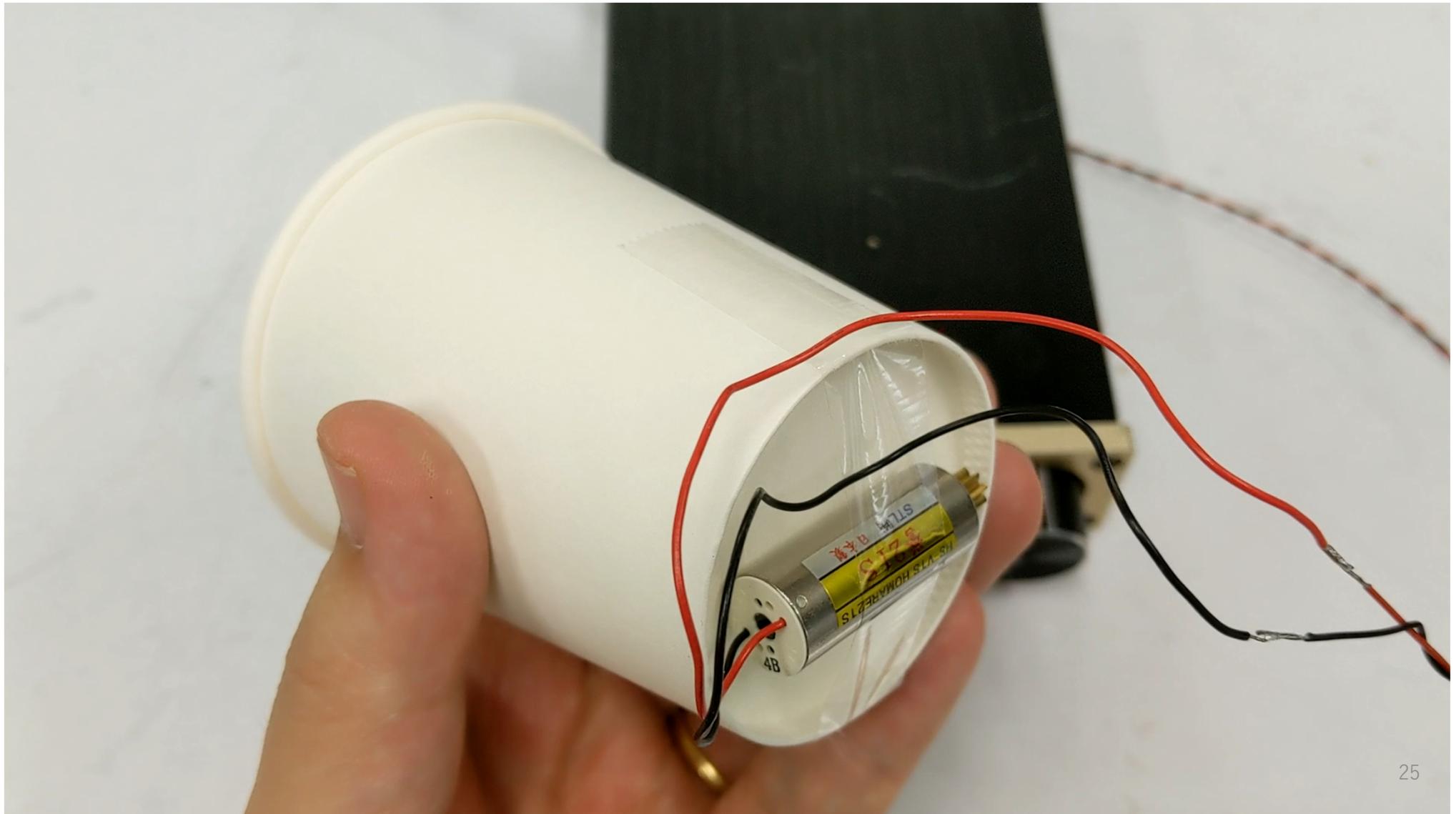


<https://tech.alpsalpine.com/prod/e/html/haptic/>

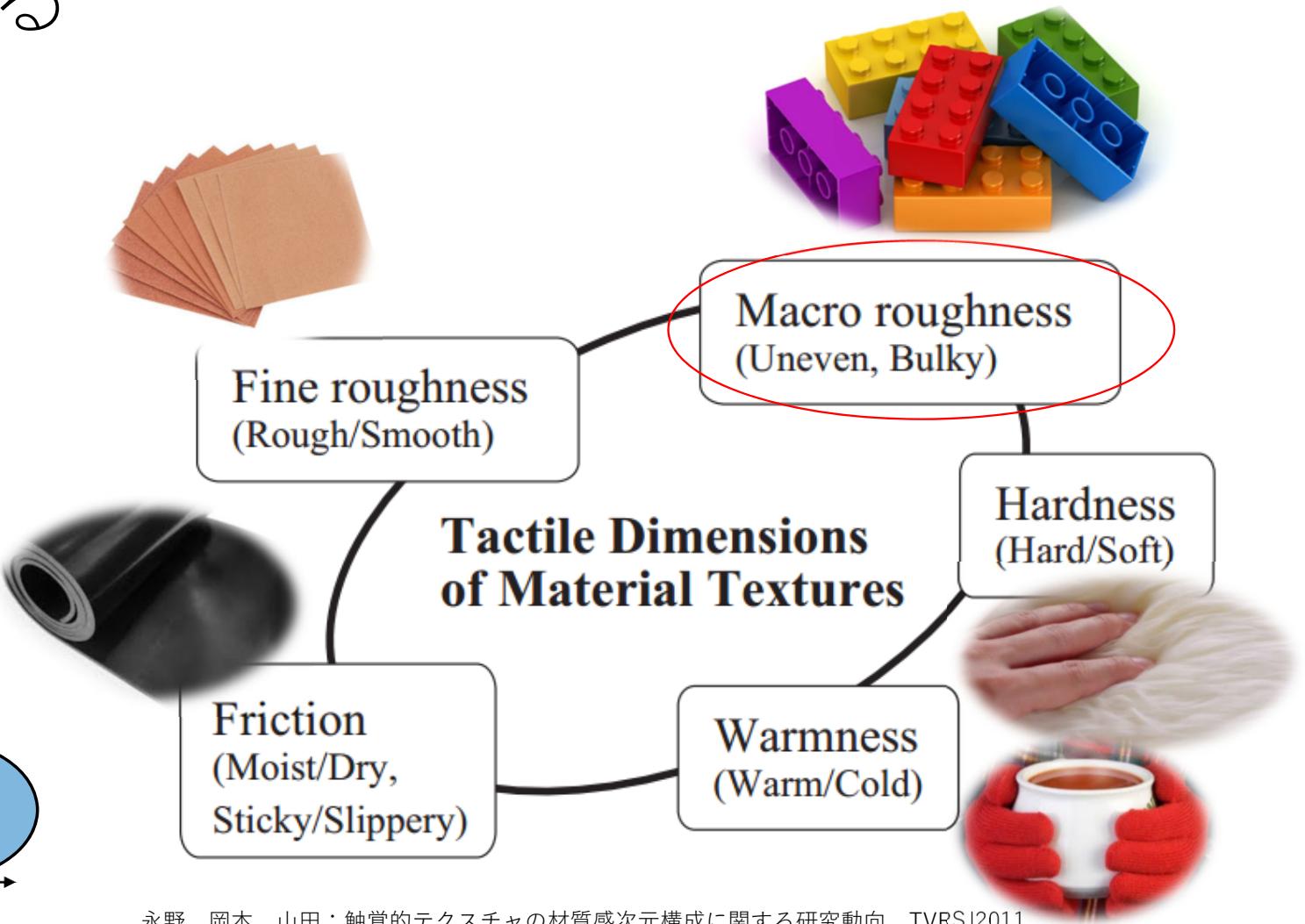
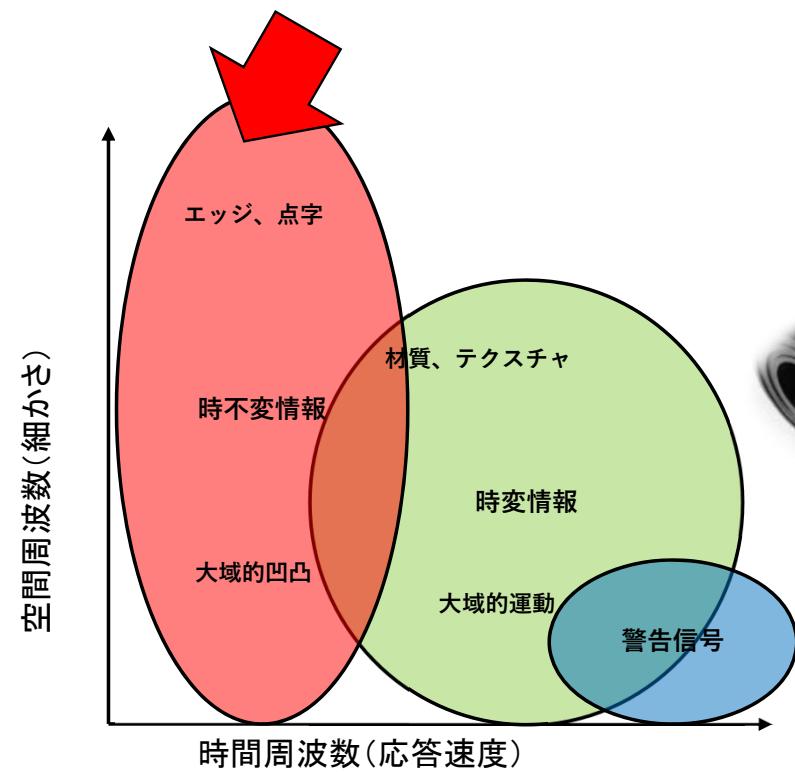


