

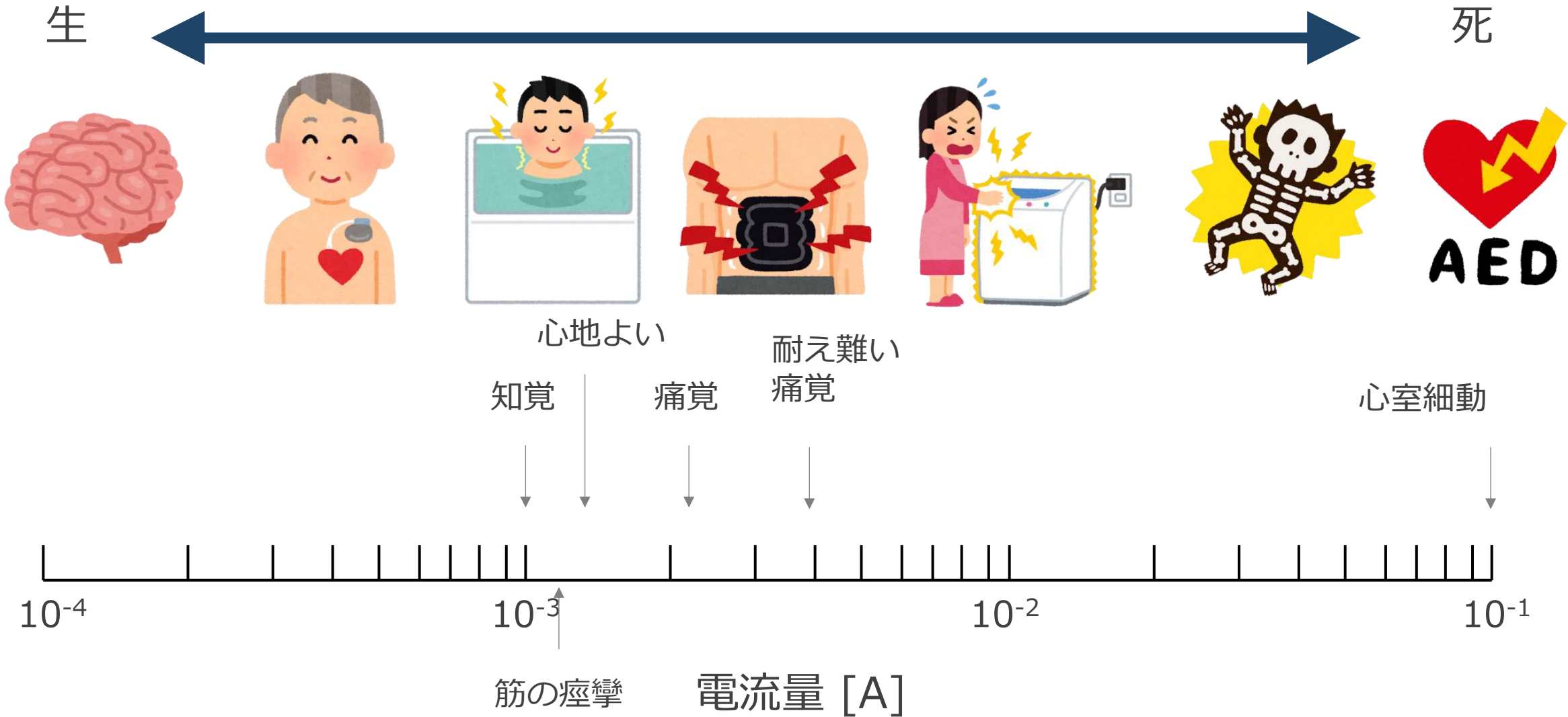
電気触覚ディスプレイに関する研究

大阪大学 大学院工学研究科

yoshimoto@mech.eng.Osaka-u.ac.jp

吉元俊輔

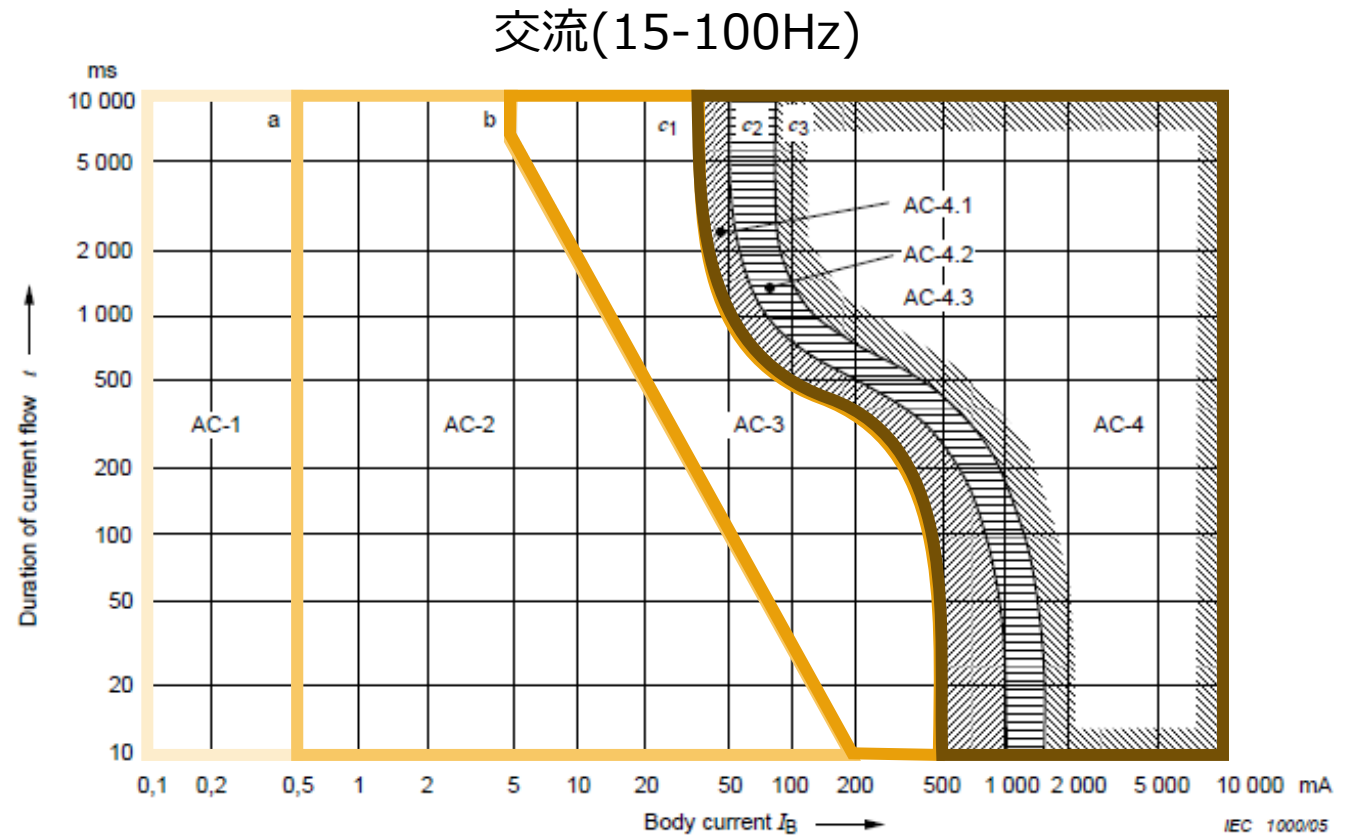
電気と生体反応



電流量と生体反応

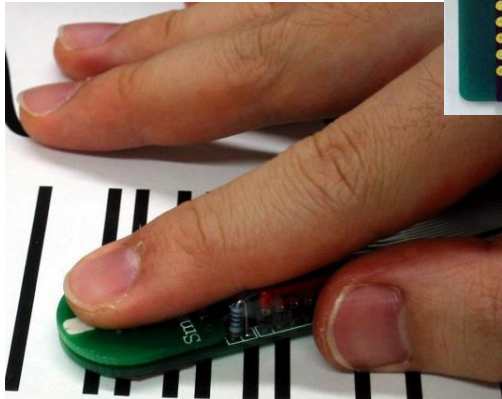
IEC TS 60479-1:2018, Effects of current on human beings and livestock –

- AC-1: 知覚されない
- AC-2: 知覚されるが筋反応はない
- AC-3: 可逆な筋収縮
- AC-4: 不可逆な効果
 - AC-4.1: 5%の確率で心細動
 - AC-4.2: 5-50%の確率で心細動
 - AC-4.3: 50%以上の確率で心細動

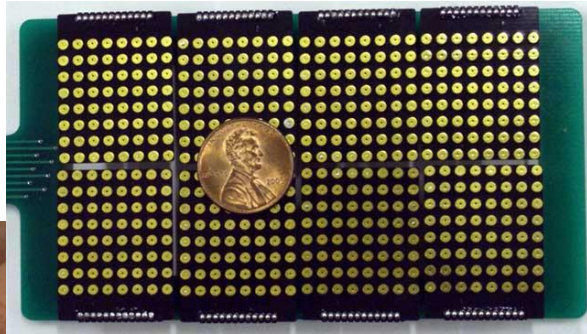


電気刺激による触覚提示

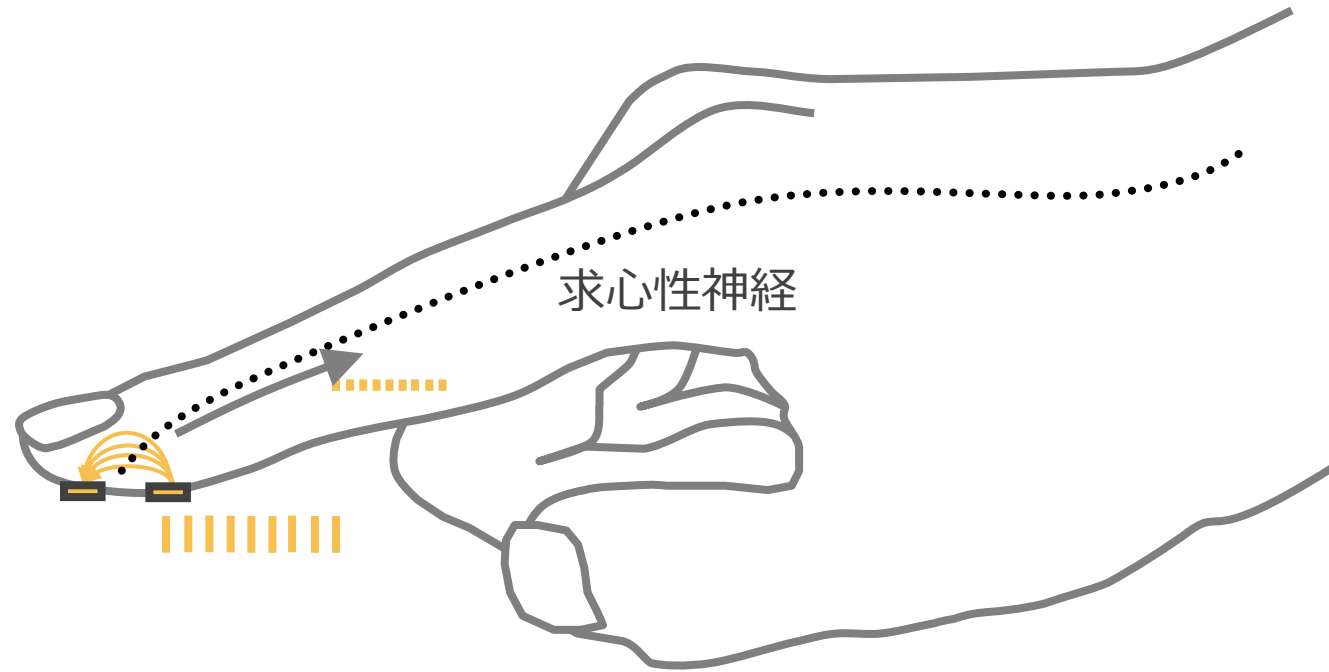
- 皮膚上に配置した電極から皮下組織に微弱な電流を流す
- 触覚を感受する受容器の神経が活性化され，感覚が発生



Kajimoto, et al.,
Smart touch, 2002.

