

インタラクティブシステム特論 | (6)

梶本裕之
人間コミュニケーション学科
kajimoto@hc.uec.ac.jp
http://kaji-lab.jp

日程

- 6/ 3 講義: 触覚
発表論文振り分け(週末)
- 6/10 講義: 力覚
- 6/17 講義: その他の感覚
- 6/24 発表
- 7/ 1 発表
- 7/ 8 発表
- 7/15 発表
- 7/22 予備日

インタラクティブ技術特論

視覚, 聴覚から触覚へ

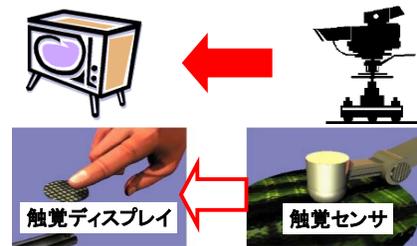
「さわった感覚」を取得・提示する触覚センサ・触覚ディスプレイは、おそらく視覚, 聴覚に次ぐ**市場的可能性・社会的要請**がある。

しかし現状の市販センサ・ディスプレイは理想には程遠く、開発が急務。

ここ10年の研究の発展は目覚しく、まさに「今が旬」の分野である。

インタラクティブシステム特論

触覚センサと触覚ディスプレイ



触覚情報通信のためには、**触覚ディスプレイ**と**触覚センサ**が必要。

インタラクティブシステム特論

触覚ディスプレイの用途

現状 福祉用途

- 点字ディスプレイ
- 小型カメラを用いた
視覚⇒触覚変換(Optacon)



ユーザインタフェース

- ゲーム機, 携帯電話: 振動



今後 リアルな皮膚感覚の実現

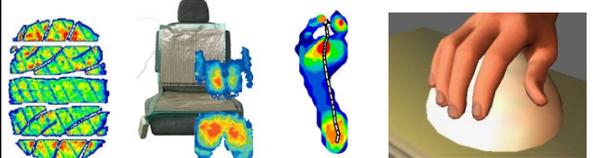
遠隔コミュニケーション / 遠隔操作 / ゲーム

インタラクティブシステム特論

触覚センサの用途

現状 計測・解析用途 (例) タイヤパターン設計, 人間工学

- ユーザインタフェース



今後 ロボットの皮膚

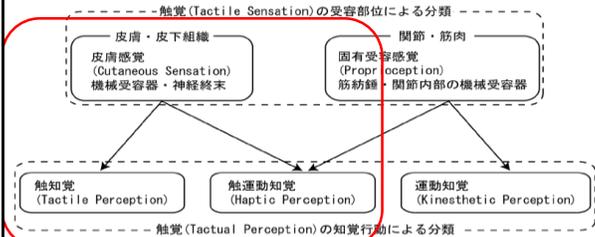
- 触覚ディスプレイのための触覚センサ



インタラクティブシステム特論

触覚・体性感覚・皮膚感覚

- 「触覚」の定義はあいまい
- ・皮膚感覚(最狭義)
 - ・他の4つの感覚に分類されない感覚の総称(最広義)



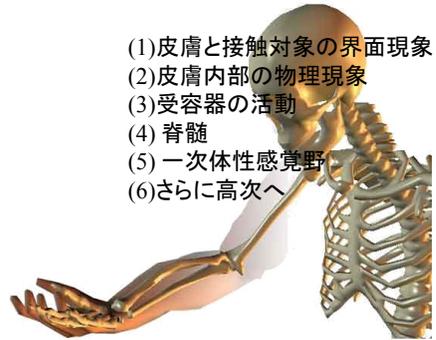
以下の話では触覚=皮膚感覚. 来週は後半

インタラクティブシステム特論

触覚の伝達経路

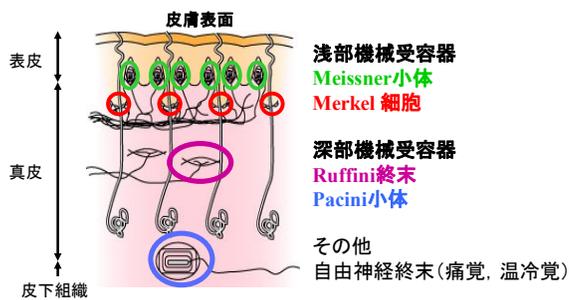


- (1)皮膚と接触対象の界面現象
- (2)皮膚内部の物理現象
- (3)受容器の活動
- (4)脊髄
- (5)一次体性感覚野
- (6)さらに高次へ



インタラクティブシステム特論

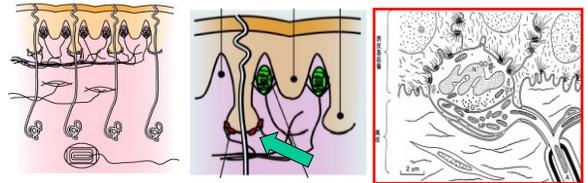
皮膚構造と受容器(無毛部)