- 異なる軸に2つの共振点をもたせることで幅広い知覚が可能。
- LRAとスピーカ形アクチュエータの中間的位置。LRAと分類されることも。

DCモータによる振動提示

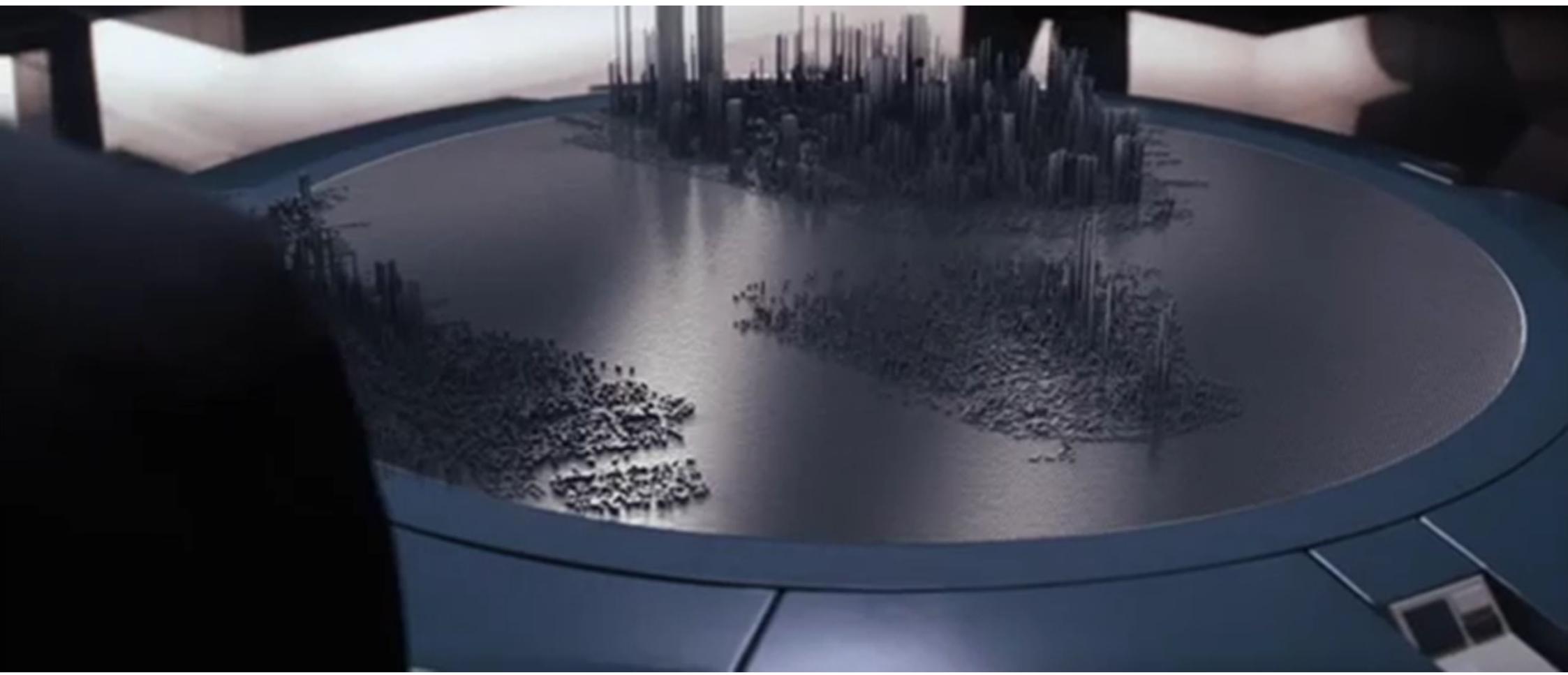


「形」を提示する



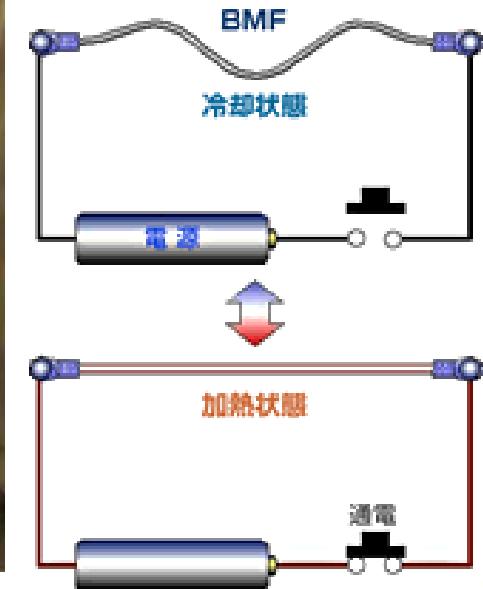
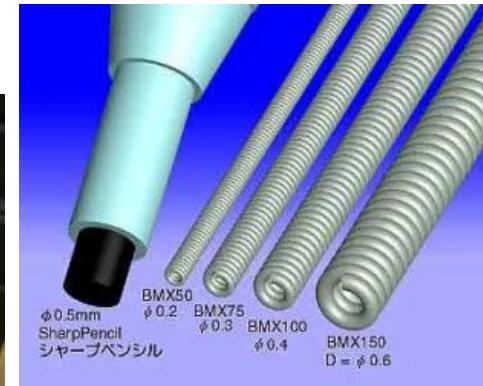
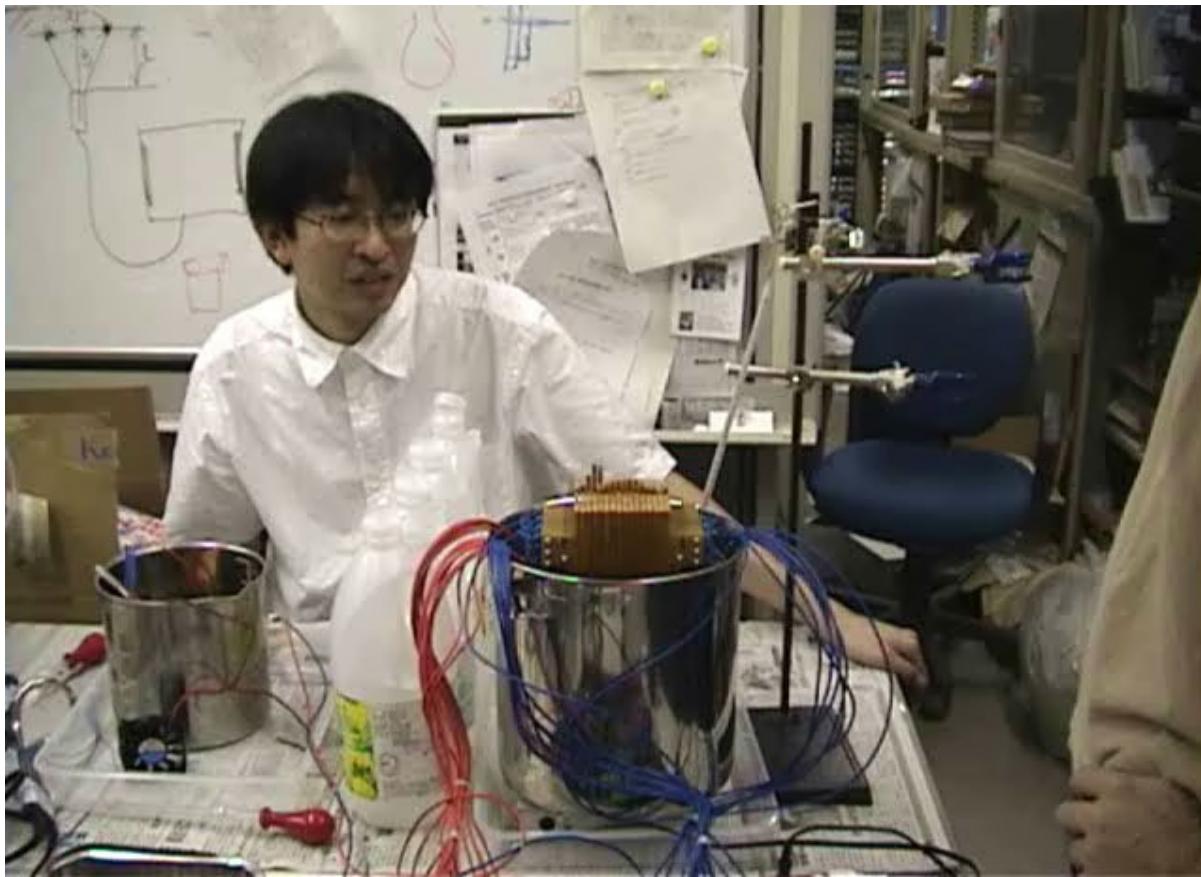
永野, 岡本, 山田:触覚的テクスチャの材質感次元構成に関する研究動向, TVRSJ2011

3 D shape reconstruction



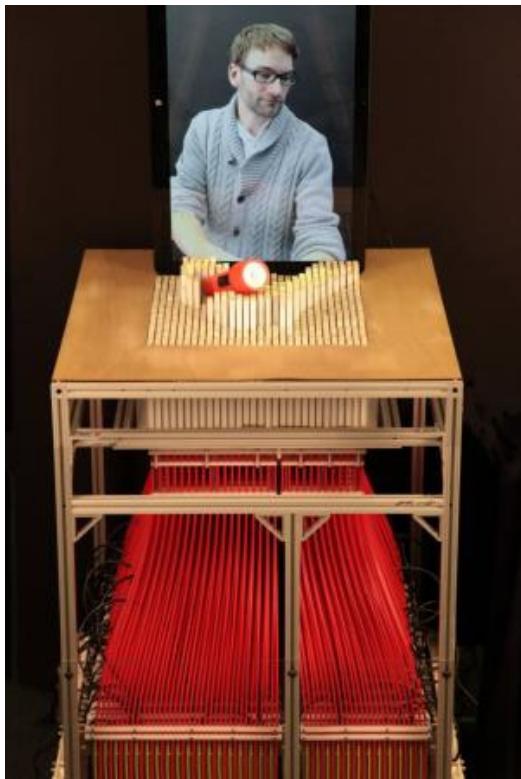
Xmen,2000 <https://www.youtube.com/watch?v=55voa5Pee2M>

PopUp(Nakatani et al, 2005)

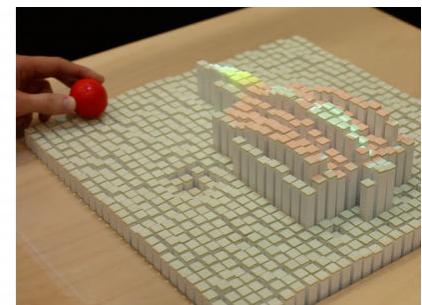
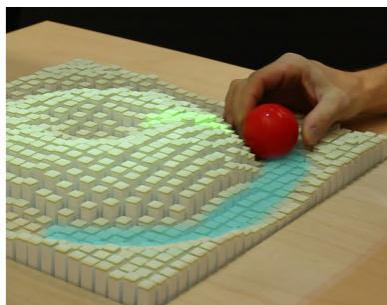
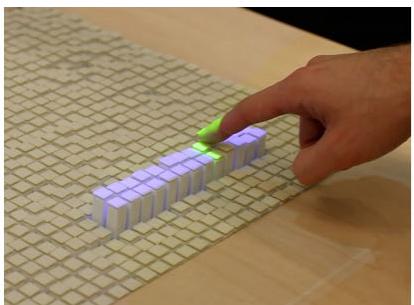