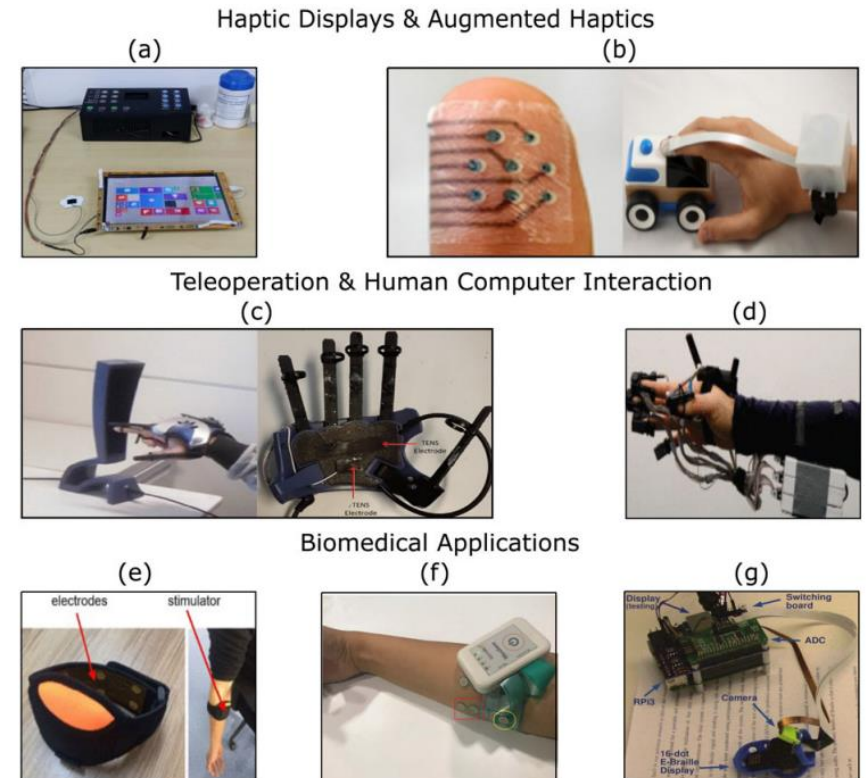
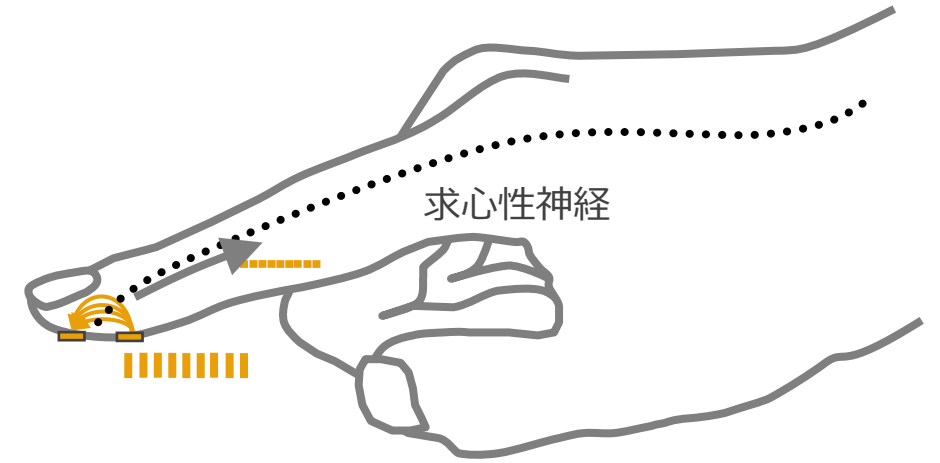
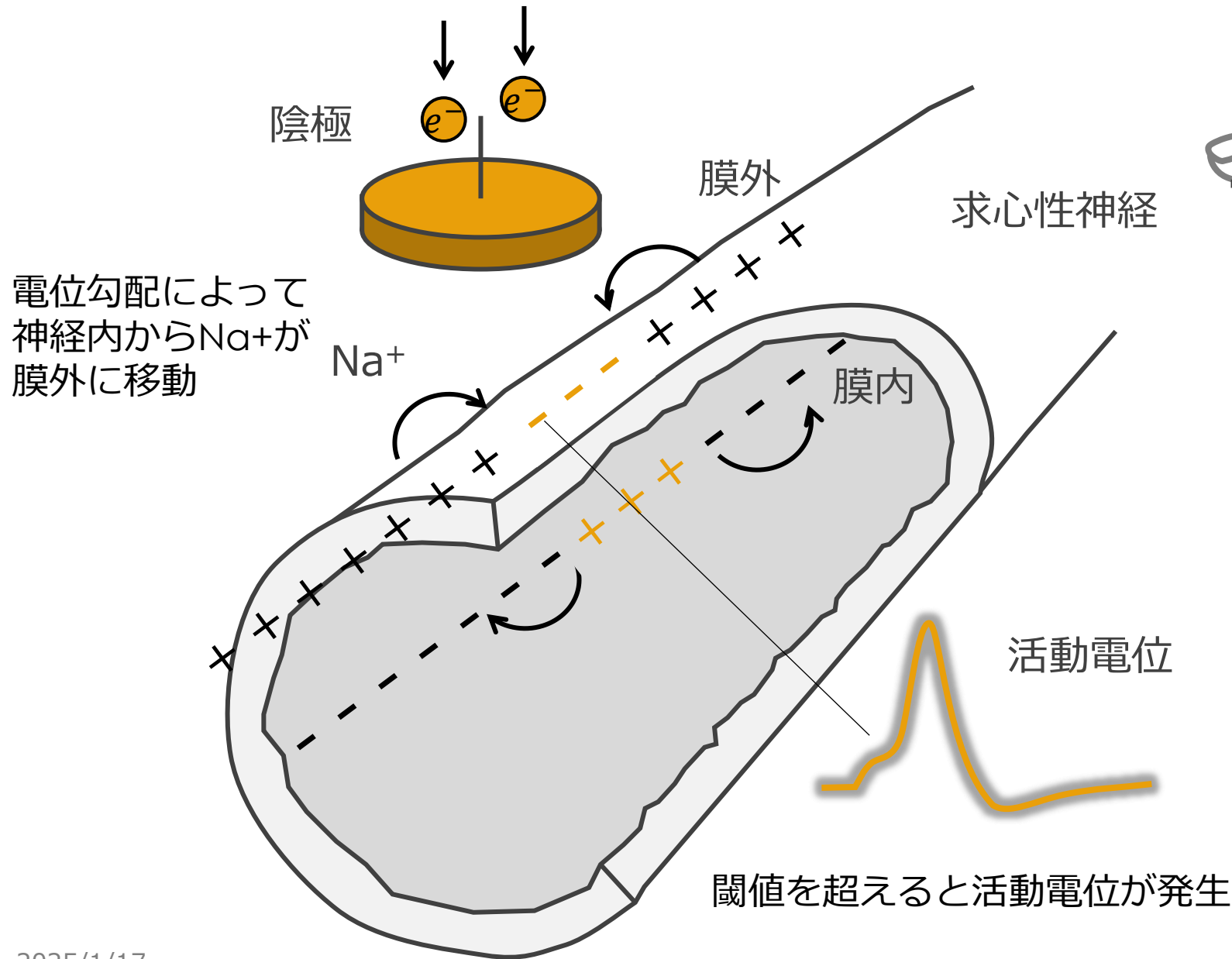


Kajimoto, et al.,
Forehead Retina System,
2006.

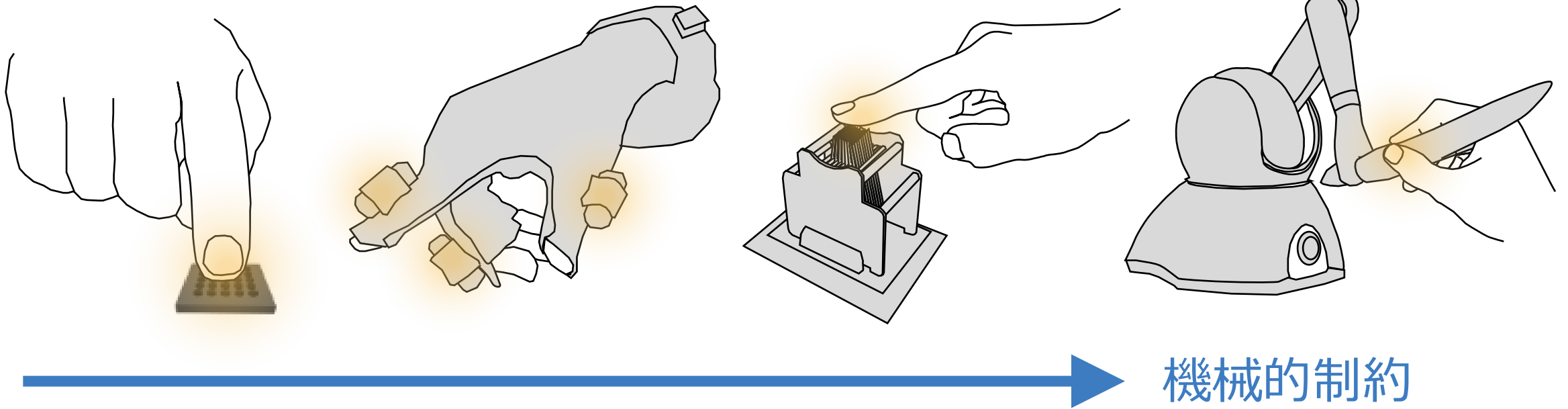


神経束の途中の経路で刺激を入力することはできないのか？

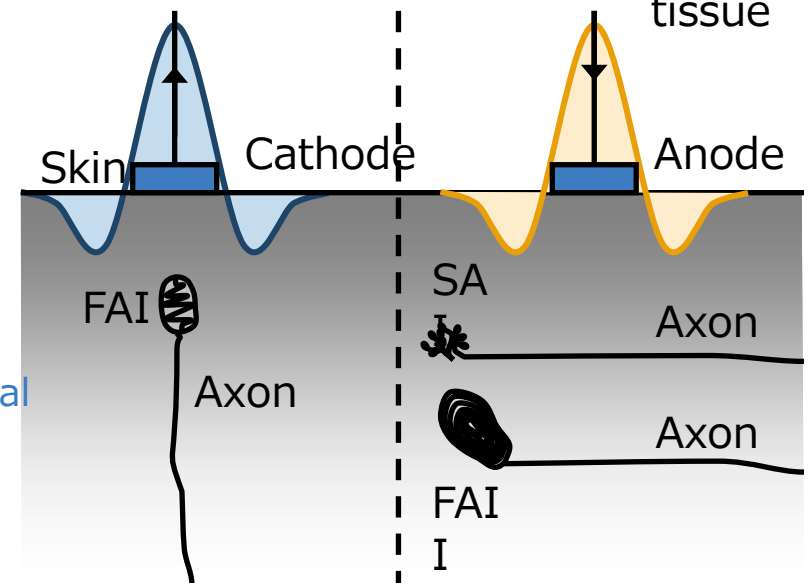
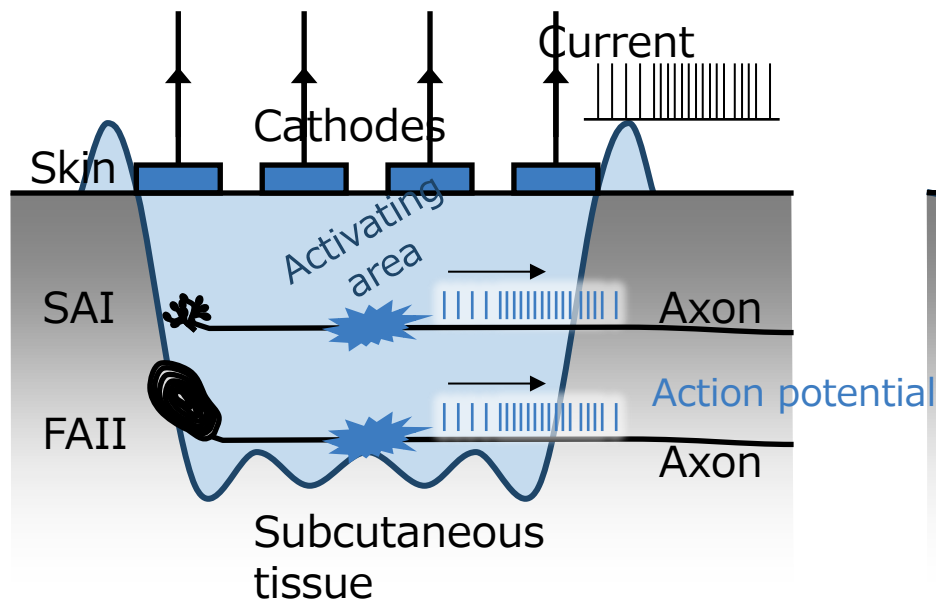
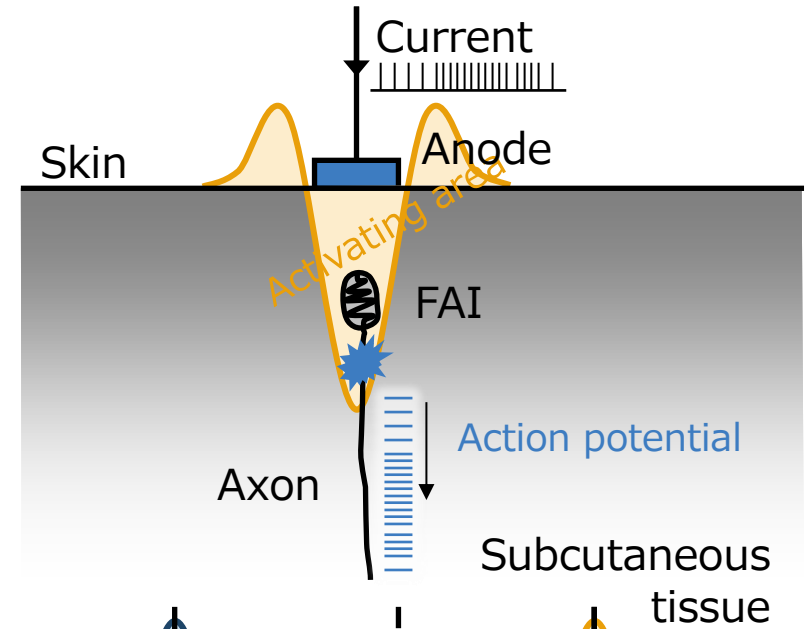
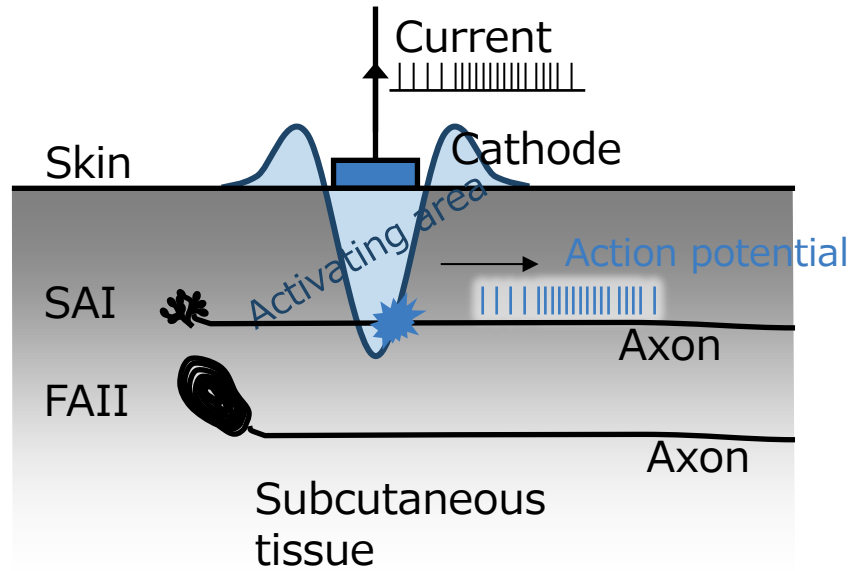
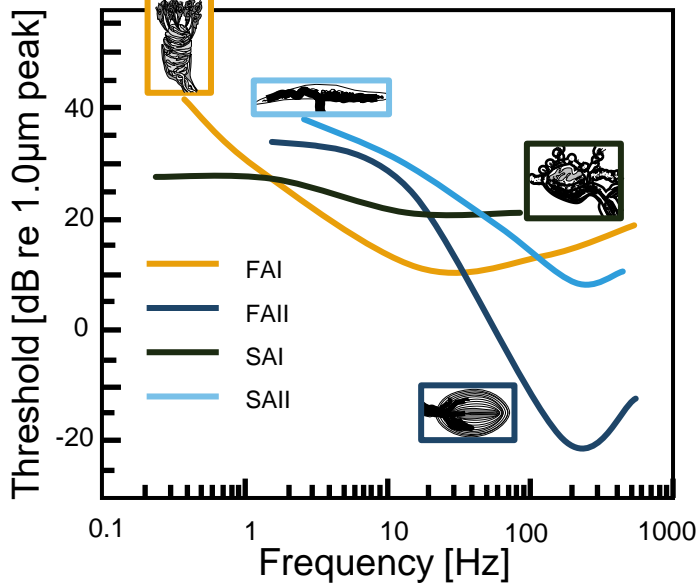
電気刺激による触覚提示