※機械受容器(Mechanoreceptor): 皮膚の機械的変形に反応

インタラクティブシステム特論

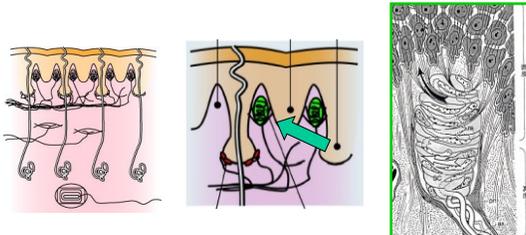
Merkel細胞



- ・皮膚下0.9mmに密に存在.
- ・唯一の細胞性受容器. 神経とシナプス接合
- ・静的な歪に反応
- ・発火頻度は歪の大きさに比例
- ・単独の活動では純粋な圧覚を生成

インタラクティブシステム特論

Meissner小体

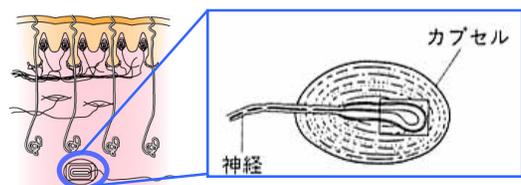


- ・皮膚下0.7mmに密に存在.
- ・低周波振動(15-100Hz)に反応(共振30Hz)
- ・発火周波数~振動周波数
- ・単独の活動では振動感覚, パタパタ感を生じる

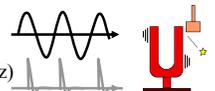


インタラクティブシステム特論

Pacini小体



- ・皮膚下2mm以上の深部にまばらに存在.
- ・高周波振動に反応(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



インタラクティブシステム特論

Ruffini終末

- 皮膚下2mm以上の深部に疎らに存在
- 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**

インタラクティブシステム特論

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

インタラクティブシステム特論

空間的役割分担

- Merkel: 細かいパターン
- Meissner: 皮膚上の動き
- Pacini: 指全体の動き

インタラクティブシステム特論

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

インタラクティブシステム特論

皮膚構造と受容器

- 表皮: 硬い
- 真皮: 柔らかい
- MerkelとMeissnerは境界に存在

Merkel部への歪エネルギー集中 Meissner部の変位(開閉)

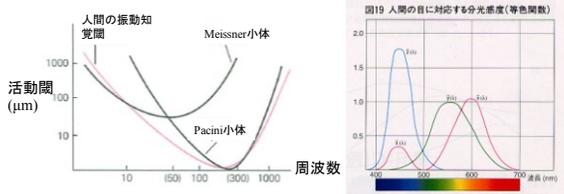
Gregory J. Gerling, "Fingerprint lines may not directly affect SA-I mechanoreceptor response," Somatosensory and Motor Research 2008.

形状は主にMerkelによってコーディングされる

Merkelの活動: A B C D E

Meissnerの活動: A B C D E

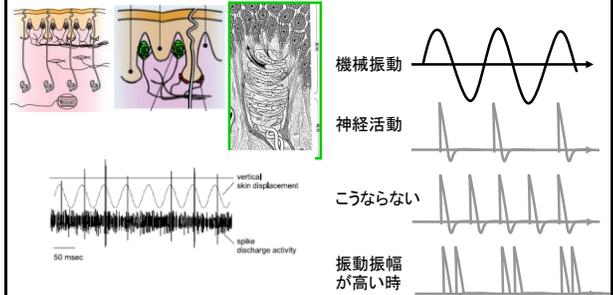
周波数は受容器の活動比率でコーディングされる



- 低い周波数: Meissner小体のみ活動. 「カウント」可能
- 中間の周波数: 活動比率で把握可能
- 高い周波数: Pacini小体のみ活動

(色の場合: 巧妙な仕掛けで受容器の活動比率によるスペクトル同定を容易に)
 •触覚の場合, 非常に高い周波数をどのように区別しているのか不明. (していないかもしれない)