Coil-Type SMA (Shape Memory Alloy)
Extremely thin and large stroke

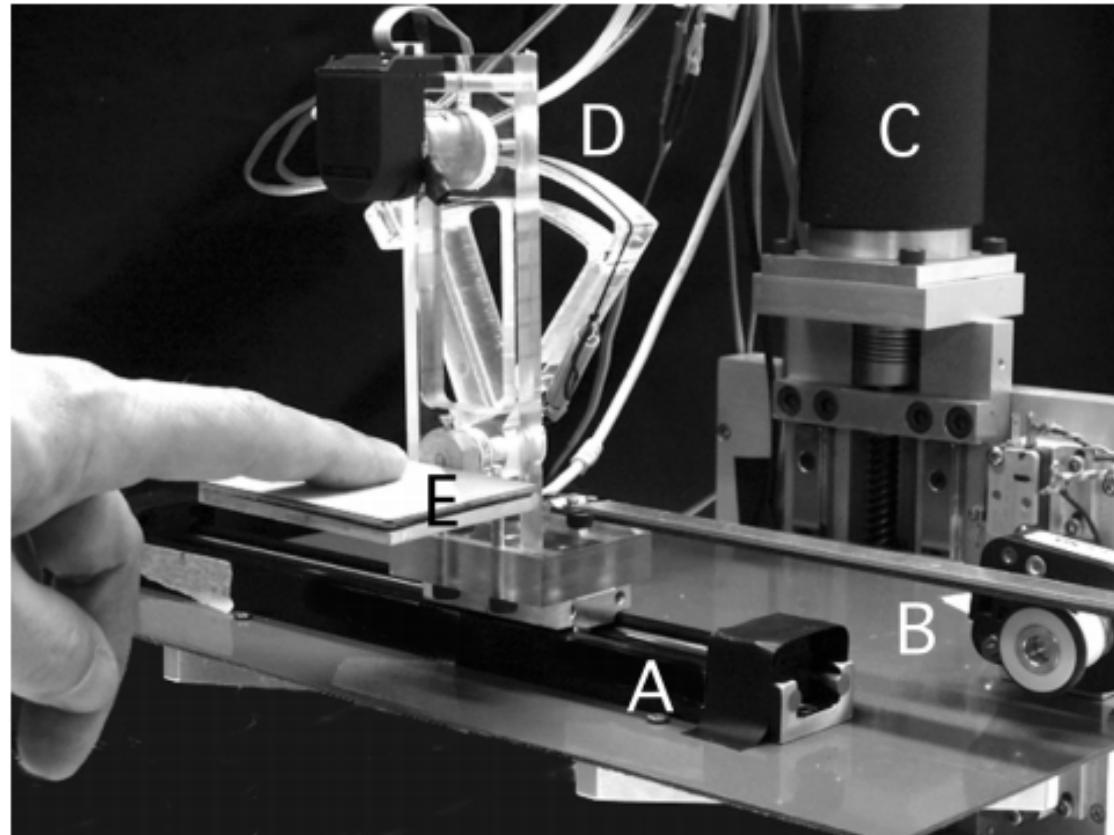
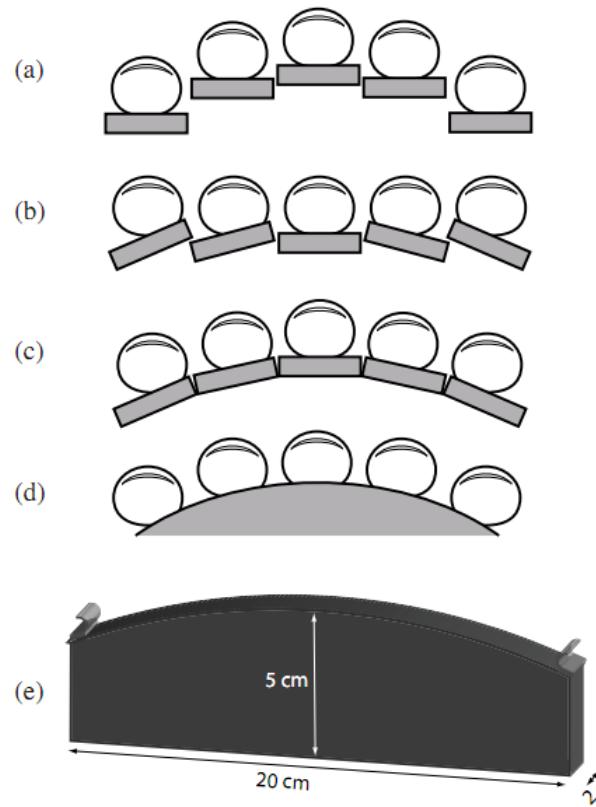
inFORM (Sean Follmer, 2013)



<https://www.youtube.com/watch?v=5EkkTV51Pg0>



凹凸感にとって重要なものは何か



大域的な凹凸感の手がかり：板の「傾き」>>板の高さ
実際の凹凸は必要ない（小さな凹凸であれば）。

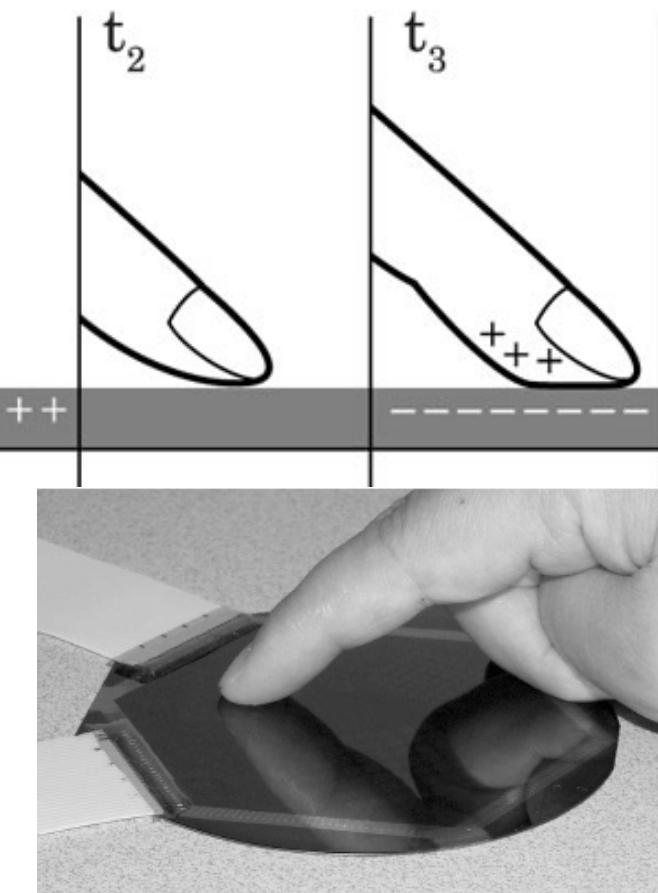
Maarten W. A. Wijntjes, Akihiro Sato, Vincent Hayward, Astrid M. L. Kappers
Local Surface Orientation Dominates Haptic Curvature Discrimination, Trans. On Haptics, 2009.

超音波振動による摩擦係数変化の利用



- スクイーズ効果：高周波振動で摩擦係数が減少する
- 指位置計測と組み合わせ、摩擦係数の提示が可能
- Nara et al., "Surface Acoustic Wave Tactile Display", IEEE CG&A, 2001.
- Winfield et al., "TPaD: Tactile Pattern Display Through Variable Friction Reduction", World Haptics Conf. 2007 31

高圧電極と皮膚の電気的吸引利用

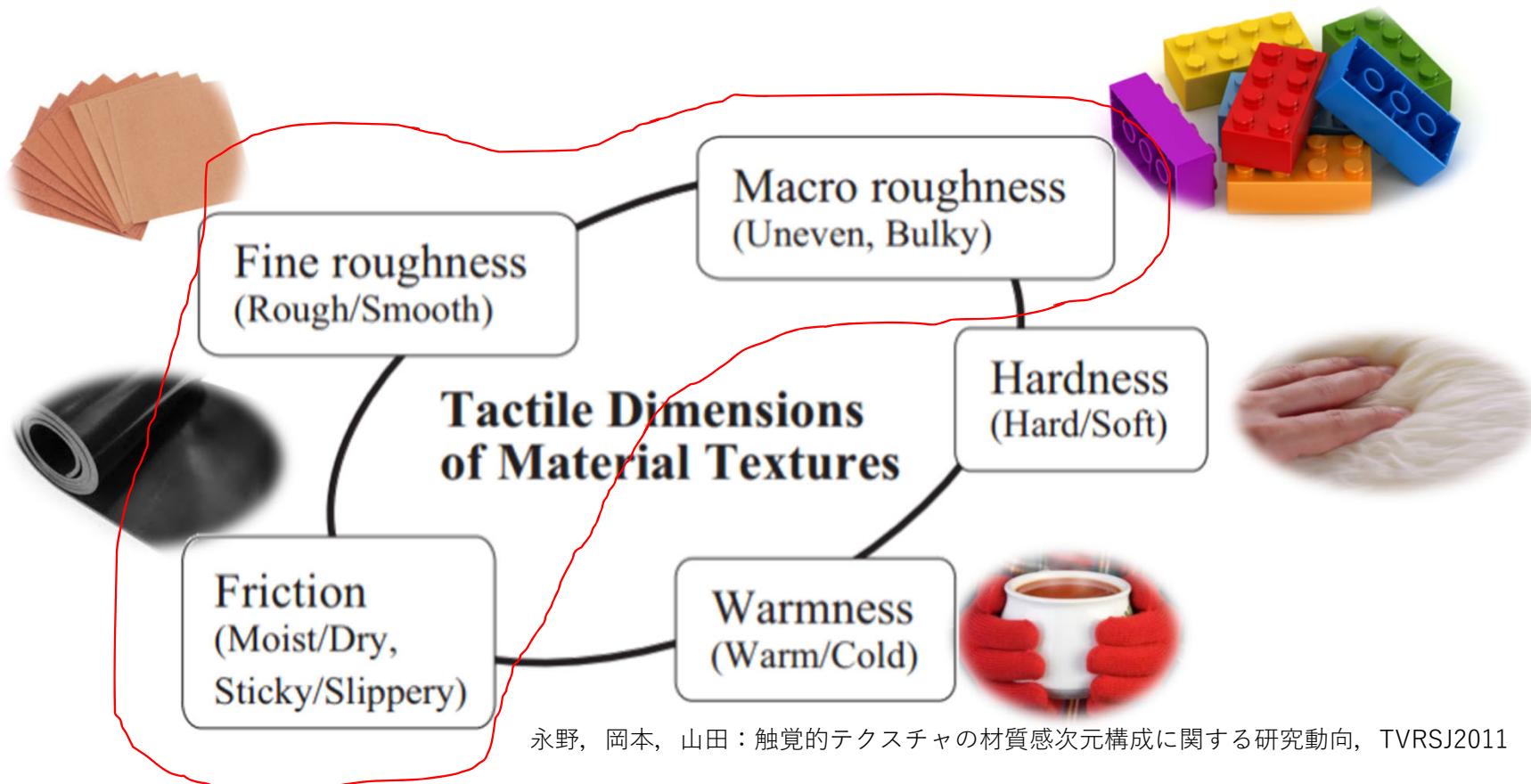


<https://www.youtube.com/watch?v=3l3MDNZk-3I>

Kaczmarek et al., "Polarity Effect in Electrovibration for Tactile Display," IEEE Trans. Biomedical Engineering,, 2006.