従来の力触覚ディスプレイ



触覚提示における受容器の選択的刺激と合成



Kajimoto et al., 2004

Generation of receptor-dependent sensations

Electrical stimulation

Mechanical stimulation

Meissner's corpuscles
low-freq. vibration

Merkel cells
pressure

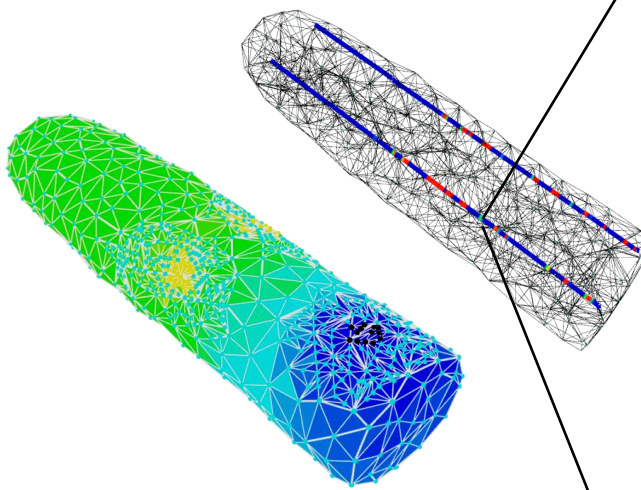
Pacinian corpuscles
high-freq. vibration

Ruffini endings
shear deformation

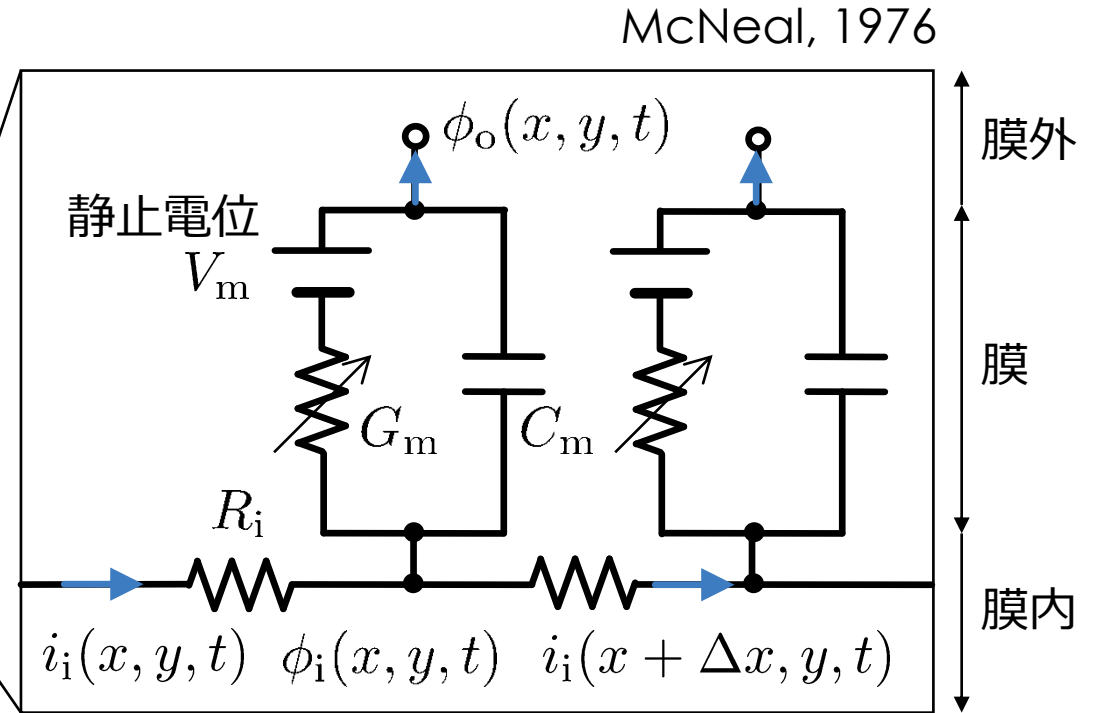
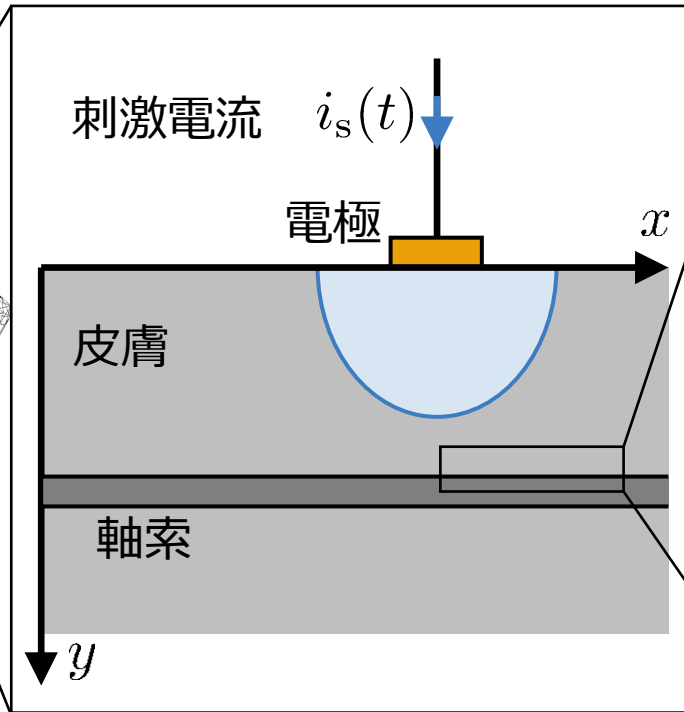
Our idea is to combine electrical stimulation and mechanical stimulation to regenerate these four tactile sub-modalities.

https://youtu.be/kB_uMeDtlk8

軸索方程式



$$-\nabla \cdot (\sigma^*(\mathbf{x}) \nabla \phi(\mathbf{x})) = 0$$



$$\phi_m(x, y, t) = \phi_i(x, y, t) - \phi_o(x, y, t) \quad : \text{膜間電位}$$

回路方程式 (静止膜電位を無視)

$$\frac{\partial i_i(x, y, t)}{\partial x} = -C_m \frac{\partial \phi_m(x, y, t)}{\partial t} - G_m \phi_m(x, y, t)$$

$$\frac{\partial \phi_i(x, y, t)}{\partial x} = -R_i i_i(x, y, t)$$

$$\tau \frac{\partial \phi_m(x, y, t)}{\partial t} - \kappa \frac{\partial^2 \phi_m(x, y, t)}{\partial x^2} + \phi_m(x, y, t) = \kappa \frac{\partial^2 \phi_o(x, y, t)}{\partial x^2}$$

$$\tau = C_m / G_m$$

$$\kappa = G_m / R_i$$

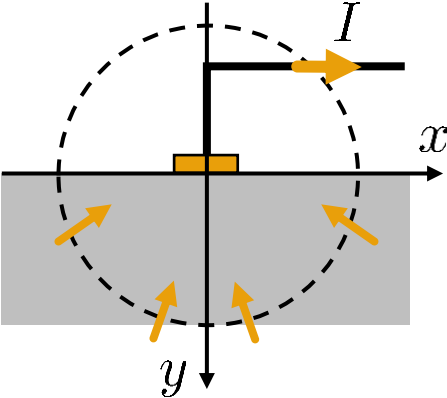
神経活動が生じる条件

$$\tau \frac{\partial \phi_m(x, y, t)}{\partial t} - \kappa \frac{\partial^2 \phi_m(x, y, t)}{\partial x^2} + \phi_m(x, y, t) = \kappa \frac{\partial^2 \phi_o(x, y, t)}{\partial x^2}$$

: 膜外の電位勾配により神経刺激が可能

活性化関数 (Activating Function)

体表電極(2D)による陰極電流が与える電界



$$\mathbf{E} = \frac{I}{2\pi\sigma\sqrt{x^2 + y^2}}$$



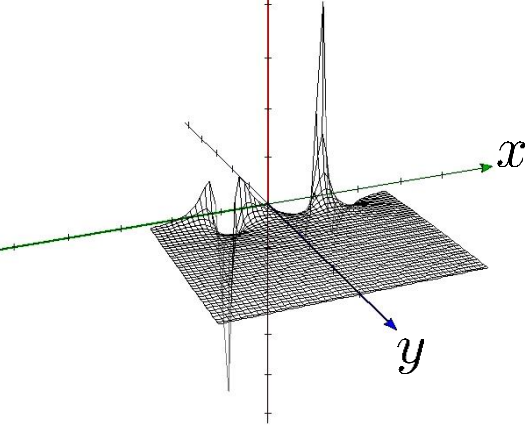
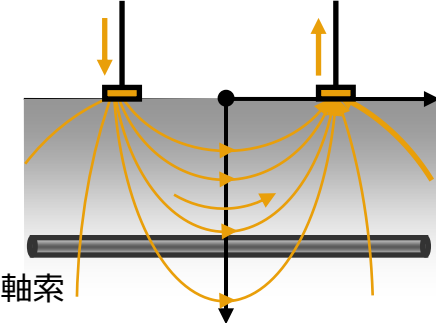
$$\phi_o(x, y) = - \int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{r} = \frac{-I \log(\sqrt{x^2 + y^2})}{2\pi\sigma}$$



$$\kappa \frac{\partial^2 \phi_o(x, y, t)}{\partial x^2} \propto \frac{y^2 - x^2}{(x^2 + y^2)^2}$$



- 電極直下で最も刺激されやすい
- 浅い部位ほど刺激されやすい
- 陽極刺激の場合は活性化関数が負になり刺激できない



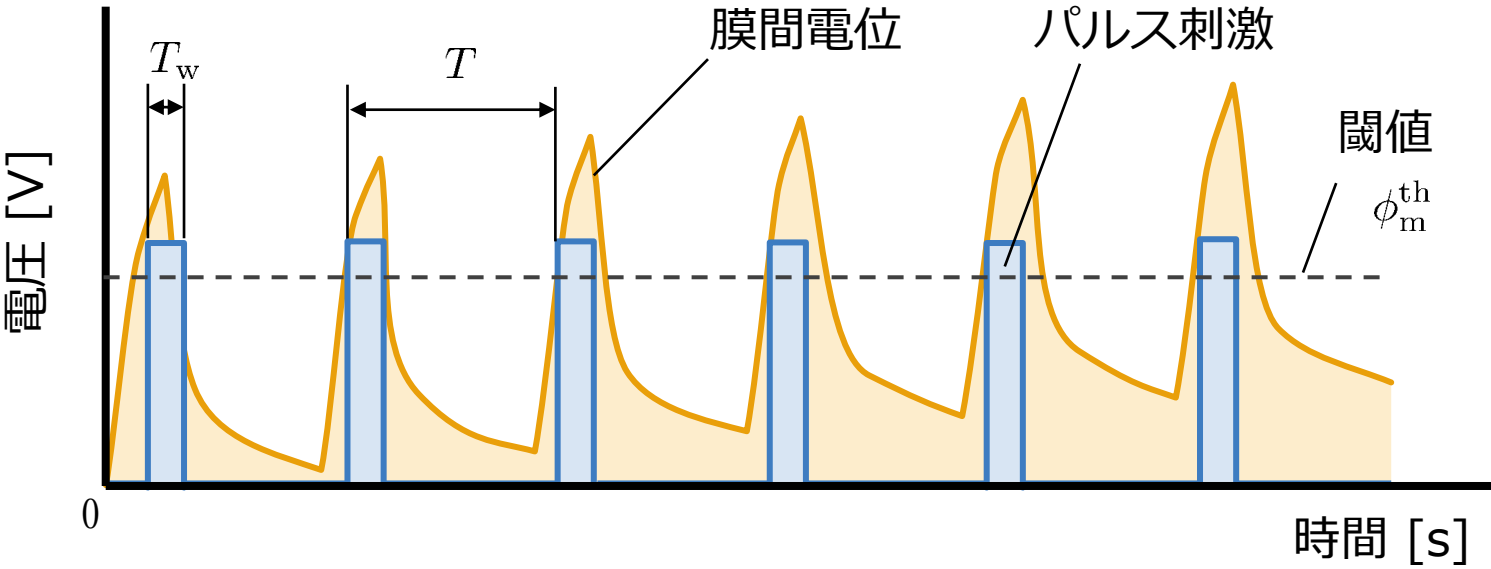
刺激波形と神経活動の関係

$$\Phi_m(k_x, y, t) = \frac{\kappa L_1(k_x, y)}{\iota} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ (1 - e^{-\iota \beta_{n1}}) u(\beta_{n1}) - (1 - e^{-\iota \beta_{n2}}) u(\beta_{n2}) \right\}$$

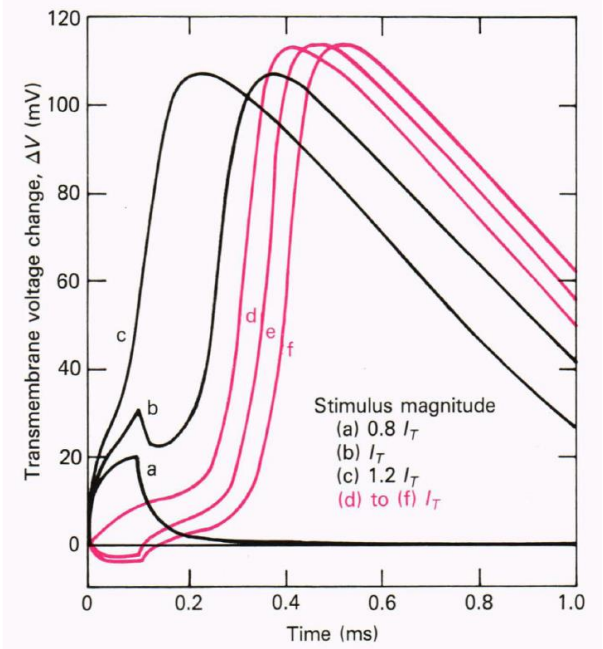
ステップ関数

重み関数
(k_x 空間周波数領域)

$$\iota = \kappa k_x^2 + \tau, \quad \beta_{n1} = t - nT, \quad \beta_{n2} = \beta_{n1} - T_w$$