Meissnerに少しこだわる(研究現場では何が議論されているか)



- Meissner神経活動の「謎」
なぜ1周期に1回だけ活動するのか

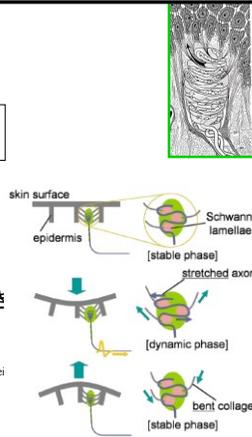
Meissnerに少しこだわる

- Meissner神経活動の「謎」
なぜ1周期に1回だけ活動するのか

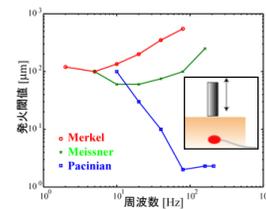
•目的としては
感覚の質を不変にするため?

•構造としては
Meissner小体の神経軸索が「伸びたとき活動」することで実現?

Kuroki et al., "Proposal of the Stretch Detection Hypothesis of the Meissner Corpuscle", EuroHaptics2008



時間的役割分担: 別の視点から



(定説) Meissner小体とPacini小体には「共振特性」がある。
 (疑問)「なぜ」共振特性があるのか?

縦軸が「閾値(μm)」であることに注目。
 つまり「変位」でみている。

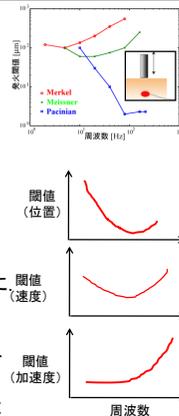
変位, 速度, 加速度

縦軸が「閾値(μm)」である
 =「変位」でみている。

周波数を乗算することによって,
 変位⇒速度⇒加速度へと変換してみると...

Meissner小体:
 縦軸に速度をとると低域通過フィルタに。
 Pacini小体:
 縦軸に加速度(≒力)をとると低域通過フィルタに。

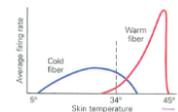
つまり,
 ●Meissner, Paciniは皮膚の「速度」, 「加速度」を測定するセンサであり,
 ●「変位」を軸に取った時に現れる「共振特性」は必ずしも受容器の本質を表していない。



その他の触覚

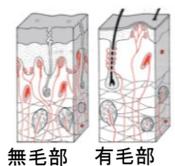
皮膚表面付近の自由神経終末(C繊維)

- 温度感覚: 冷繊維と温繊維
- 痛覚: 鋭い痛みと鈍痛は異なる神経が担当
- 機械的変形へ応答する受容器



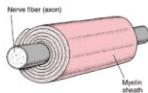
有毛部

- 毛包受容器
- 毛の根元を取り巻き, 毛が曲がる時のみ活動(速度検出)
- ただしこれに代わり, Meissner小体は無い。

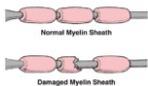


C繊維とは？

受容器につながる多くの神経: Aβ, Aγ繊維
 高速に情報を伝えるMyelinatedな神経線維

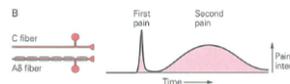


C繊維: Unmyelinatedな神経線維, 伝達速度が遅い.



温度感覚: C繊維

痛覚: Aγ繊維とC繊維 (緊急の痛みと鈍痛の違い)



無毛部のMeissner小体に入り込む繊維: 数本C繊維が存在.
 有毛部にも機械的変形にตอบสนองするC繊維が存在.

- fMRIによる反応を見ると, 快感を司る脳の部分が活動
 →愛情や友情によるスキンシップを取っている?

(参考) 神経活動計測



マイクロニューログラム法:

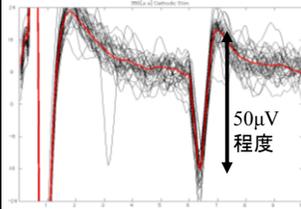
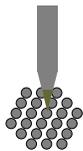
タングステン電極を手首正中神経に刺し, 神経活動を直接計測

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

インタラクティブシステム特論

実験手続:

- (0)超音波断層装置で下腕正中神経束の位置を確認
- (1)直径100μmのタングステン電極を刺入
- (2)神経活動音により受容器の位置, 種類を同定.
- (3)受容野中心に刺激装置を当て, 刺激時の神経活動を計測.