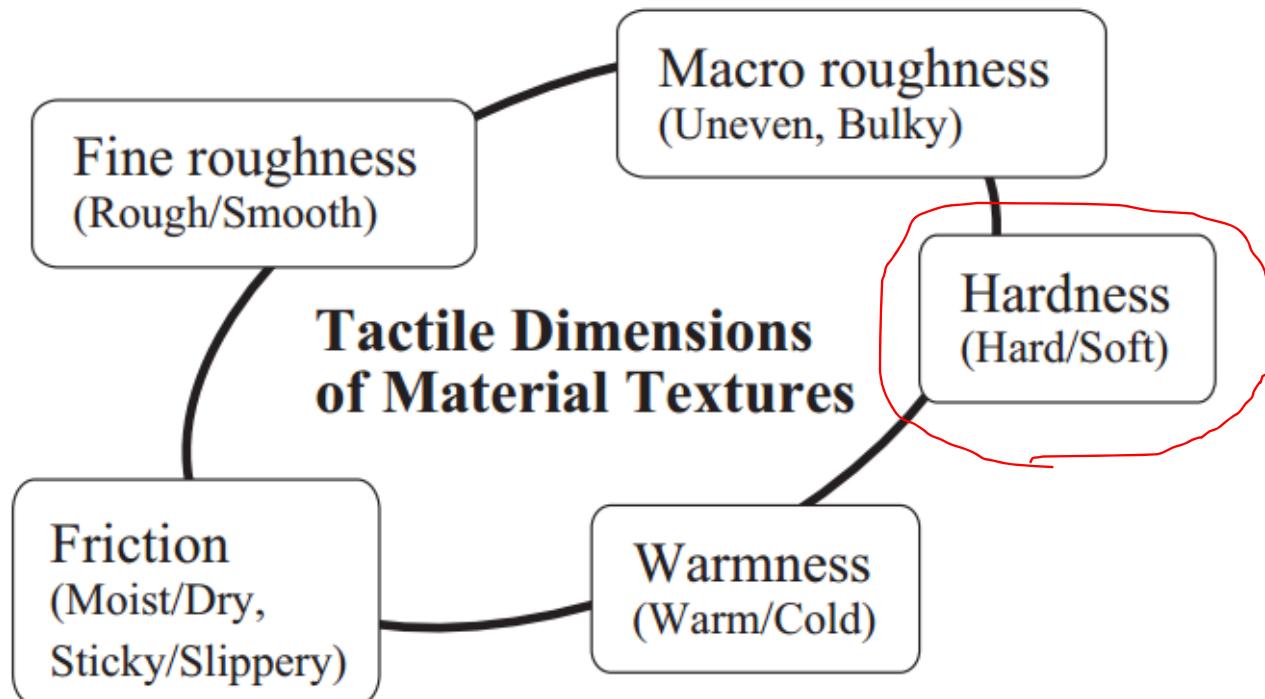
Olivier Bau et al., "TeslaTouch: Electrovibration for Touch Surfaces," UIST2010

摩擦力提示によって得られた触感領域



形状情報のみならず, 高速応答性をもたせることでStick-Slip感等の表面状態まで提示可能に³³

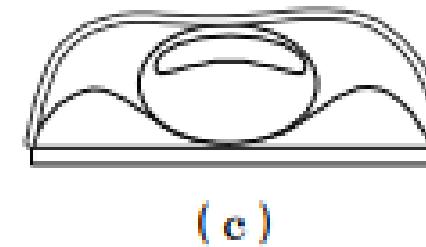
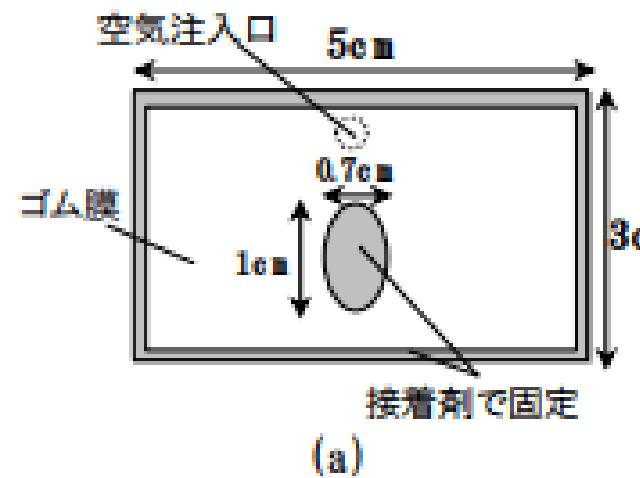
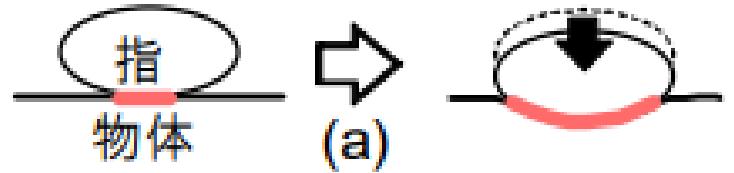
硬さ／柔らかさは皮膚感覚で表現できるか？



永野, 岡本, 山田:触覚的テクスチャの材質感次元構成に関する研究動向, TVRSJ2011

古典的には力覚提示装置でバネ／ダンパの挙動を模擬して表現

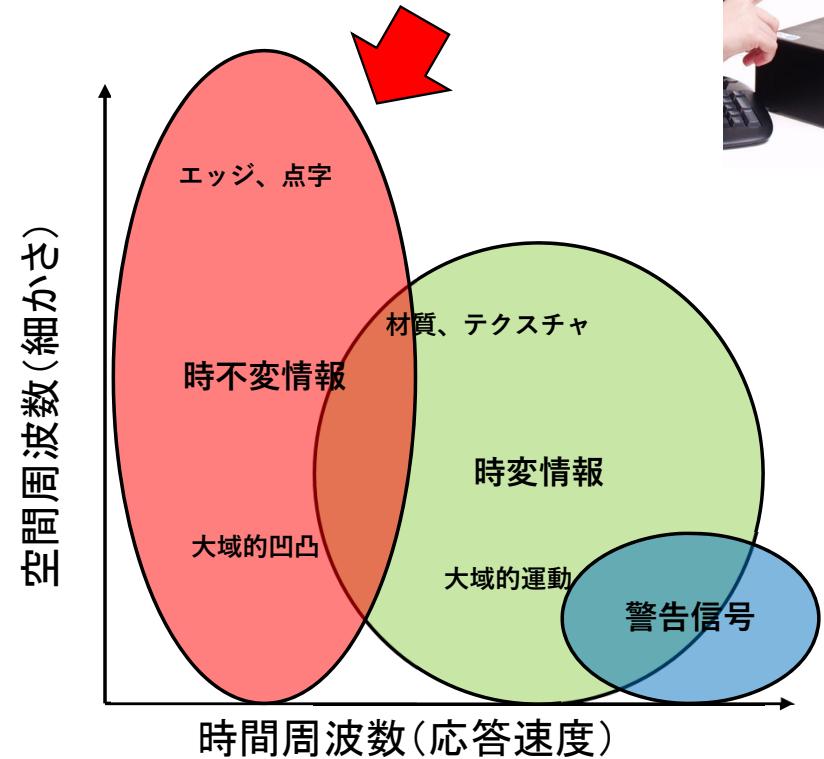
柔らかさの提示



接触面積の変化を再現することで柔らかさを提示できる

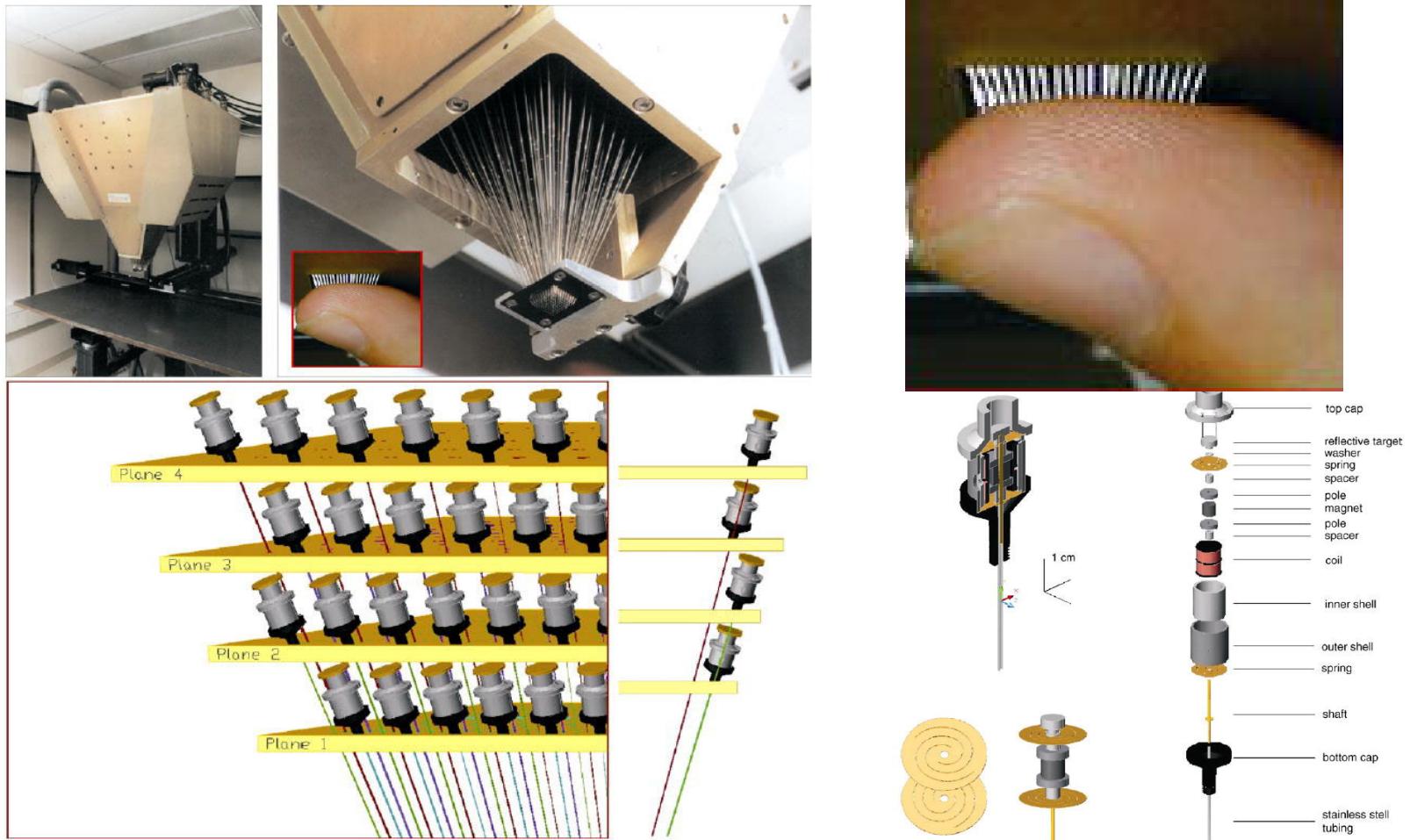
- G. Ambrosi et al.: The role of contact area spread rate in haptic discrimination of softness, ICRA1999
- K. Fujita et al.: A new softness display interface by dynamic fingertip contact area control. SCI2001.
- M. Bianchi et al.: A new fabric-based softness display, Haptics Symposium2010

「形」をより細かく提示する



- ここまで話：ことごとく、「指全体」に対して触感を提示するもの。
- (意地悪に言うなら) 高性能な力覚提示装置 (PHANToM) で出せる感覚を, wearable化, portable化した, と見ることもできる。
- 遠隔操縦を人が操るレベルで行うには、皮膚中の空間的な分布が提示できる必要