100μsパルス刺激に対する応答

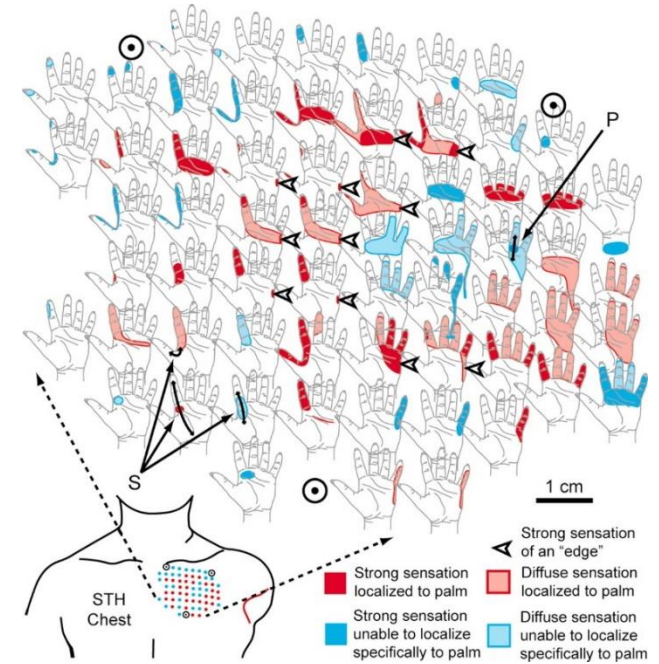
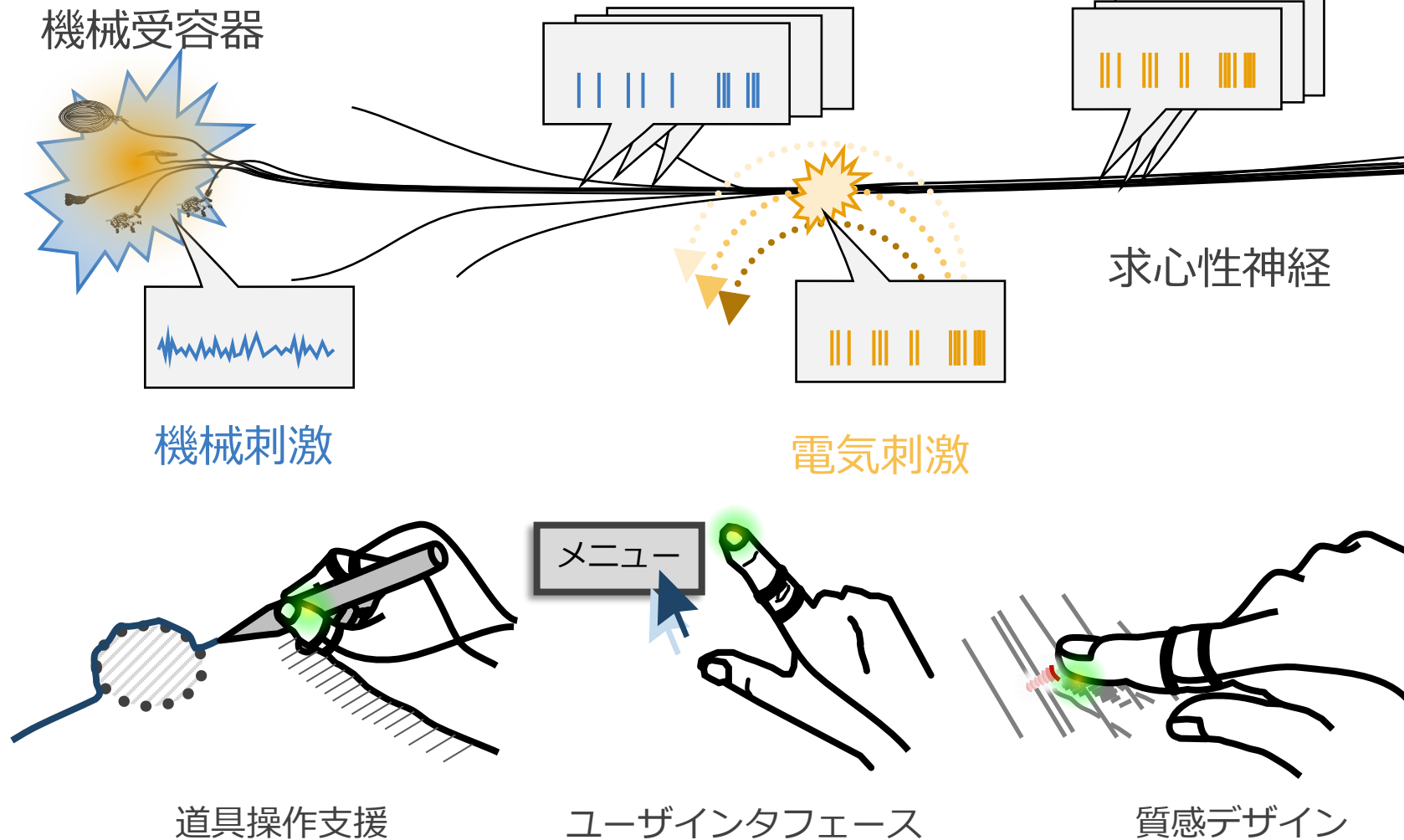


J.P. Reilly, 1985

神経束を刺激すると末端の受容器からの活動として知覚される

機械刺激による触覚神経活動

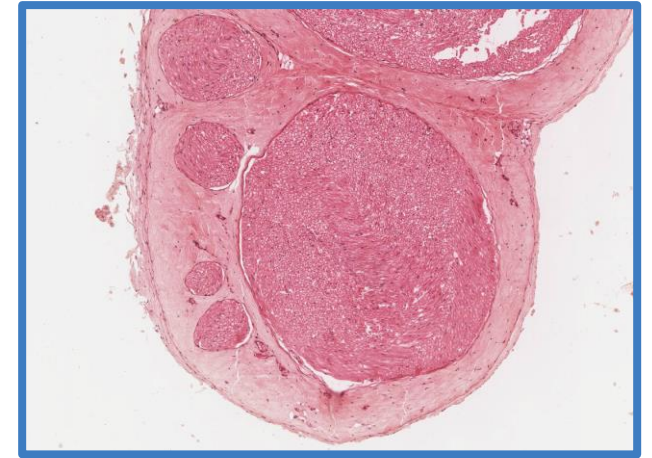
電気刺激による触覚神経活動
統合触覚信号



[T.A. Kuiken et al., 2007]

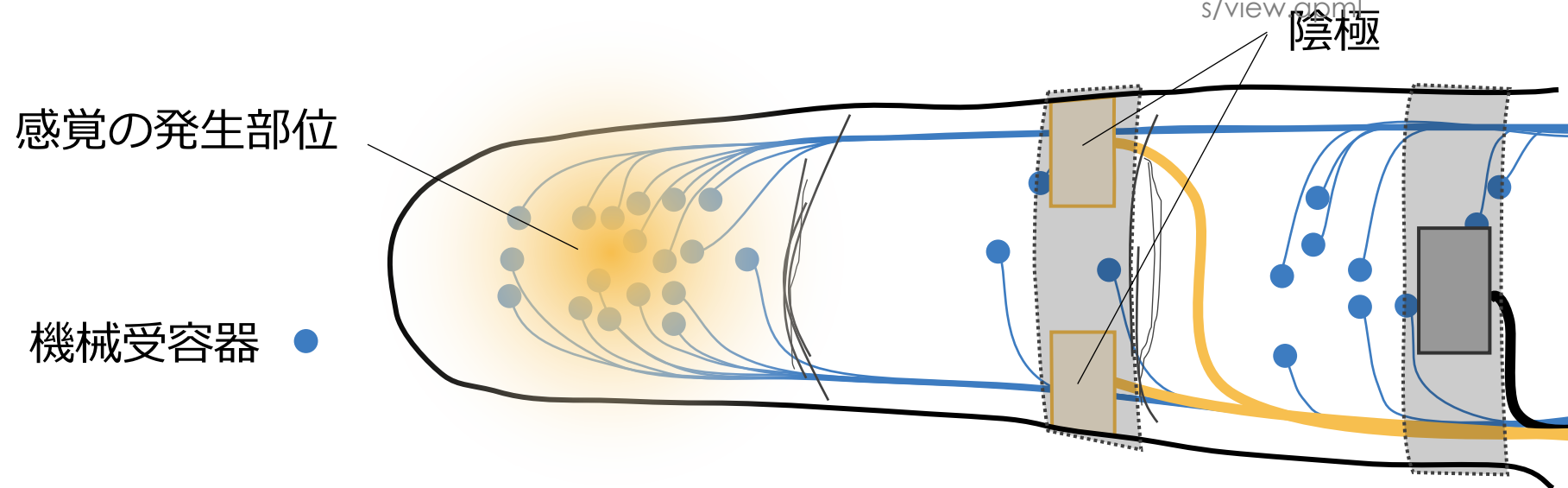
解剖学的アプローチ

- 指の左右側面に求心性神経が走行
 - 指内では指腹の受容器密度が最も高い
 - 指中節より末端には筋肉が存在しない
- 指中節左右側面が刺激電極の位置として適切



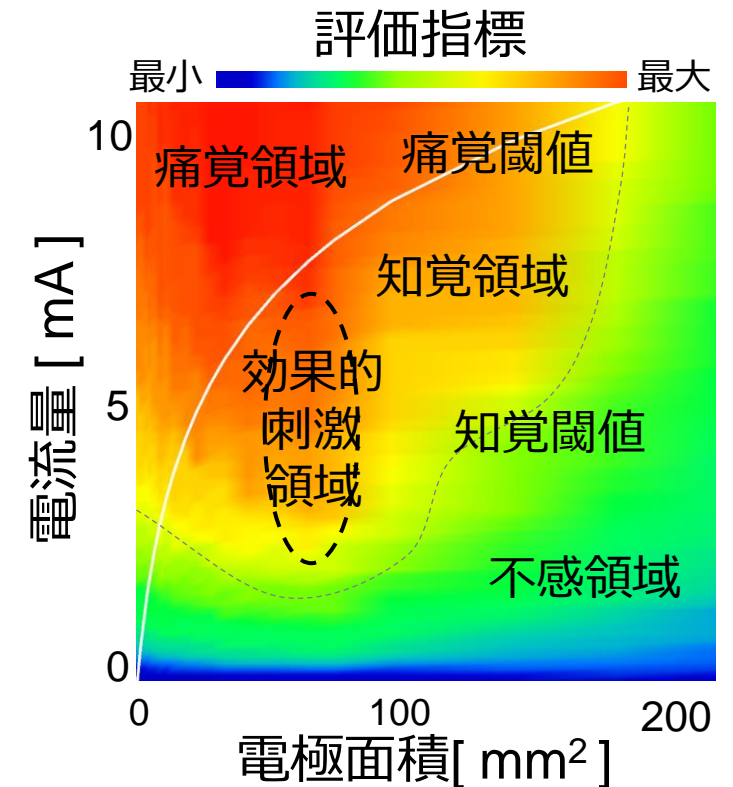
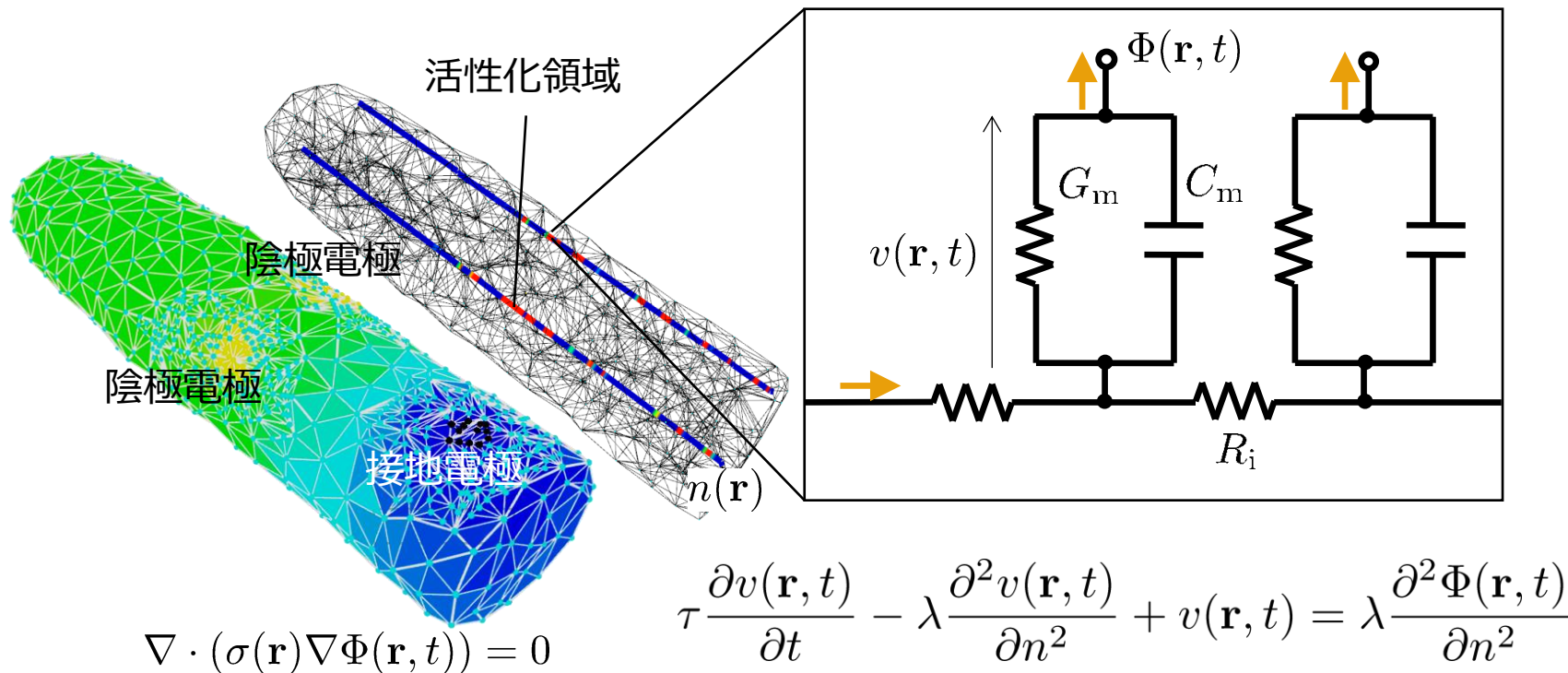
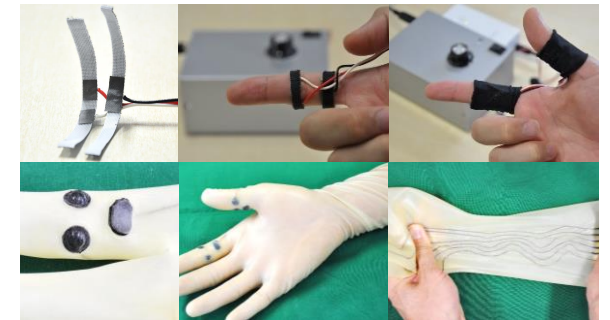
University of Michigan WebScope

http://virtualslides.med.umich.edu/Histology/Basic%20Tissues/Nervous%20Tissue/068_HISTO_40X.svs/view.html