インタラクティブシステム特論

指先から脳へ

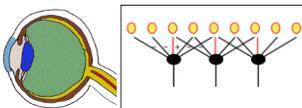
大脳皮質

視床

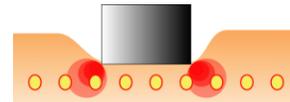
脊髄

皮膚

視覚: 網膜上の神経回路で
 局所的なエッジ検出演算



触覚: 大脳皮質へ至るまでに
 神経回路による演算は見られない
 代わりに皮膚の物理現象を用いた演算



文献[3]より

インタラクティブシステム特論

テレビとしての触覚ディスプレイ

福祉機器としての触覚ディスプレイ=記号伝達.



テレビとしての触覚ディスプレイ=
 「現実の何かを触っているかのように思い込ませる仕掛け」

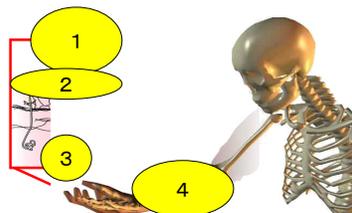


思い込む主体は?... 脳?... ならば脳を騙せれば充分.

触覚提示戦略=外界から脳へ到るどのレイヤに介入するか

インタラクティブシステム特論

騙すレイヤ



- (1) 外の環境を再現 (形状提示)
- (2) 皮膚との界面現象を再現
- (3) 受容器の活動を再現
- (4) 神経活動を再現

インタラクティブシステム特論

(1/4)環境を再現

ピンマトリクス of 上下変位により形状再現

3次元型
触覚ディスプレイ

FEELEX

PopUp

研究の中心課題: いかにより
大面積 / 高解像度 / 大ストローク / 高速の提示を
安価に行うか (掌 / 5mm / 30mm / 数十Hz)
設計ポイント: 何を諦めるか (用途)

・3次元型触覚ディスプレイ: <http://www.tsukuba-tech.ac.jp/in/fo/kenkyu/kaken/>
 ・FEELEX: http://ntron.kz.tsukuba.ac.jp/~vrlab_web/feelix/feelix_j.html
 ・PopUp: <http://www.start.tu-tokyo.ac.jp/~vrlab/fo/kenkyu/kaken/fo/>

体積再現形触覚ディスプレイ

インタラクティブシステム特論

Xmen,2000

X-men,2000

技術課題: アクチュエータ

- 高密度化可能
- 高速
- 大きなストローク

インタラクティブシステム特論

例1 従来の駆動方式をなんとか密にならべたもの

- 高密度化可能
- 高速
- 大きなストローク

(Bio Helix, トキ・コーポレーション), インタラクティブシステム特論

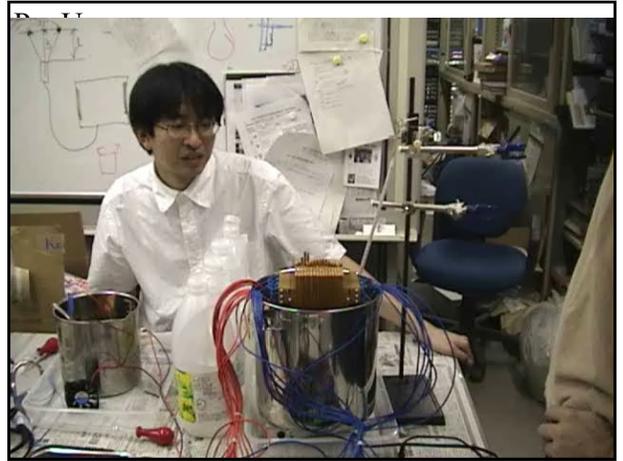
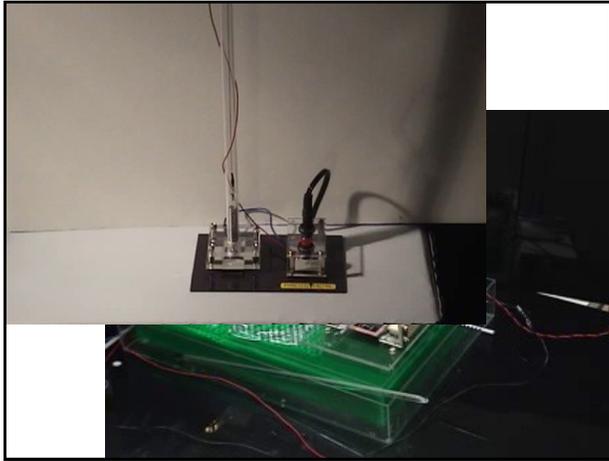
例2 形状記憶合金を使ったもの