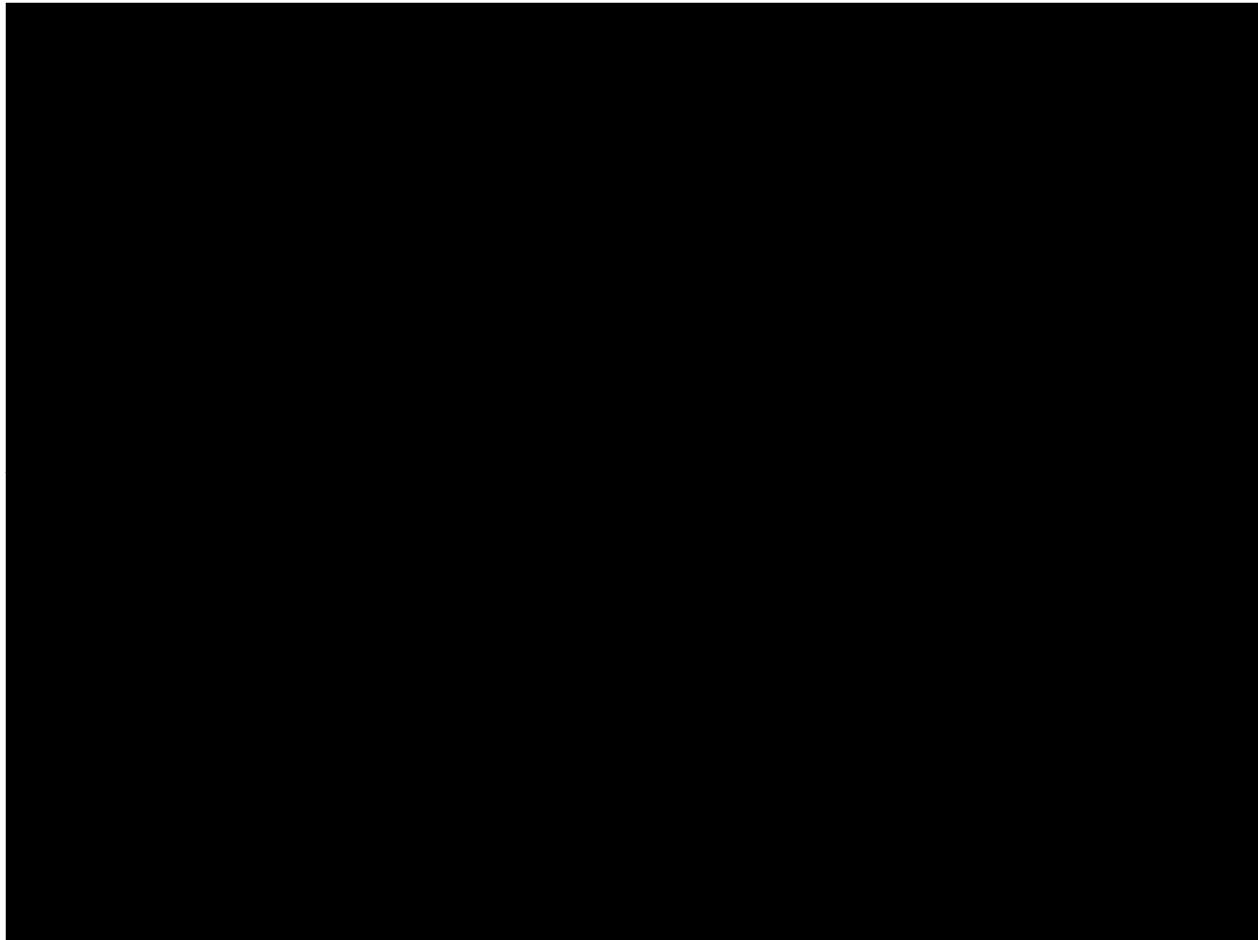
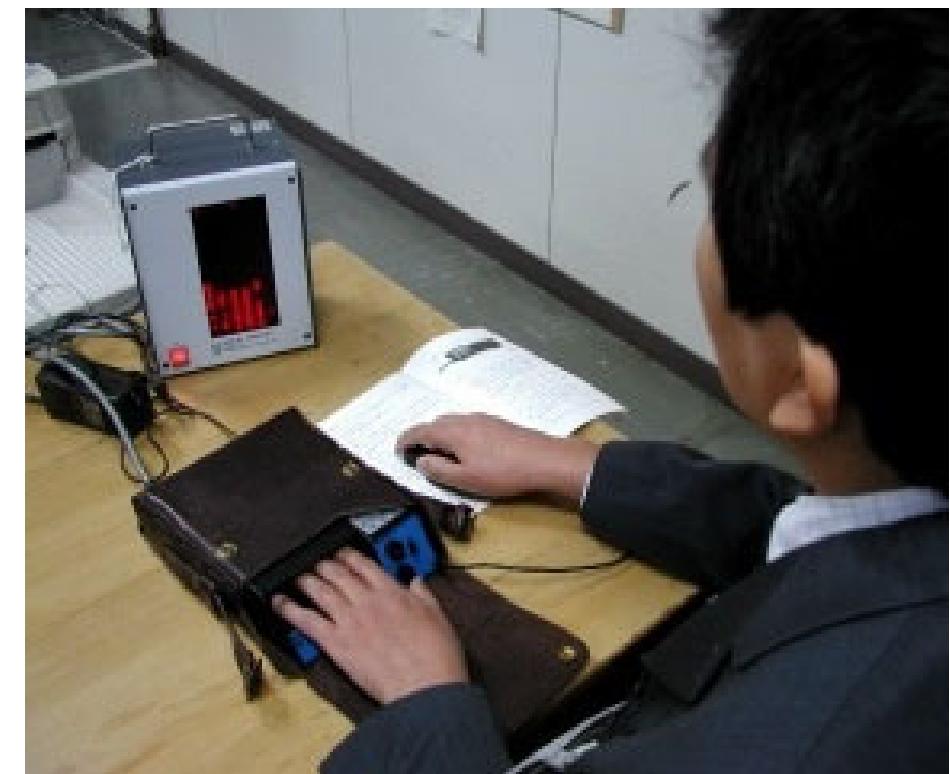
高解像度触覚ディスプレイ



[J.H. Killebrew et al., "A Dense Array Stimulator to Generate Arbitrary Spatio-Temporal Tactile Stimuli," *J. Neuroscience Methods*, vol. 161, pp. 62-74, 2007.](#)