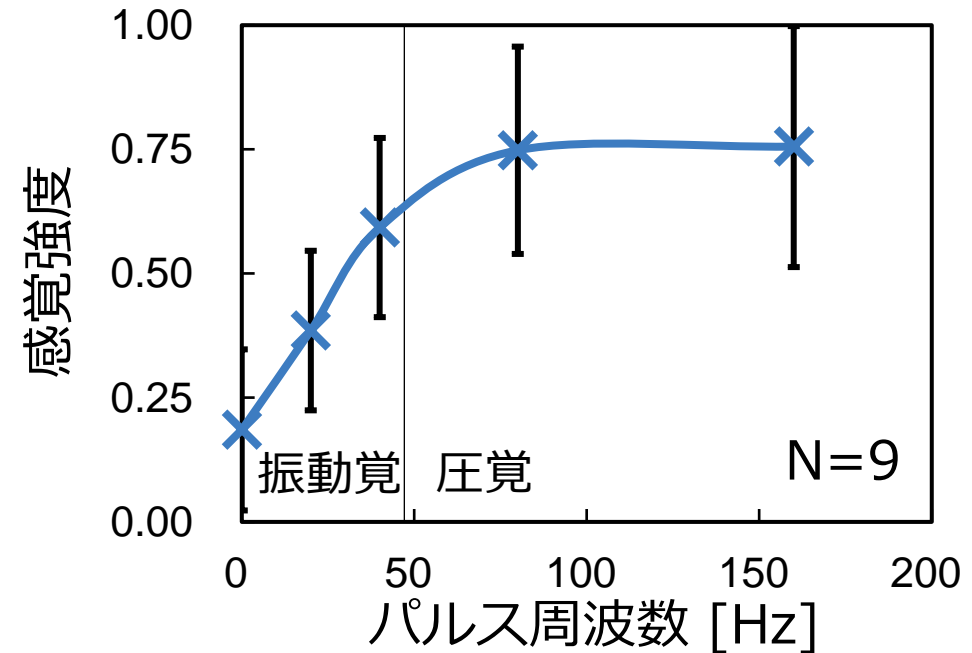
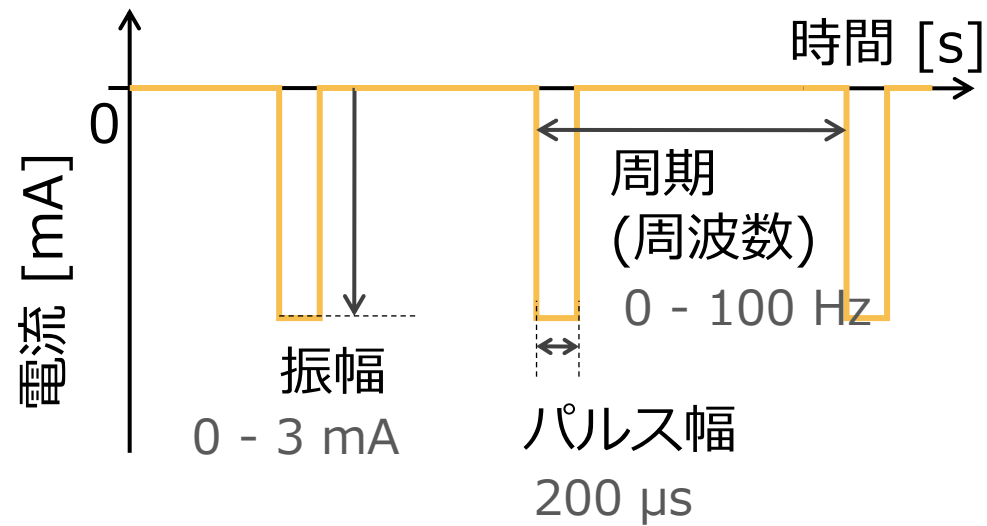
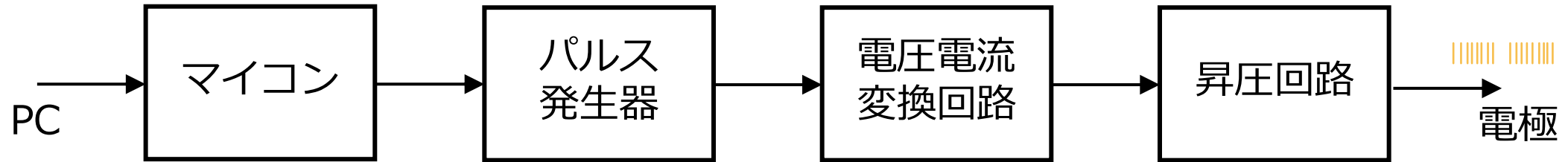


効果的な電極面積をシミュレーションにより探索

- **陰極電流**で皮膚表面に水平な神経を活性化可能
- 電流量・電極面積が感覚に影響：面積64 mm²程度が良好

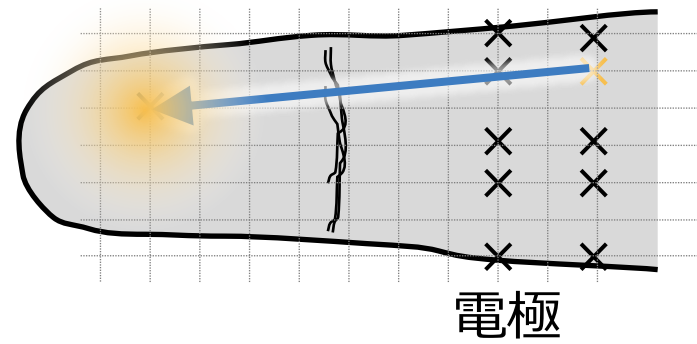
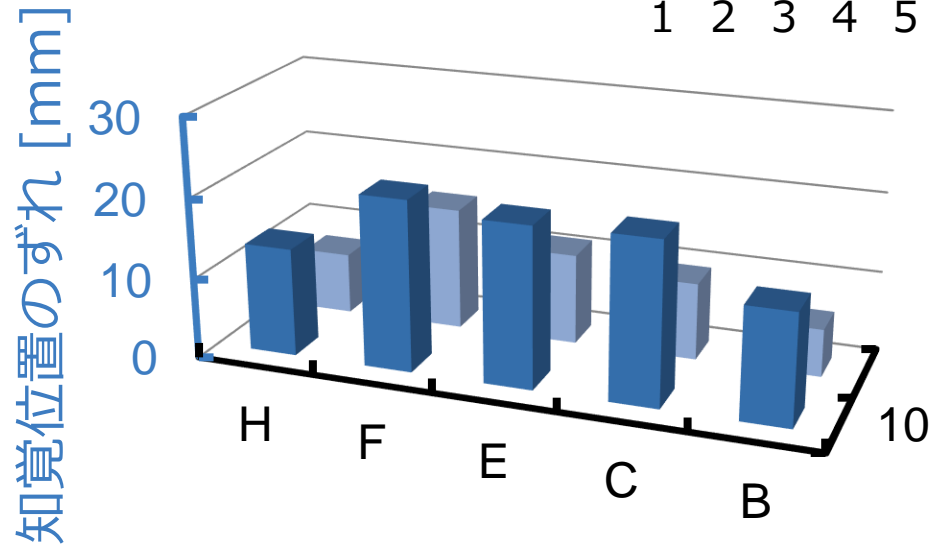
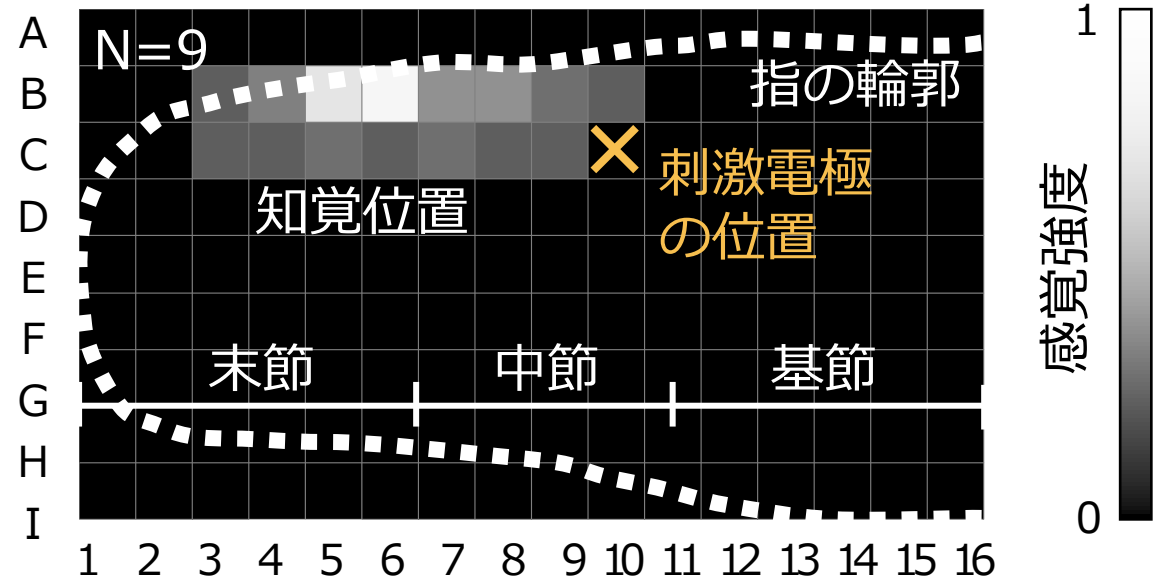


刺激装置の構成と刺激波形

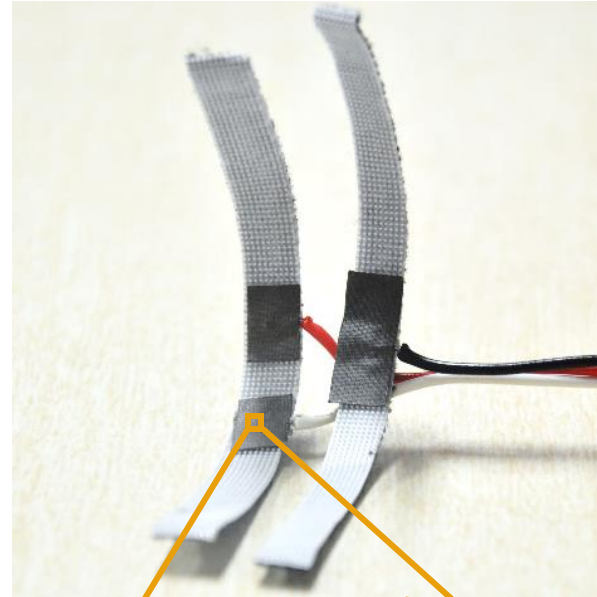
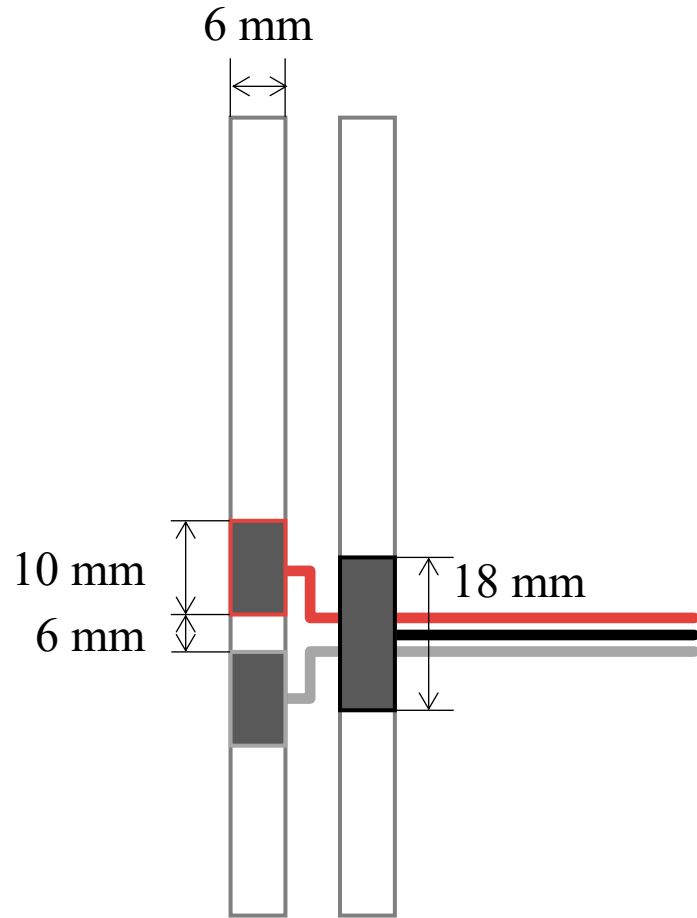