- 高密度化可能
- 高速
- 大きなストローク

コイルタイプのSMA (Shape Memory Alloy : 形状記憶合金) 使用

- Diameter 0.2-0.85mm
- 40~60 gw
- stroke / original length = 1.0
- Around 1Hz (cooled with oil)

(Bio Helix, トキ・コーポレーション), インタラクティブシステム特論



アクチュエータは要らない? : SandScape

プロジェクタ
ホットミラー
赤外カメラ
砂場(ビーズ)
赤外光源

ラクティブシステム特論

騙すレイヤ(再)

- (1) 外の環境を再現(形状提示)
- (2) **皮膚との界面現象を再現**
- (3) 受容器の活動を再現
- (4) 神経活動を再現

インタラクティブシステム特論

(2/4) 界面現象を再現

皮膚変形を再現。現在最も一般的な触覚ディスプレイ環境再現型と異なり、多くが**装着**を前提

点図セル http://www.kgs-jpn.co.jp/b_gs.html

市販の点字ユニットの利用/改造多

研究の中心課題:
いかに**高解像度** / **高速**の提示を行うか
= **アクチュエータの選定**

インタラクティブシステム特論

(参考) 超音波による音響放射圧ディスプレイ

超音波発振子
音響レンズ
指

音響放射圧型:
水中の収束超音波により皮膚上の圧力分布を再現
Iwamoto "Focused ultrasound for tactile feeling display." In Proc. of ICAT2001.

インタラクティブシステム特論

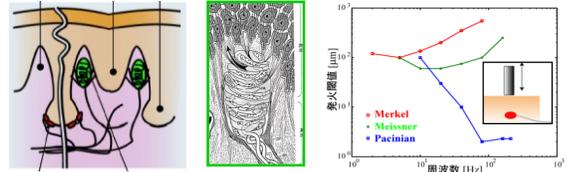
上下変位とは限らない

出発点: 触覚ディスプレイ研究者の共通疑問
「なぜ現行の触覚ディスプレイでザラザラ感が出せないのか？」

皮膚一対象間のすべりが触覚の本質ではないか？

インタラクティブシステム特論

上下変位とは限らない



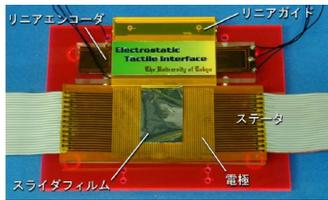
最近: ザラザラに最も関係深いと思われるMeissner小体が、皮膚の水平運動に最適化されていることが示唆。

奈良「触覚情報処理の理論およびその触覚ディスプレイへの応用」東京大学博士論文, 2000.

インタラクティブシステム特論

水平運動 (1) Active (能動)

Active: 「指を水平に駆動する」という考えに基づく



静電アクチュエータによる
皮膚水平方向力の生成

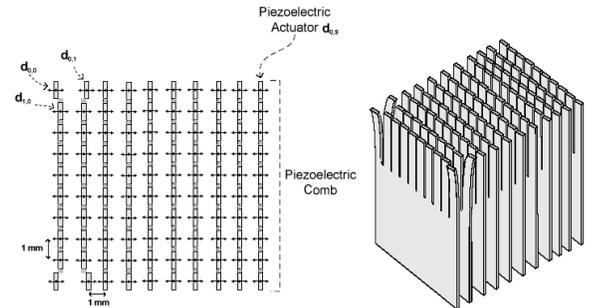
山本「静電気力による摩擦力制御とフィルム移動子を用いた薄型皮膚感覚ディスプレイ」日本VR学会大会 2002.

インタラクティブシステム特論

水平運動 (1) Active (能動)

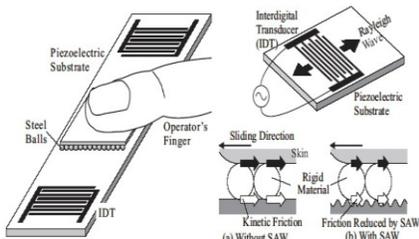
• マイクロマシンによる水平振動

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



水平運動 (2) Passive (受動)

Passive: 「指を動かして初めて分かる」という考えに基づく



超音波振動による摩擦係数の制御

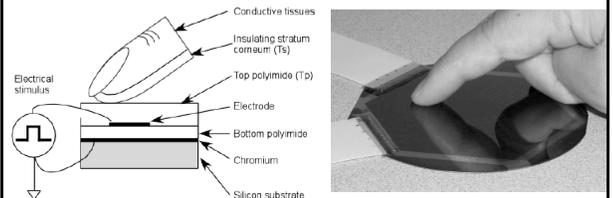
Takasaki, "Standing surface acoustic wave tactile display with frequency control related to rubbing speed," 6th Int. Conf. on Mechatronics Tech., 2002.