400ピン、特製のリニアアクチュエータ、DC~300Hz、0.5mm 間隔

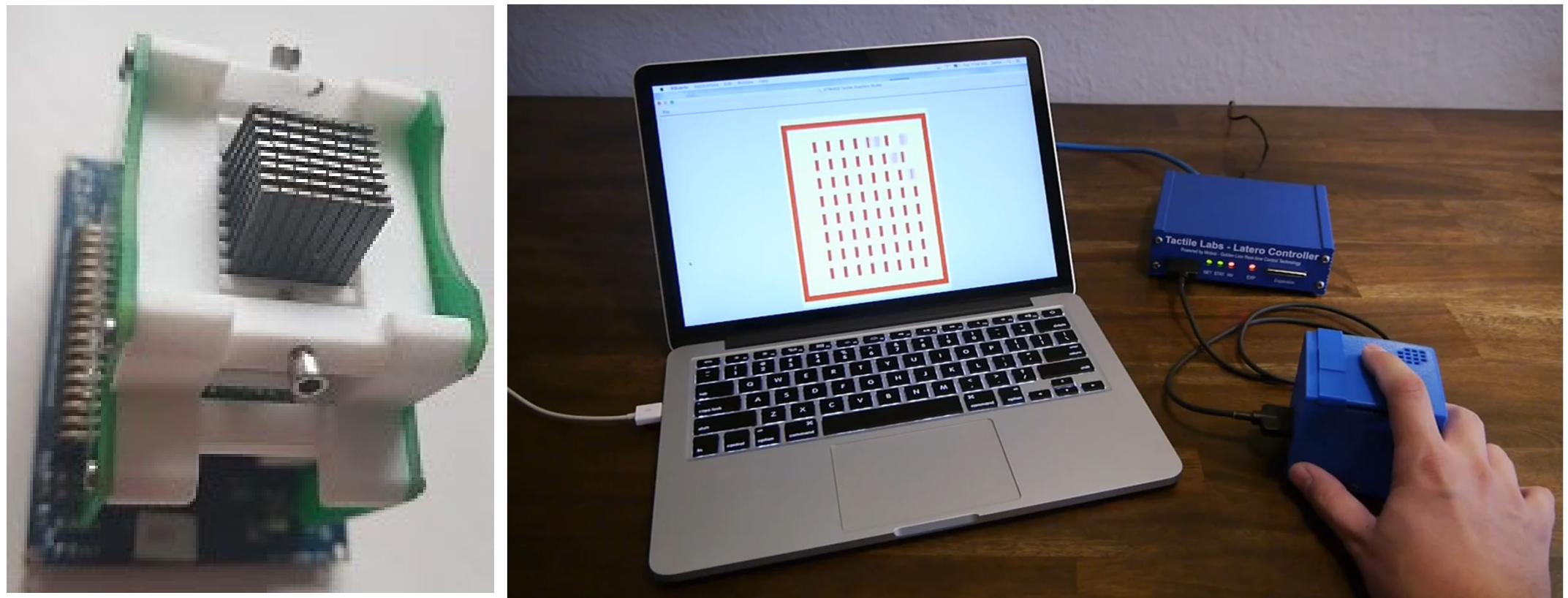
オプタコン: 視触覚変換装置



Braille Display (Optacon), Linville 1976

<https://www.youtube.com/watch?v=ghsXhqu8FCY>

Latero : 入手可能な高分解能, 広帯域触覚ディスプレイ

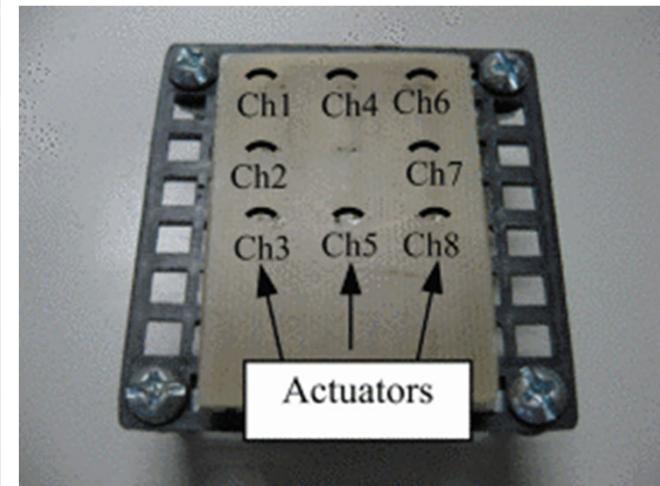
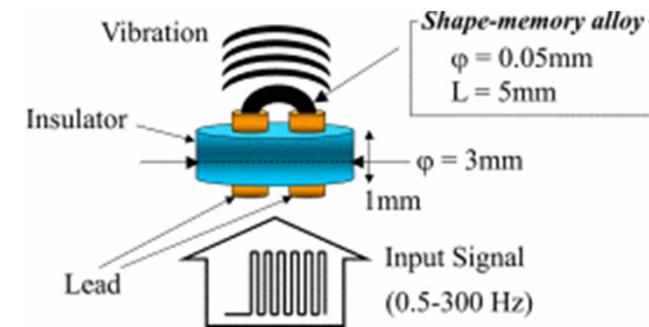
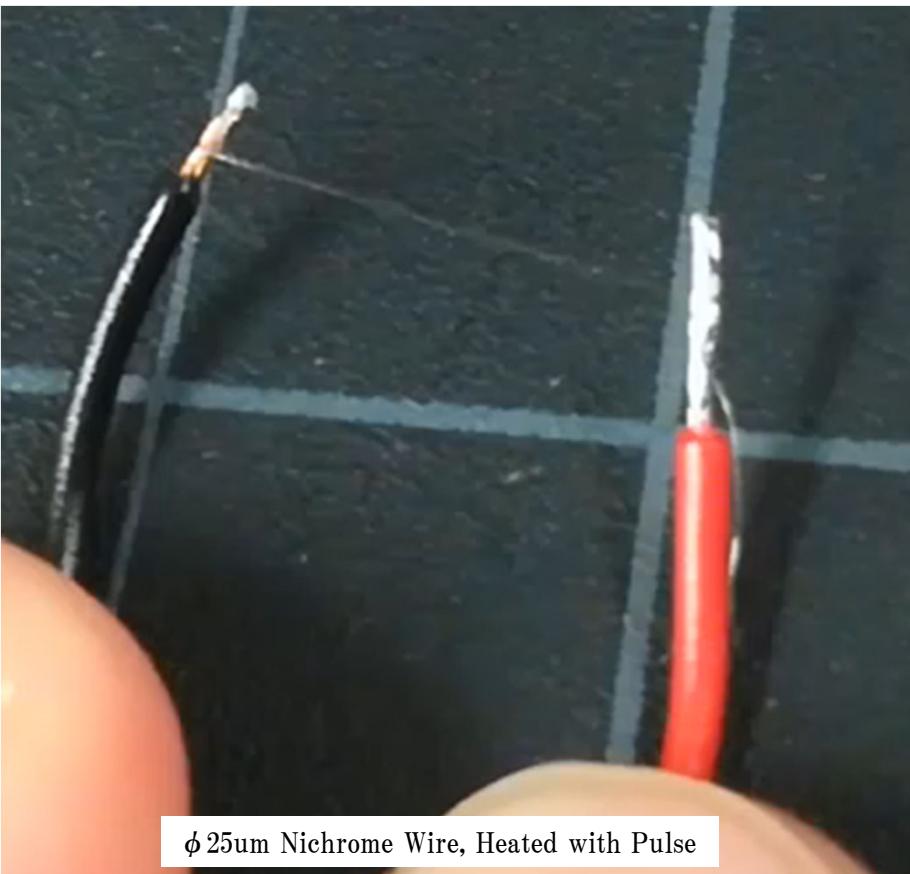


<https://www.youtube.com/watch?v=AVsD1Gy0sHg>

- 皮膚の水平駆動の重要性に着目して作成されたもの。
- 結果としてシンプルなピエゾアクチュエータの配置が可能となり, 高密度化も可能に.

Hayward,"Tactile display device using distributed lateral skin stretch," ASME, DSC, 2000. ³⁹

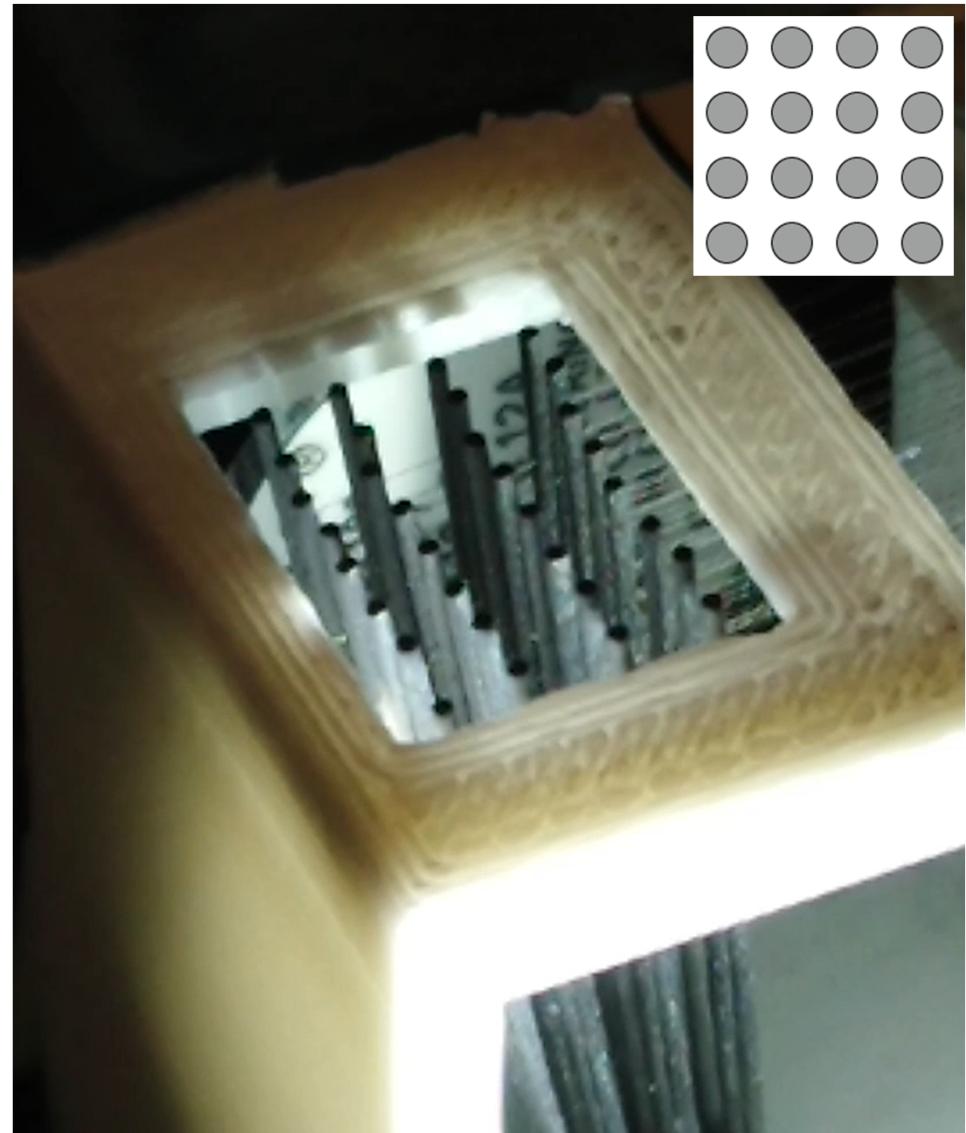
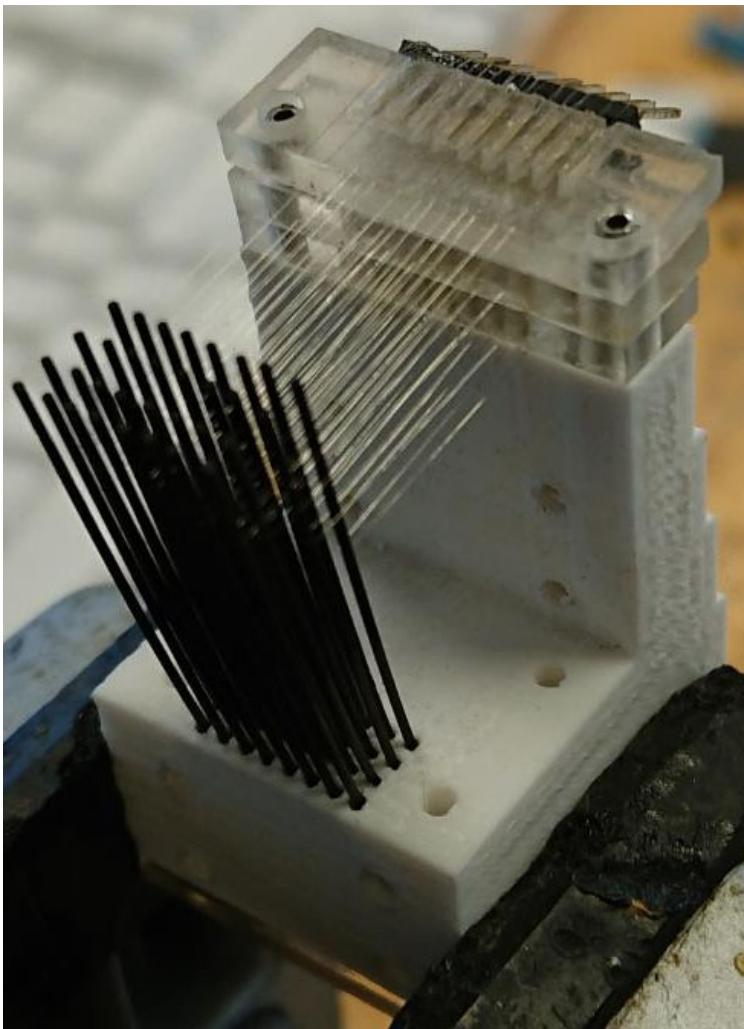
Simple Actuation by Heating Wire



Fukuyama (2009) Tactile display using the vibration of SMA wires and the evaluation of perceived sensations

- Very thin Nichrome wire can be elongated by heating. Can also quickly shrink.
- Similar phenomenon observed by SMA wire, but not necessarily SMA.
- Heating phenomenon = Smaller the quicker. Good for small tactile display

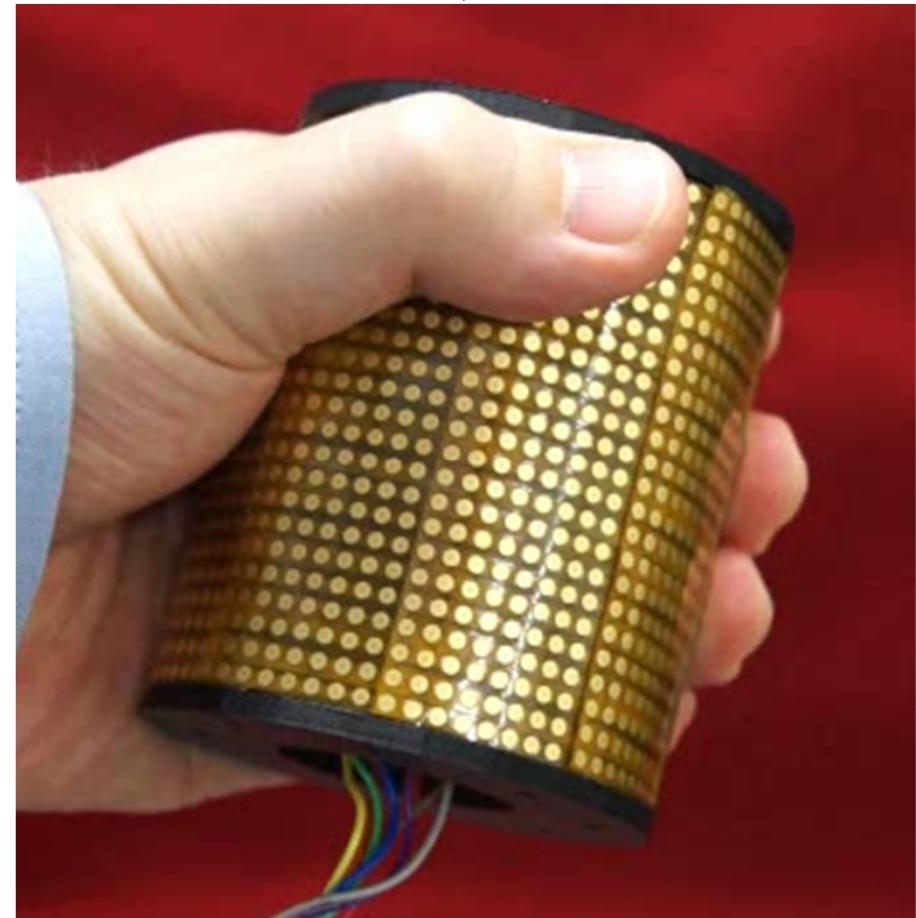
2D Matrix



8 by 4, 1.2mm interval. Up to 320 Hz vibration.