パルス周波数と波高が感覚強度・様式に影響

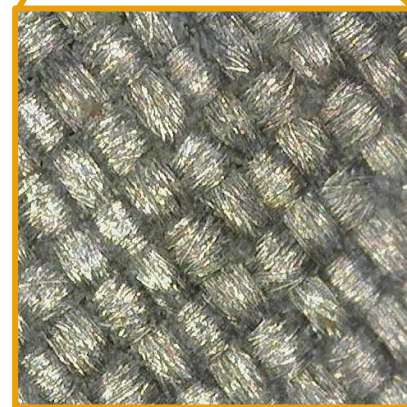
知覚位置の調査に基づく最適電極位置の決定



電極の構造と刺激の調整



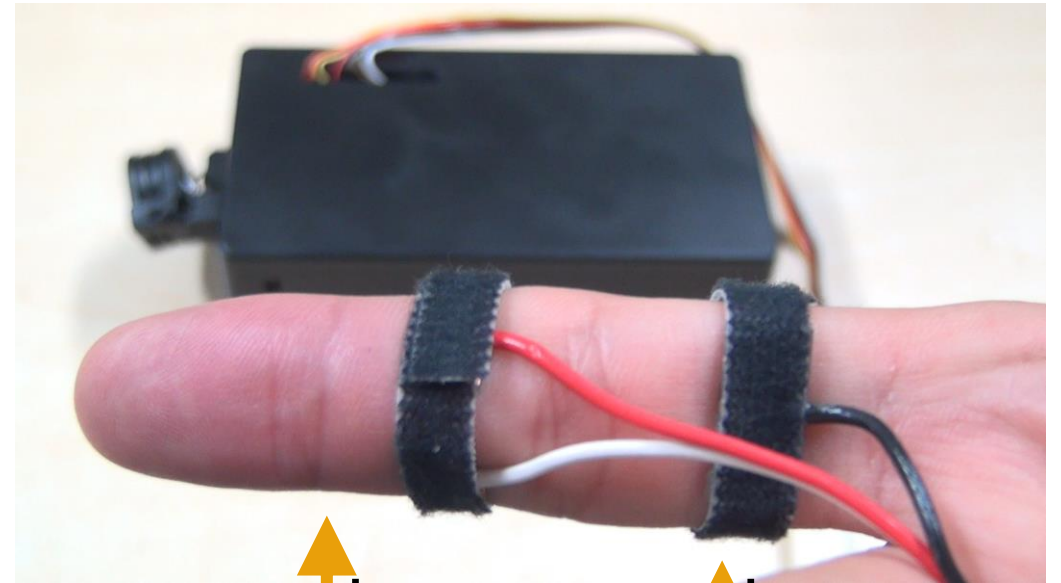
導電性繊維



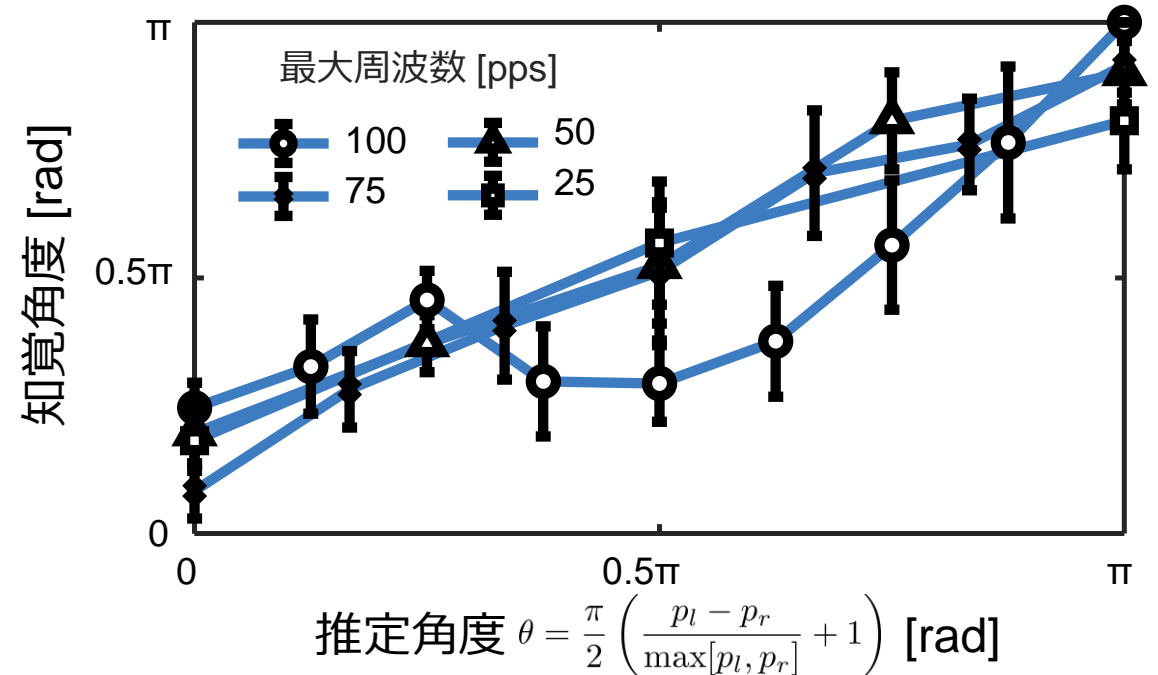
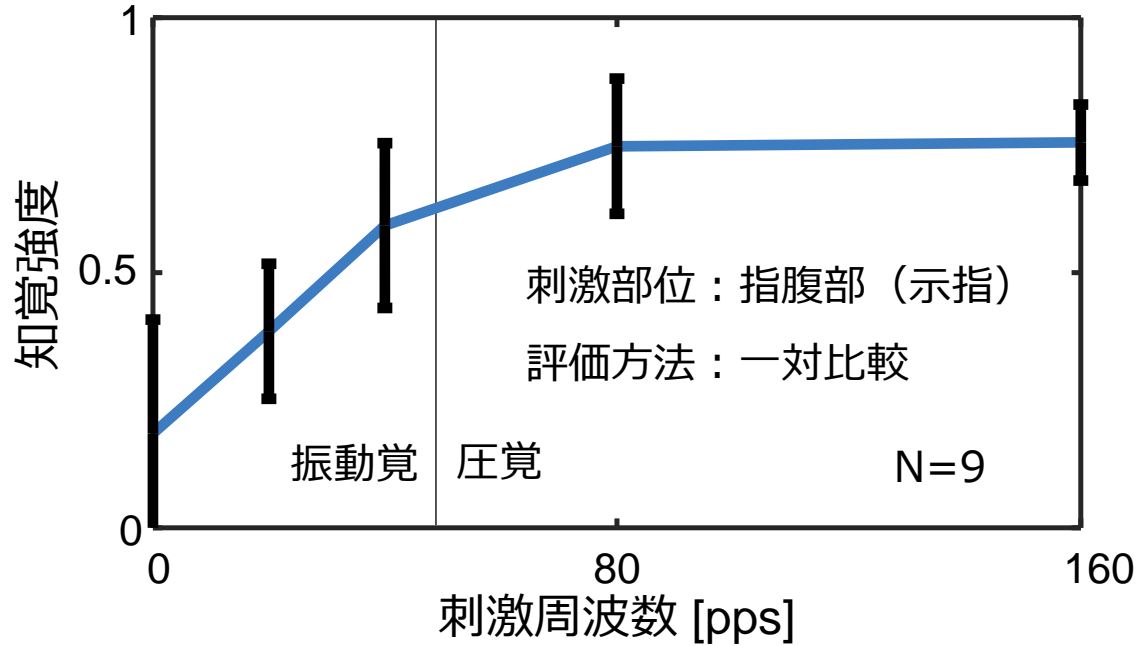
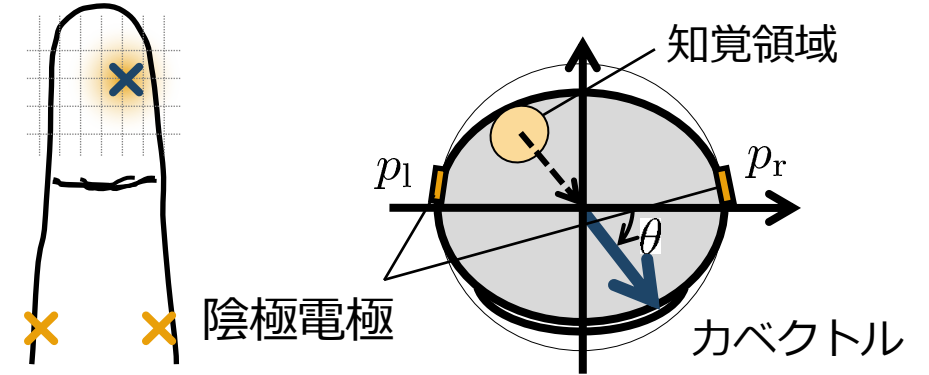
PET糸 + Ni + Cu + Ni

接地電極の面積を大きくすることで電流密度を刺激電極に集中

各刺激電極の刺激電圧を感覚に基づいて個別に調整することで狙った位置に触覚を生成

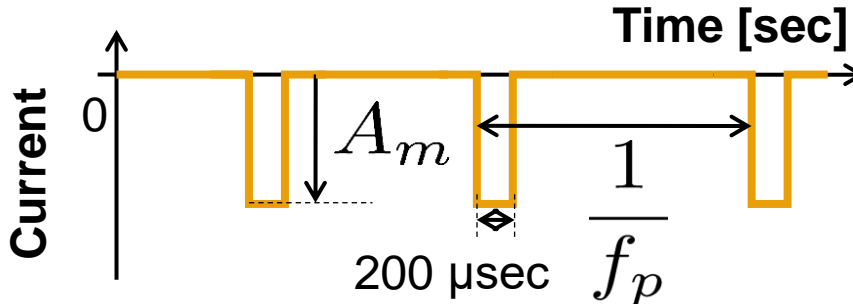


電気刺激パラメータと知覚の関係



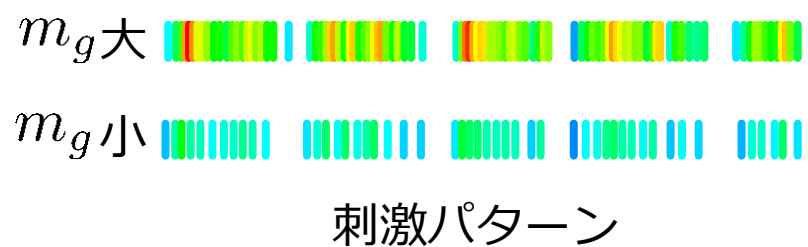
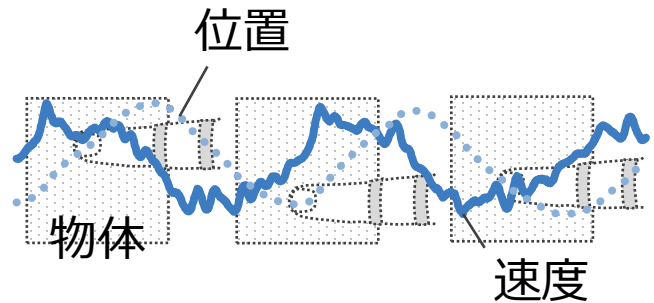
パルス周波数が感覚強度に影響, 2極刺激で部位を制御 = 多自由度な情報提示

指の速度に応じてパルス刺激の周波数を制御



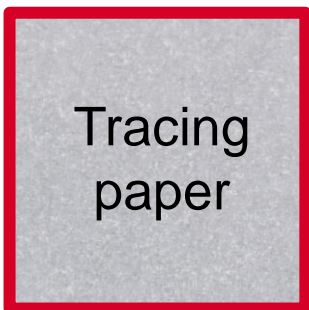
$$f_p = m_g \frac{v_f}{v_m} \quad (v_f > 0)$$

$$A_m = A_{th}(\alpha P_f + \beta)$$

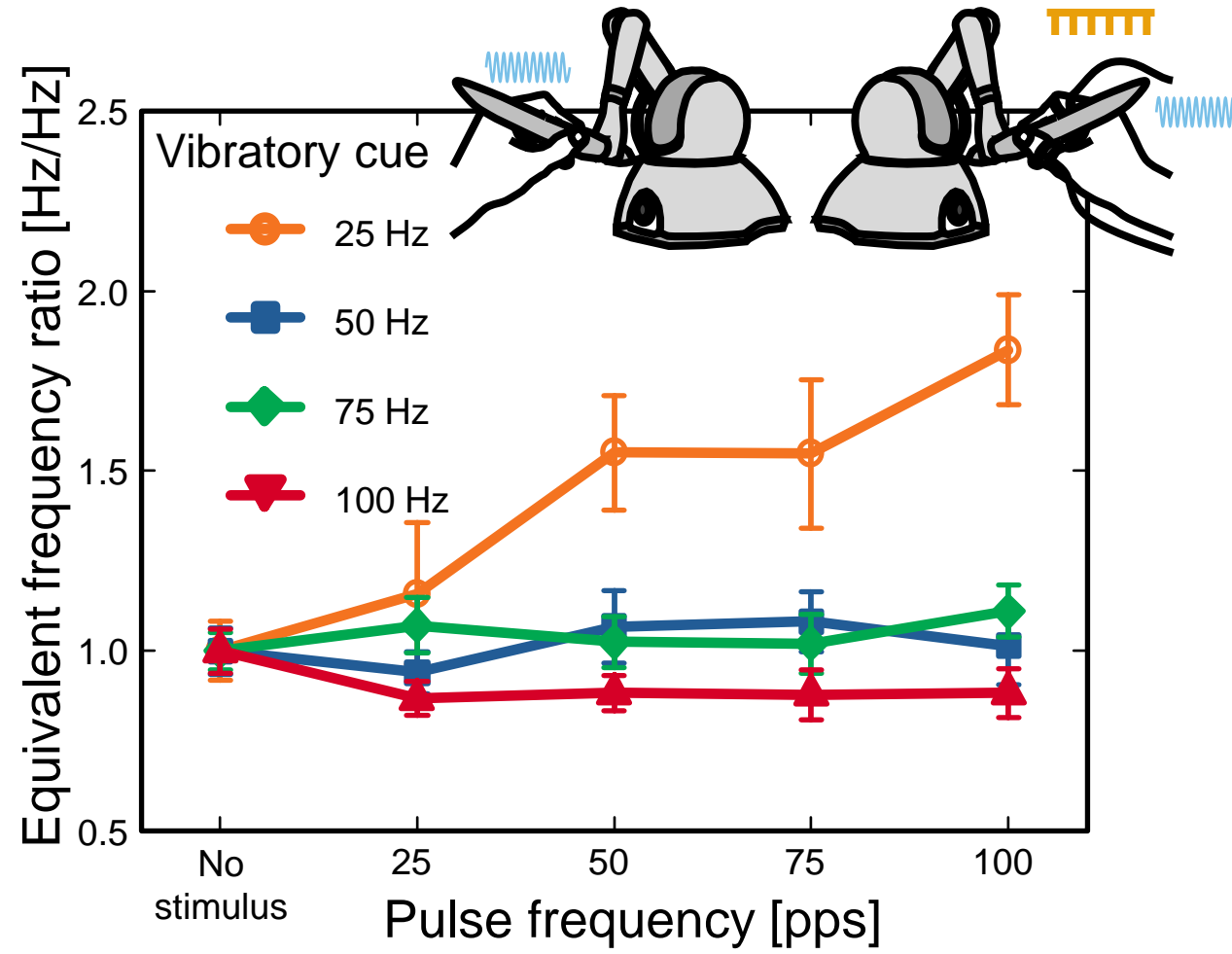
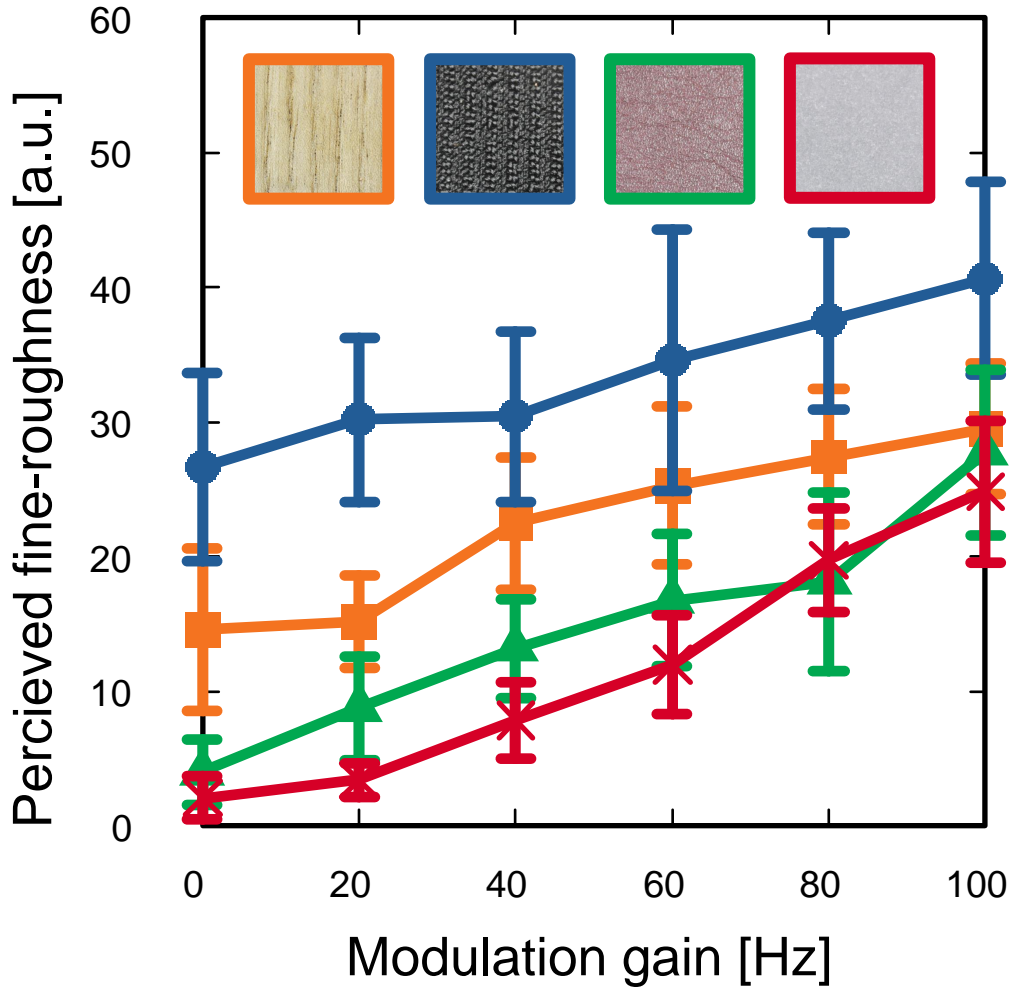


- fine- and macro-roughness を0-100で相対評価.
- 変調ゲイン: 0, 20, 40, 60, 80, 100.