インタラクティブシステム特論

水平運動 (2) Passive (受動)

• 高圧電極と皮膚の電氣的吸引利用

Kaczmarek et al., "Polarity Effect in Electro-vibration for Tactile Display," IEEE Trans. Biomedical Engineering, Vol.53, Issue 10, pp.2047-2054, 2006.



騙すレイヤ(再)

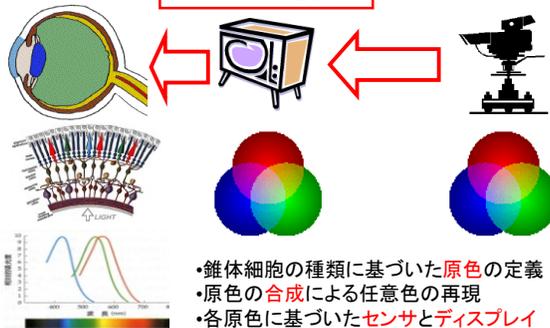


- (1) 外の環境を再現(形状提示)
- (2) 皮膚との界面現象を再現
- (3) **受容器の活動を再現**
- (4) 神経活動を再現

インタラクティブシステム特論

(3/4)受容器活動を再現

視覚の提示原理とは？

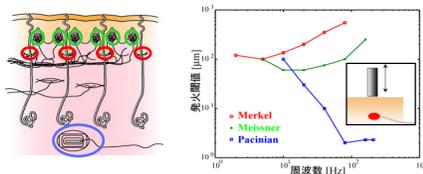


インタラクティブシステム特論

触覚の原色 = 受容器活動の再現

視覚と同様に受容器活動を再現: 二つのステップ

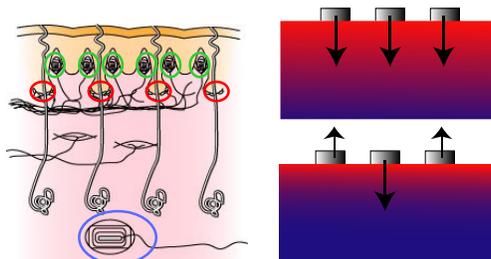
1. 各受容器を**独立**に刺激: 選択刺激
2. 触原色の**合成**による任意触覚の生成



(注) 水平運動導入時もMeissner小体の活動再現を狙った。現在の触覚ディスプレイ研究は「受容器活動の再現」をマイルストーンとする点では共通。

インタラクティブシステム特論

受容器活動再現型ディスプレイ(1)

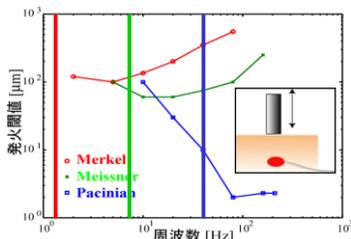


歪到達深度調整による選択刺激
(従来の上下運動に「引っ張り」付与)

Asamura, "A method of selective stimulation to epidermal skin receptors for realistic touch feedback," IEEE VR, 1999.

インタラクティブシステム特論

受容器活動再現型ディスプレイ(2)

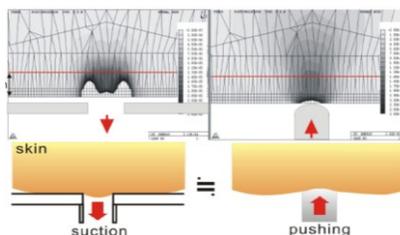


受容器の共振周波数を利用

Konyo, "Tactile feel display for virtual active touch," IEEE Int. Conf. Intelligent Robotics & Systems, 2003.

インタラクティブシステム特論

受容器活動再現型ディスプレイ(3)



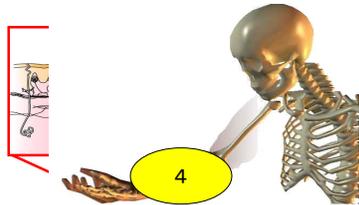
空気吸引による圧覚生成

吸引と押下で、受容器位置に生じる歪エネルギーが同じ→人は区別できない

Makino "A cutaneous feeling display using suction pressure," SICE Annu. Conf., 2003.