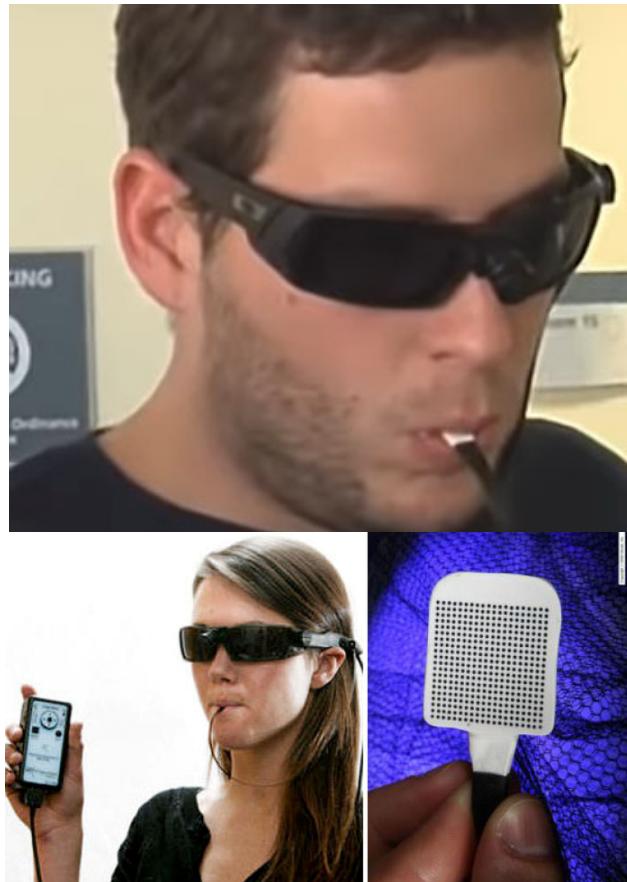
Hiroyuki Kajimoto, Lynette Jones: Wearable Tactile Display Based on Thermal Expansion of Nichrome Wire, IEEE Transaction on Haptics, pp.257-268, 2019. 41

電気刺激：高時空間分解能，省スペース，低コスト



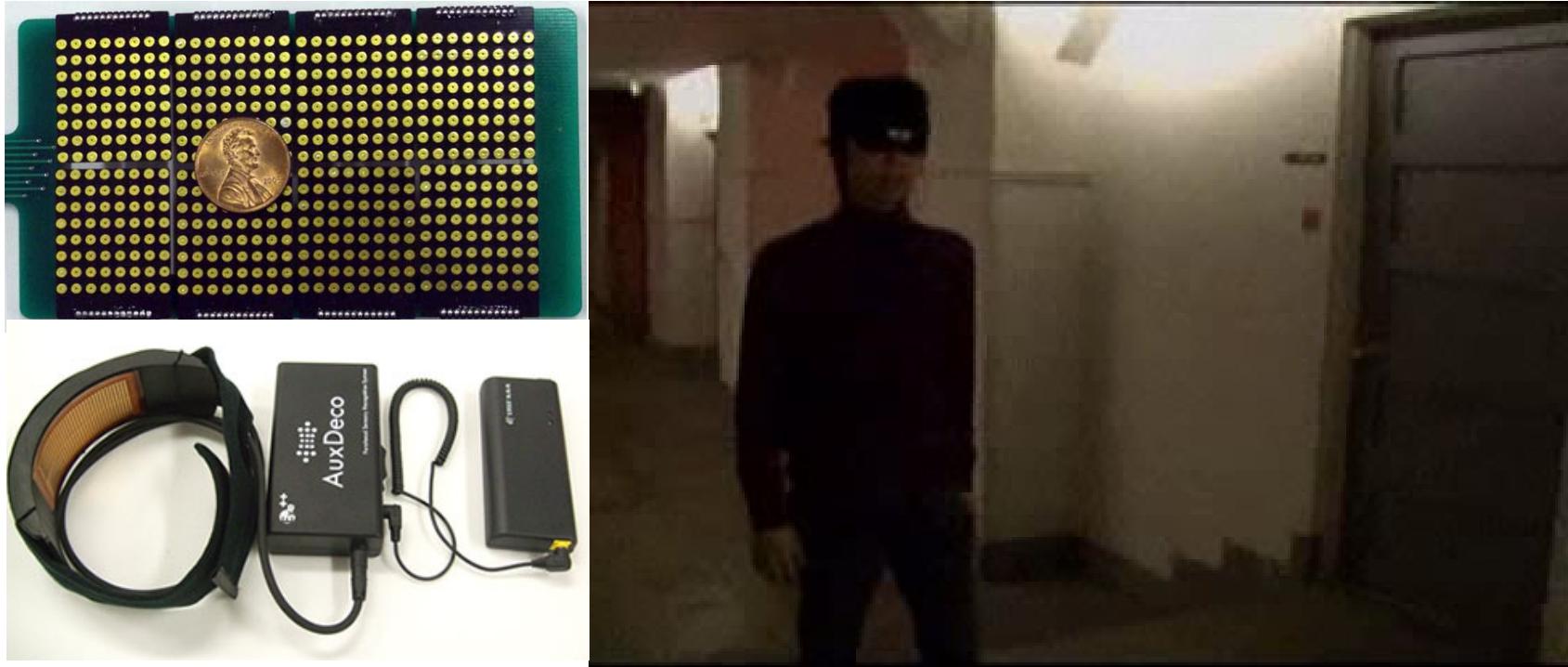
- でも電気といえばビリビリ。
- その理由は物理的相互作用による計算プロセスを飛ばしているため。
- 逆に言えば、電気刺激を自然な触感とするためには、物理的な相互作用をすべて理解、モデル化している必要があり、研究課題として魅力的。

BrainPort: Tongue display for the blind



<https://www.youtube.com/watch?v=CNR2gLKn0g>

額電氣刺激



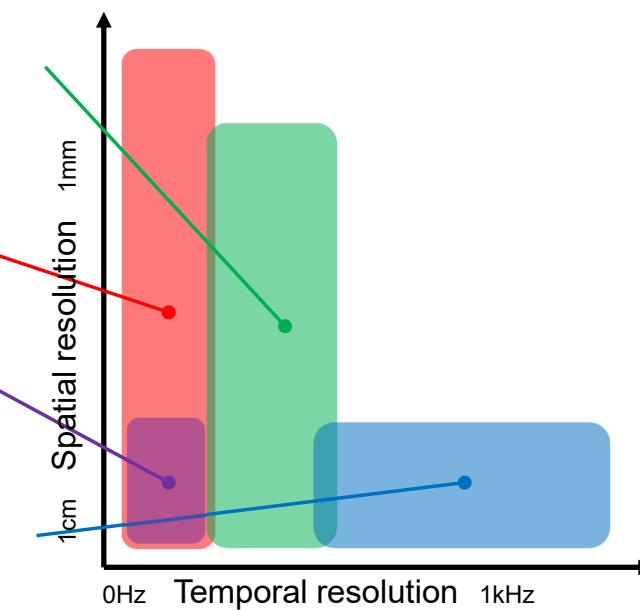
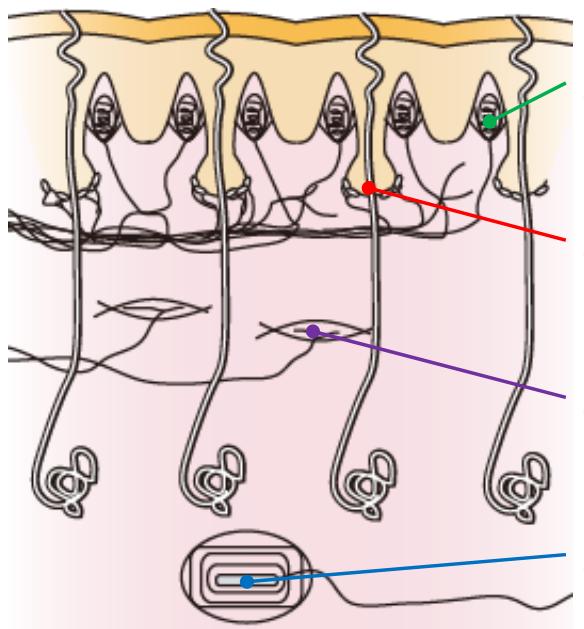
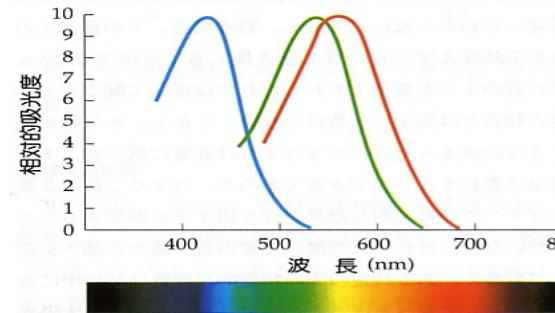
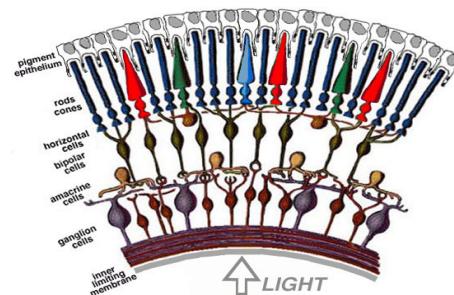
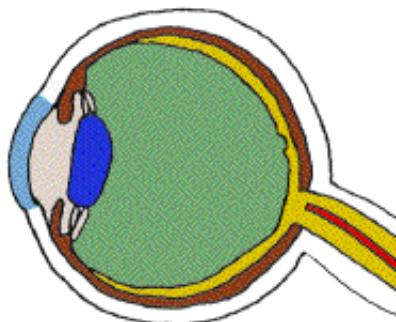
Tactile-vision substitution system (TVSS) for visually handicapped.
Forehead was used for intuitive understanding
(what you are facing is what you are feeling on your face).