Reference

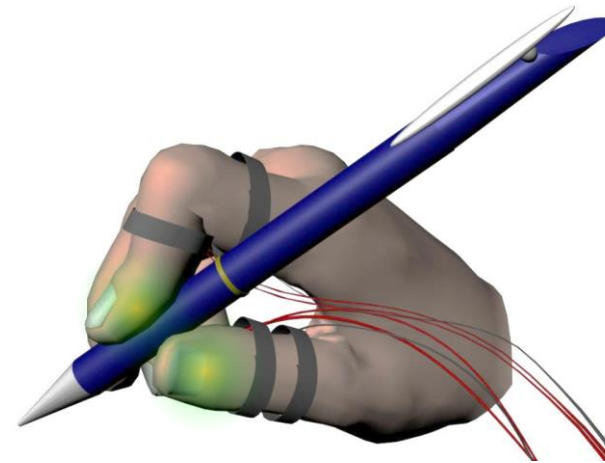
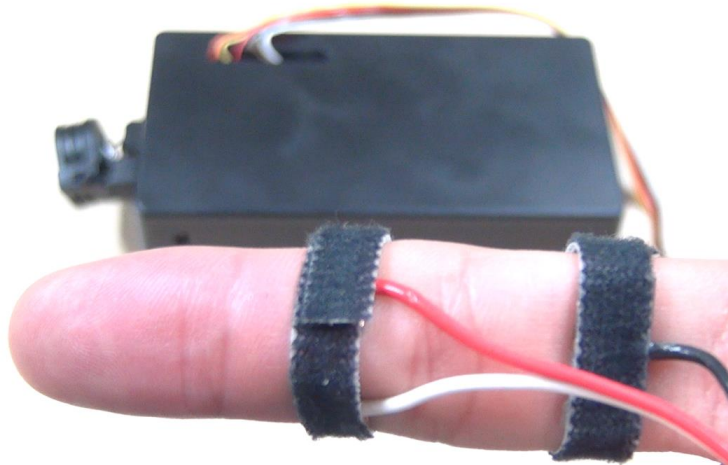


重畳された電気触覚により知覚粗さが変化する



触覚ディスプレイのまとめ

- 指中節の電気刺激による指先への触覚重畳
- 道具の把持や実際の触覚を阻害しない簡便な機構
- 刺激のパルス頻度によって生じる感覚強度を制御可能
- 二つの刺激電極ごとにパルス頻度を調整し，知覚位置を制御可能



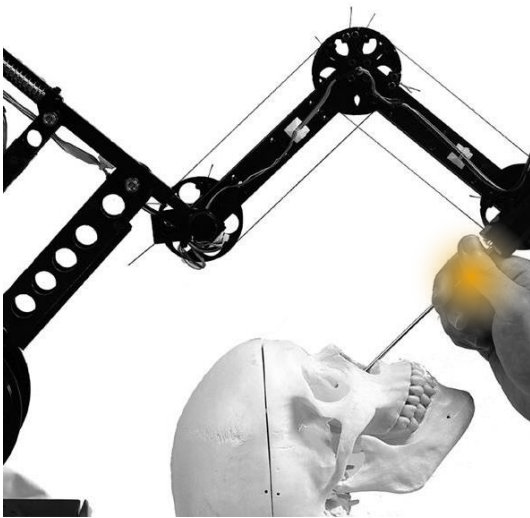
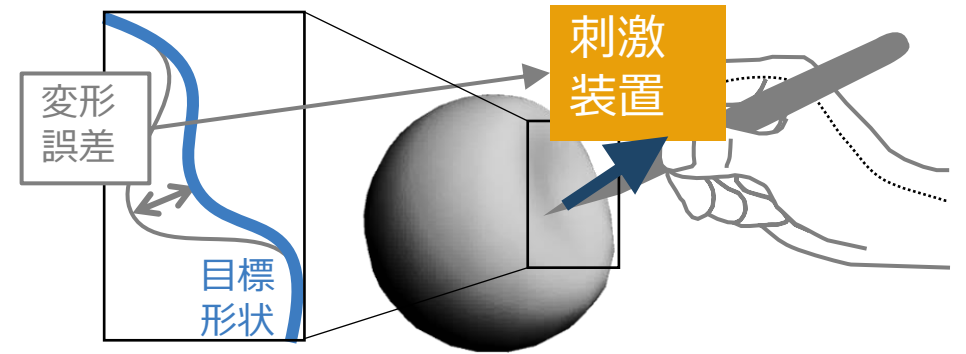
動作や操作を妨害しないため，
様々な場面での利用が可能

触覚フィードバックの応用展開

制御

触覚提示技術の身体運動（道具操作）支援への応用

- 感覚を変調することで、**身体運動能力を拡張**する
- 外科手術などの手技を触覚提示により支援
 - **安全性の向上**：危険領域への侵入回避
 - **信頼性の向上**：目標形状・操作力の教示



Nojima, et.al.,
SmartTool, 2002.



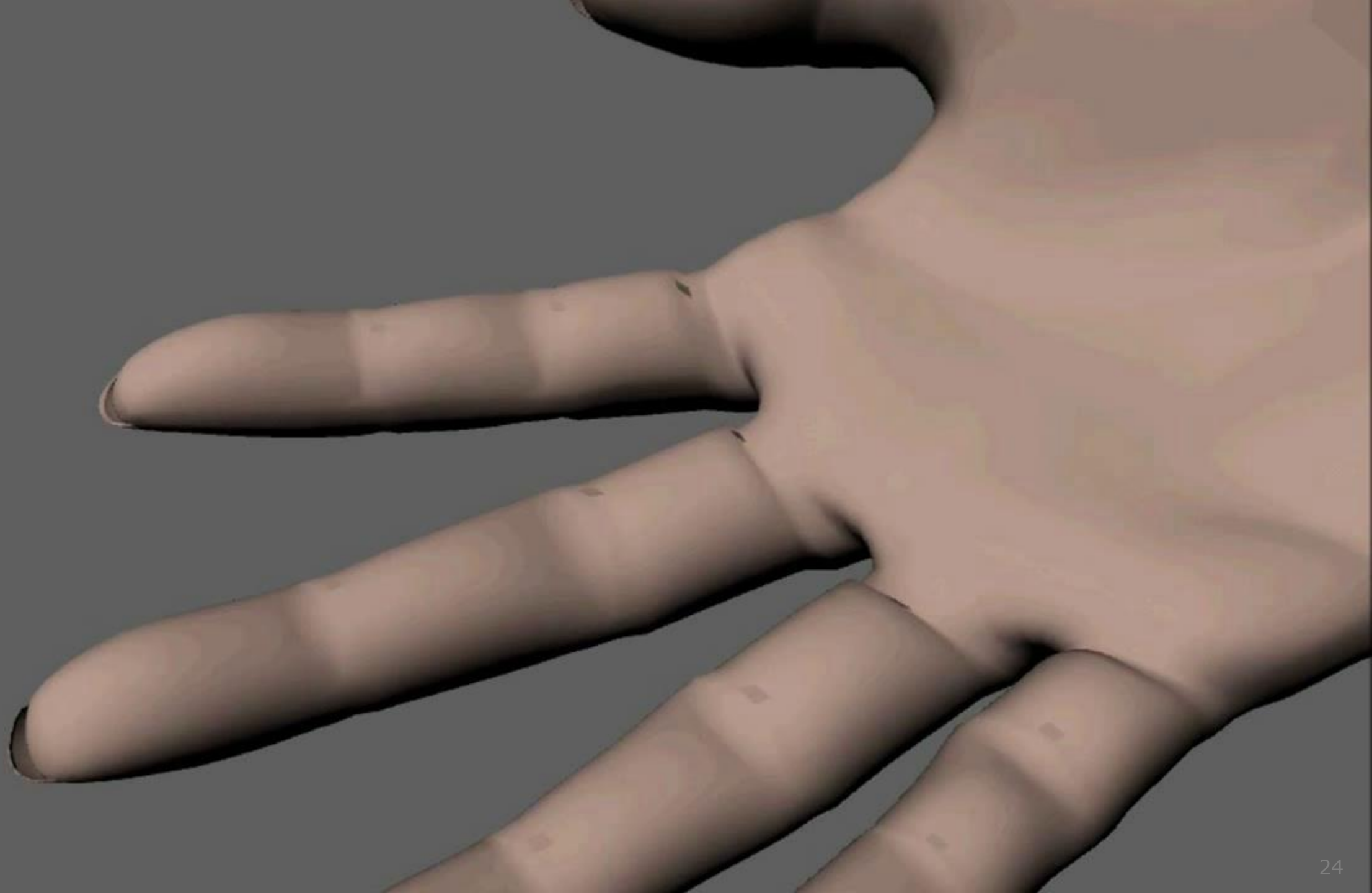
Brell, et.al.,
conTACT, 2007.



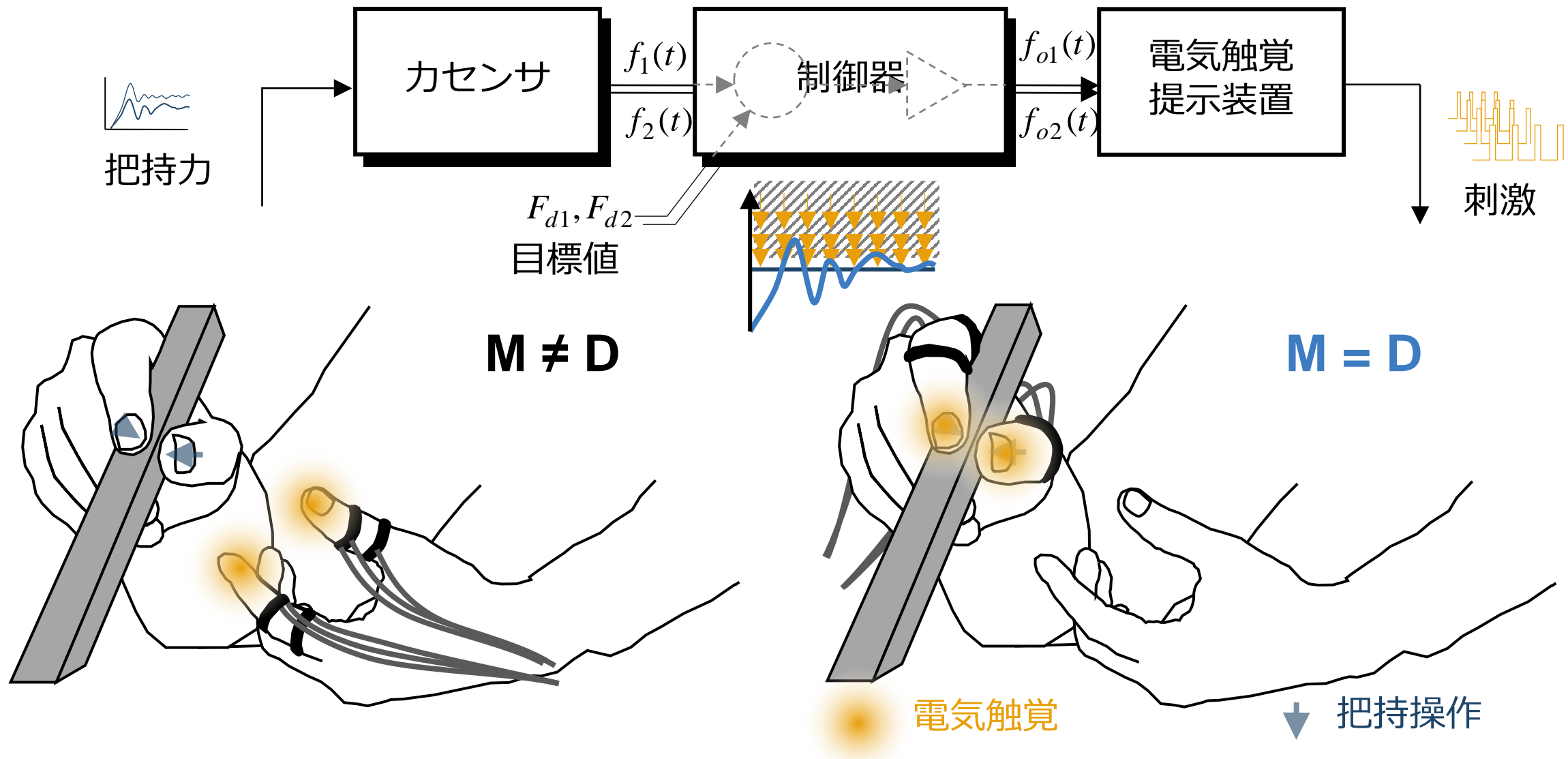
King, et.al., Pneumatic Balloon Tactile
Display, 2009.