インタラクティブシステム特論

騙すレイヤ(再)



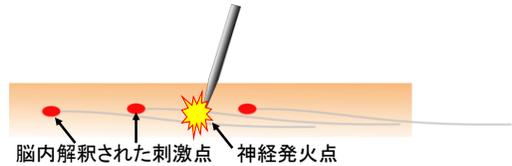
- (1) 外の環境を再現(形状提示)
- (2) 皮膚との界面現象を再現
- (3) 受容器の活動を再現
- (4) **神経活動を再現**

インタラクティブシステム特論

(4/4) 神経活動を再現

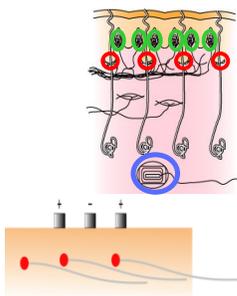
「受容器活動の再現」をマイルストーンとする点は他と共通。
受容器ではなく、繋がった神経を(電気)刺激する

- 利点: エネルギー効率/機械的脆弱性・共振特性から開放
- 課題: 空間的なマッピング・選択刺激の実現



インタラクティブシステム特論

皮膚表面からの電気刺激



神経末端の刺激され易さから空間マッピング実現
各受容器の神経配置の特徴を利用した選択刺激

梶本「皮膚感覚神経を選択的に刺激する電気触覚ディスプレイ」電子情報通信学会誌, 2001.

インタラクティブシステム特論

神経束への電気刺激



- 埋め込み型マトリクス電極.
- 神経再生時に電極を通過,
- 学習による空間マッピング.
- 福祉用途

鈴木「神経再生型電極に関する研究」東京大学博士論文, 1998

インタラクティブシステム特論

アクチュエータと触覚ディスプレイ

触覚ディスプレイの歴史=小型アクチュエータの歴史

必要条件

- 刺激周波数: 受容器の応答可能な周波数 $\approx 800\text{Hz}$
周波数知覚可能な周波数 $\approx 200\text{Hz}$
- 空間解像度: 2点弁別閾 \approx 指先で 2mm 弱
- 振幅(機械上下振動時): 周波数依存, 約 0.1mm

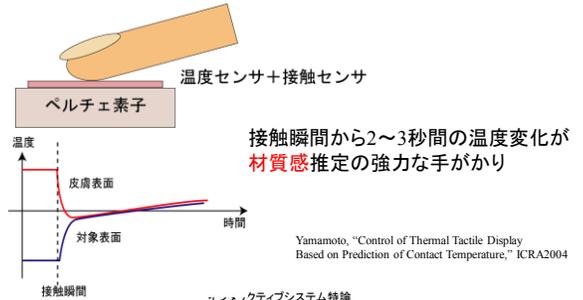
	周波数	解像度	現在の問題点
電磁素子(ソレノイド)	○	△	成熟
電歪素子(ピエゾ)	○	△	振幅やや小 \rightarrow 共振持たせた設計
空気圧	×	○	高速電磁弁無し
形状記憶合金	×	○	時間応答, 熱設計
電気刺激	○	○	「電氣的」感覚, 痛覚の危険
ゲルアクチュエータ	○	△	電導性媒質中のみ
静電アクチュエータ	○	○	水平運動のみ