Kajimoto et al., "Forehead Electro-tactile Display for Vision Substitution," EuroHaptics 2006

低成本感覚代行 : HamsaTouch

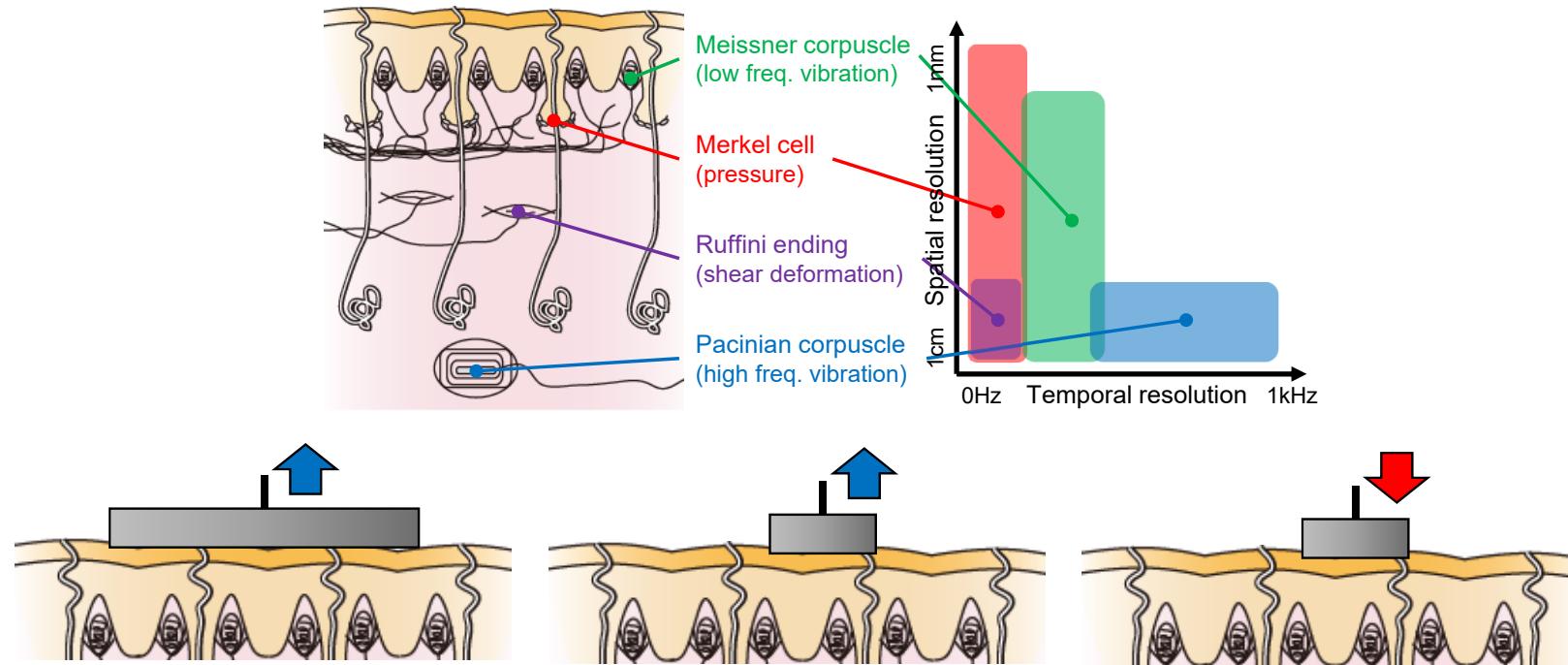


「ビリビリ」を超えた電気触覚：触原色アプローチ



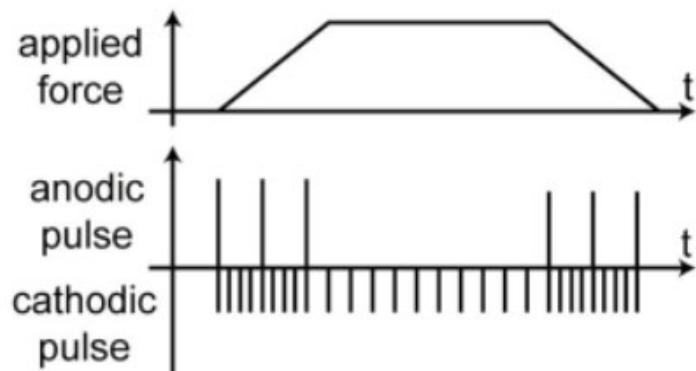
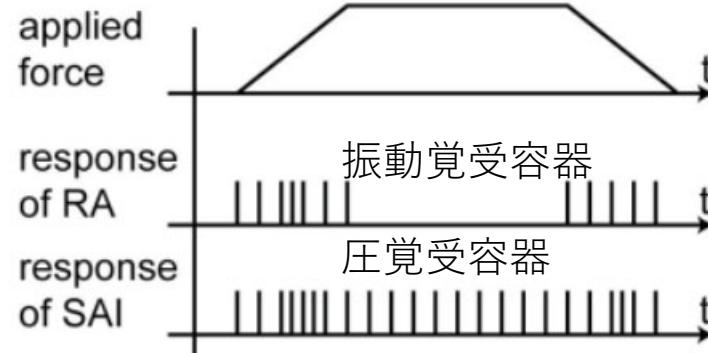
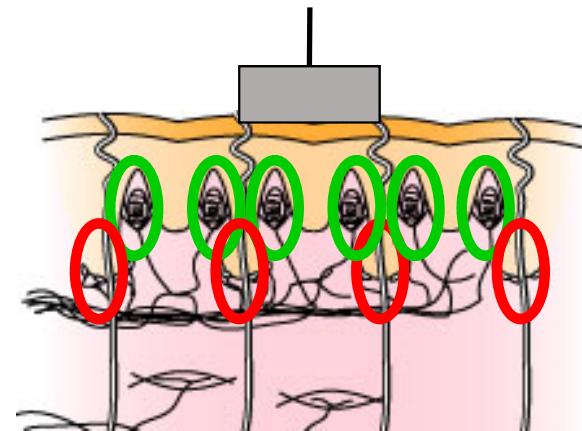
In vision, primary colors (RGB) are related to receptors' characteristics.
If we selectively stimulate each type of receptors, we can use them as primary colors.

電気刺激は、その極性（陽極、陰極）を替えることで、
浅部受容器を（ある程度）選択刺激できる



- **Large** electrode can stimulate deeper nerves → Vibration sensation
 - Small electrode with **cathode** can stimulate Merkel → Pressure sensation
 - Small electrode with **anode** can stimulate Meissner → Texture sensation
- Kajimoto et al: Tactile Feeling Display using Functional Electrical Stimulation, ICAT'99
• V. Yem et al: Comparative Evaluation of Tactile Sensation by Electrical and Mechanical Stimulation. IEEE Trans. Haptics 2017.

原色の組み合わせによる感覚合成



陽極刺激による振動覚受容器への刺激

陰極刺激による圧覚受容器への刺激

刺激モードの組み合わせにより自然な触覚を合成

現実的アプローチ：実物を使う（遭遇型）

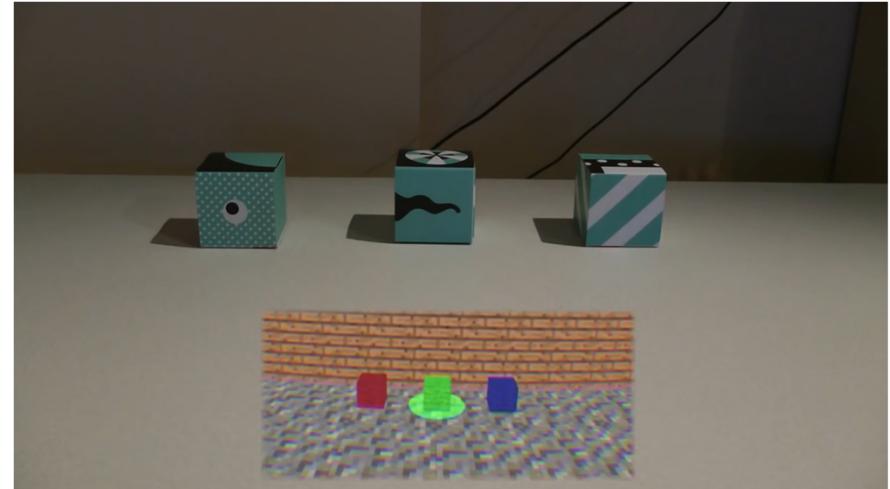


(CHI2018) Haptic Revolver: Touch, Shear, Texture, and Shape Rendering on a Reconfigurable Virtual Reality Controller. Eric Whitmire Hrvoje Benko Christian Holz Eyal Ofek Mike Sinclair

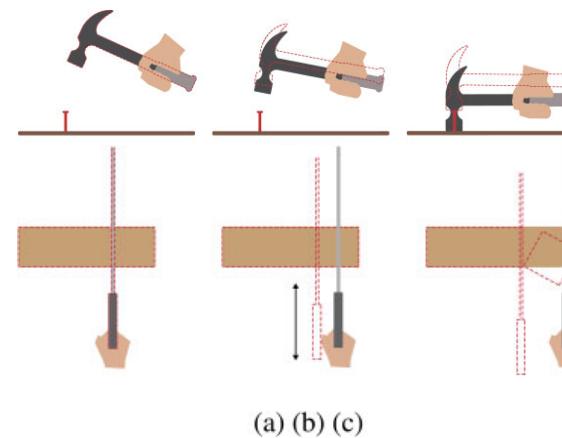
<https://www.youtube.com/watch?v=kp01cDULqpl>



<https://www.youtube.com/watch?v=KOeQoFfZXLQ>

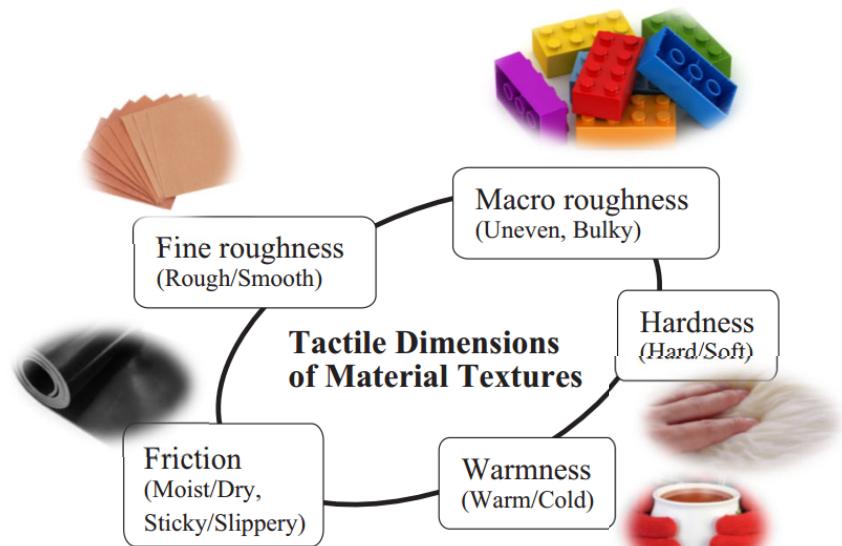


https://www.youtube.com/watch?v=v-5u0z4zA_8



(CHI2020) Knock on Wood: Combining Redirected Touching and Physical Props for Tool-Based Interaction in Virtual Reality, Patrick L. Strandholt;Oana A. Dogaru;Niels C. Nilsson;Rolf Nordahl;Stefania Serafin

この時間のまとめ：触感提示の現状



永野, 岡本, 山田:触覚的テクスチャの材質感次元構成に関する研究動向, TVRSJ2011



何らかの質感を生起させる触覚 = 触感。おそらくVR触覚の次の目標。

触感の各要素を生成する手法は出揃いつつあるように見える

- 高忠実振動→Fine roughness
- 摩擦力, 摩擦振動→Macro roughness, Friction
- 接触面積提示→Softness, Stickiness
- 今日は話しませんでしたが温度感覚提示も様々

提案手法の多くは指全体に一つの触感が提示されることを前提としており、分布触覚提示にはさらなるブレークスルーが必要。

応用が明確な場合は実物を使う手も