問題点は現行製品に関するもの。作れば有る。
触覚ディスプレイ研究にはアクチュエータ開発必須

インタラクティブシステム特論

温度感覚ディスプレイ

- 時間・空間解像度が低い情報伝達面で無視されてきた
- VR用触覚ディスプレイには今後必須か
- 現在の研究: 温度の時間変化特性の再現



インタラクティブシステム特論

触覚ディスプレイ:まとめ

触覚ディスプレイは以下の方法で分類可能

1. 介入するレイヤ(外界/皮膚変形/受容器活動/神経活動)
2. 使用アクチュエータ

触覚ディスプレイ研究の方向性

従来 「いかに多くの情報を伝送できるか」 福祉工学の観点



現在 「いかに現実の現象に沿っているか」 テレビの観点
現象: 皮膚変形/受容器活動/神経活動

インタラクティブシステム特論

今後の触覚ディスプレイ

研究開発の王道は2つ

- 新規アクチュエータを用いたもの
⇒コンスタントに続く
- 皮膚物理現象/受容器活動/触覚心理
研究に基づく、ディスプレイの最適設計

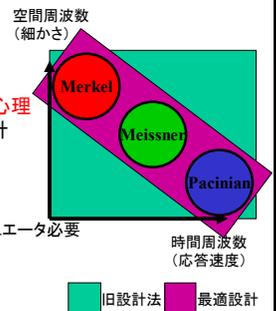
(それほど面白くない例)時空間最適化

触覚の高い性能を全て信じる

⇒非常に高密度かつ高速なアクチュエータ必要

受容器活動再現の観点

⇒低速高密度なアクチュエータと
高速低密度なアクチュエータの併用等



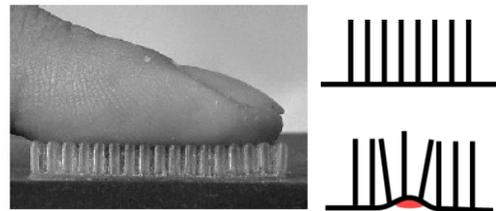
触覚:これからの産業応用

触覚は視覚, 聴覚の次のメディアと期待されるが,
未だ標準となる万能の触覚ディスプレイの姿は見えない。

現在の技術で可能な, 新しい用途は?

触覚の新規応用へのヒント(1)

単純な構造と物理現象の利用

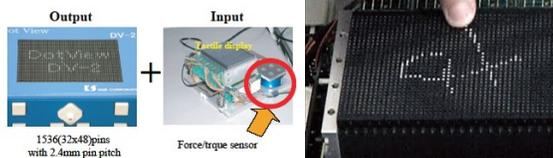


佐野他: 触覚コンタクトレンズ (ROBOMECH'04)

- 極めて単純な構造で変位を拡大
-5mm厚ゴムシートの下に紙片の有無を識別可能
-塗装の良否判定に利用
- 物理構造の中に触覚センサと触覚ディスプレイが共存

触覚の新規応用へのヒント(2)

インタラクティブティ

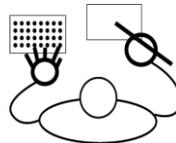


下条他: 触覚GUIを可能とする視覚障害者用入出力装置の開発, 日本VR学会大会, 2004.

視覚障害者用の入出力装置

従来: 入力=タブレット, 出力=点字ディスプレイ

触覚ディスプレイと触覚センサの一体化。



まとめ

- リアルな「さわった感覚」を提示できる皮膚感覚(触覚)ディスプレイは, 未だ世の中に無い。
- 無いだけでなく, 提示原理そのものが研究段階
- 現在の触覚ディスプレイ研究は, **触覚そのものの解明**と歩調をあわせて取り組んでいる, アクロバティックな分野である。

発表論文の割り振り

- 人数の都合で修士以上とします。余った場合は予備日も
- Web上に論文の候補をあげます。(今週金曜日17時目標)
http://www.kajimoto.hc.uec.ac.jp/interactive/index.html
(ID: interactive, Pass: alice)
- 論文の希望番号を第5希望まで、発表できない日があればそれも含めて kajimoto@hc.uec.ac.jp にメールしてください。
- **早いもの順**に担当者を決めるのでどんどん埋まります。
- 必ず返信します。24時間以内に返事が無い場合はスパム処理されたかもしれません。何らかの手段を講じてください。
- 発表しない場合は成績がつきませんが、もちろん成績が不要の人は発表しないでかまいません

発表方法

- **発表7分、質疑3分、交代2分**で一日7人行います。時間がありませんので10:40時ちょうどに開始します。**発表時間厳守**でおねがいします。
- 発表時間が短いので、研究の要点を、**何が面白いのか**分かるように話すことに集中してください。数式等の説明は不要。特に関連するweb上のコンテンツ(ムービー等)を探してくることを強く推奨します
- 当日の発表者はなるべくデータをUSBメモリで持参し、授業開始前(10:30~)に梶本のノートに入れてください。
- 梶本のノートを使う場合、pptのバージョンは2007です。
- ppt作成の際は**ムービーのリンク切れに注意**して下さい。

採点方法

発表者		発表者閲覧用			
理解度(10)	資料(10)	発表(10)	質疑(10)	印象(10)	合計(50)

コメント _____

書き写してください

発表者		採点用			
理解度(10)	資料(10)	発表(10)	質疑(10)	印象(10)	合計(50)

インタラクティブシステム特論