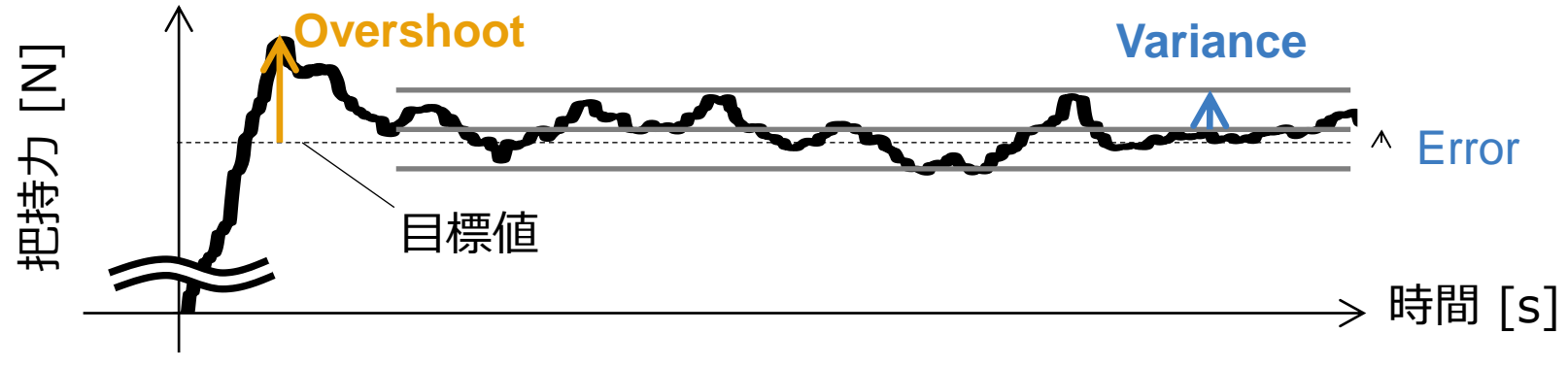
W. McMahan, et.al.,
VerroTouch, 2011.



操作部位と提示部位が同じ (M=D) であることの意義

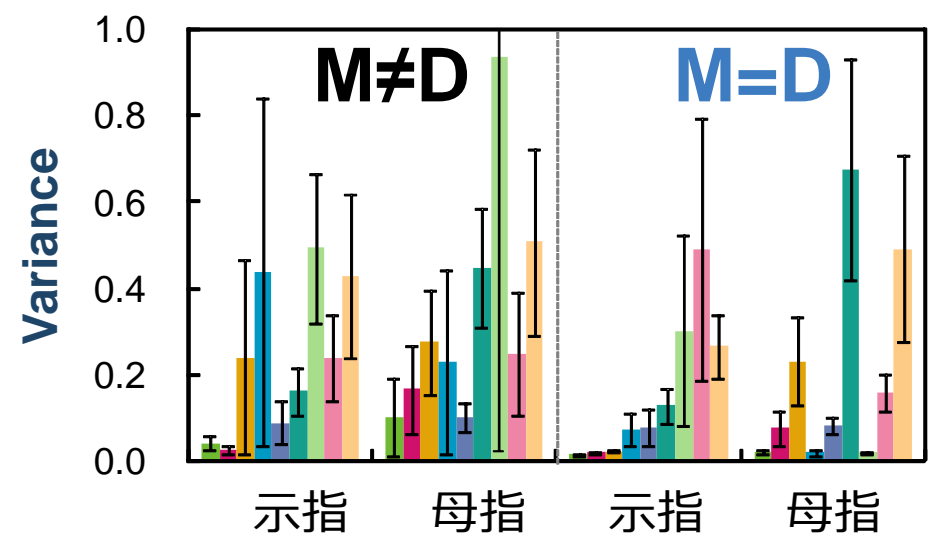
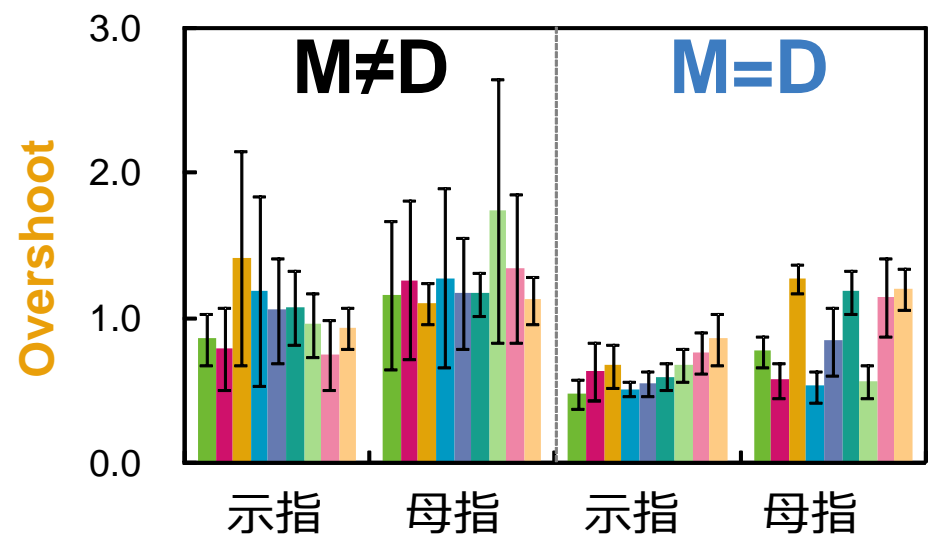


オーバーシュートと変動の軽減に寄与



目標値

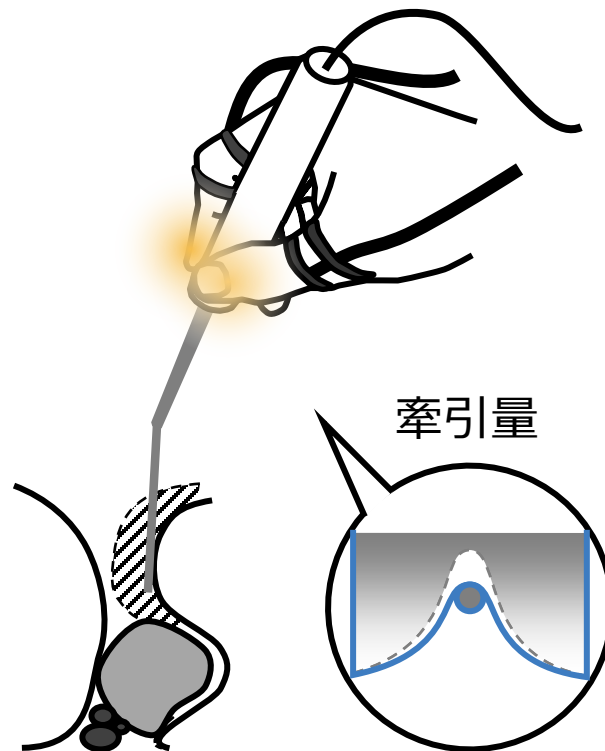
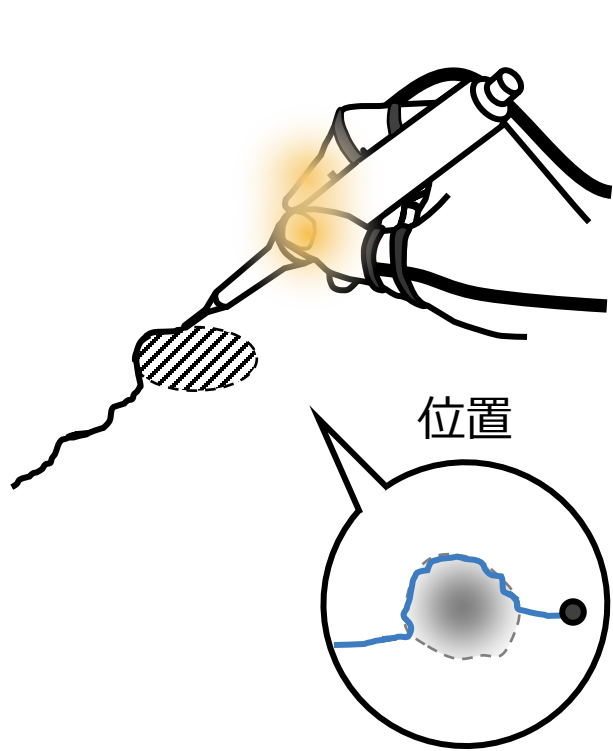
Index	0.5 N	0.5 N	0.5 N	2.0 N	2.0 N	2.0 N	6.0 N	6.0 N	6.0 N
Thumb	0.5 N	2.0 N	6.0 N	0.5 N	2.0 N	6.0 N	0.5 N	2.0 N	6.0 N



N=9

医療分野における応用例

- 手術支援：術具の位置決め（侵入回避） ・ 組織の牽引（損傷回避）
- 手技訓練：歯科領域における歯型彫刻手技の学習



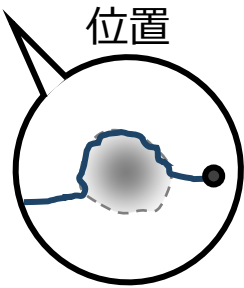
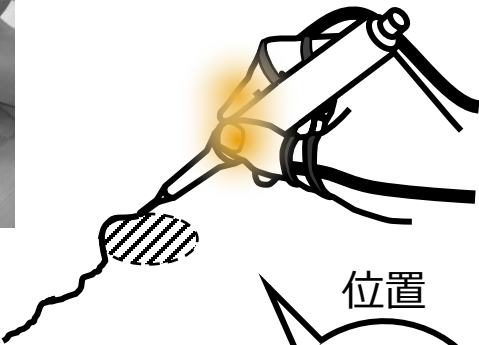
電気触覚ディスプレイの医療分野における応用

吉元俊輔, 電気触覚重畳による手術手技教示, システム/制御/情報 (解説), 2022

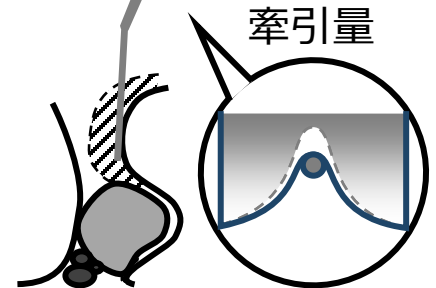
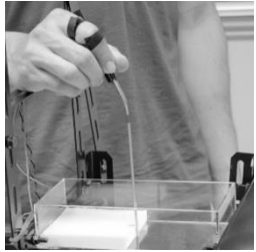
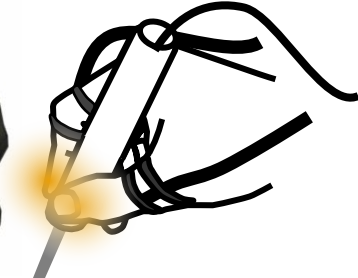
術具の位置決め (侵入回避)

組織の牽引 (損傷回避)

歯型彫刻手技の学習



位置



牽引量



角度

生体医工学シンポジウム2010
ベストリサーチアワード

生体医工学シンポジウム2011
ベストリサーチアワード

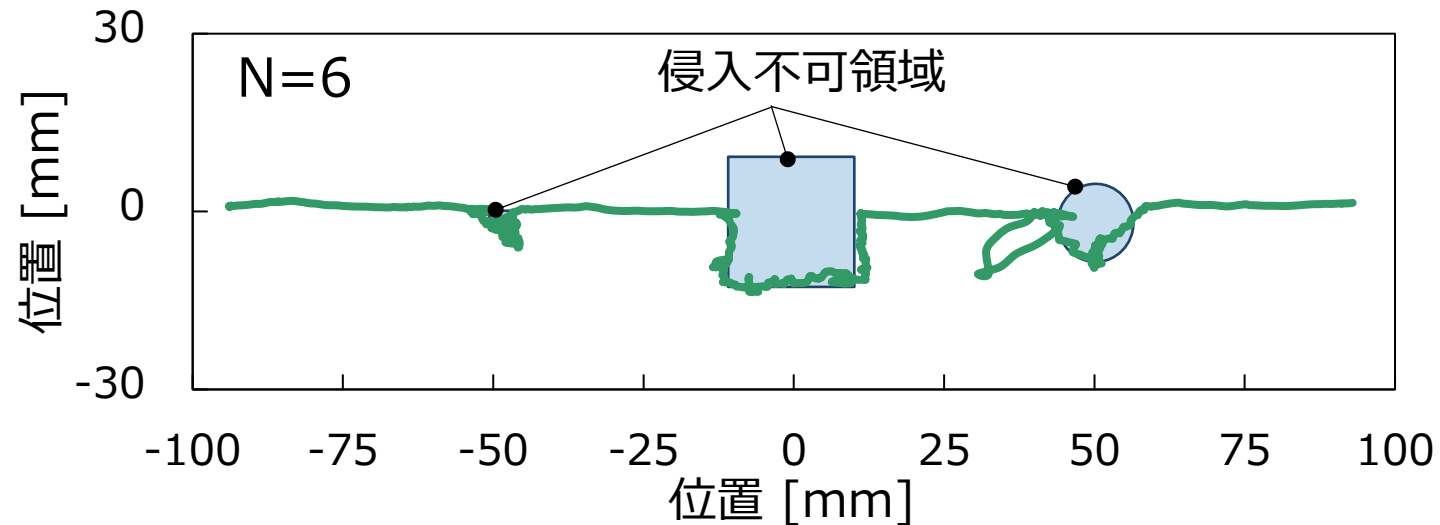
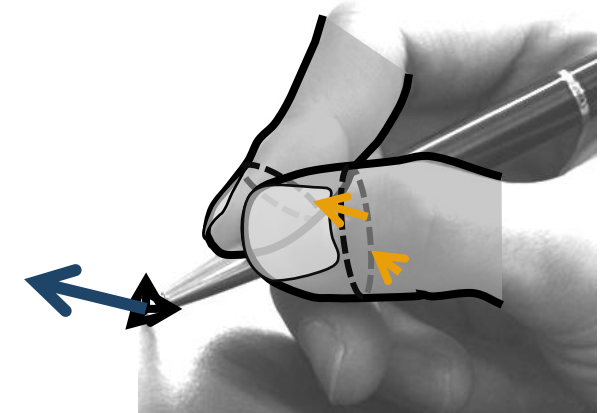
JST A-STEP 2013年度FSステージ
シーズ顕在化タイプ採択

電気触覚フィードバックにより術具の操作を誘導・教示することはできるか？

危険領域への侵入回避に関する実験

なぞり操作中にカベクトルに対応する触覚を重畳

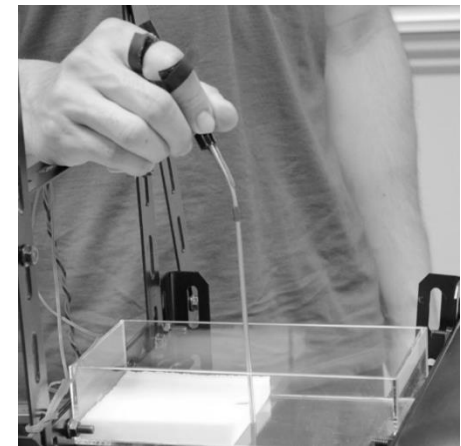
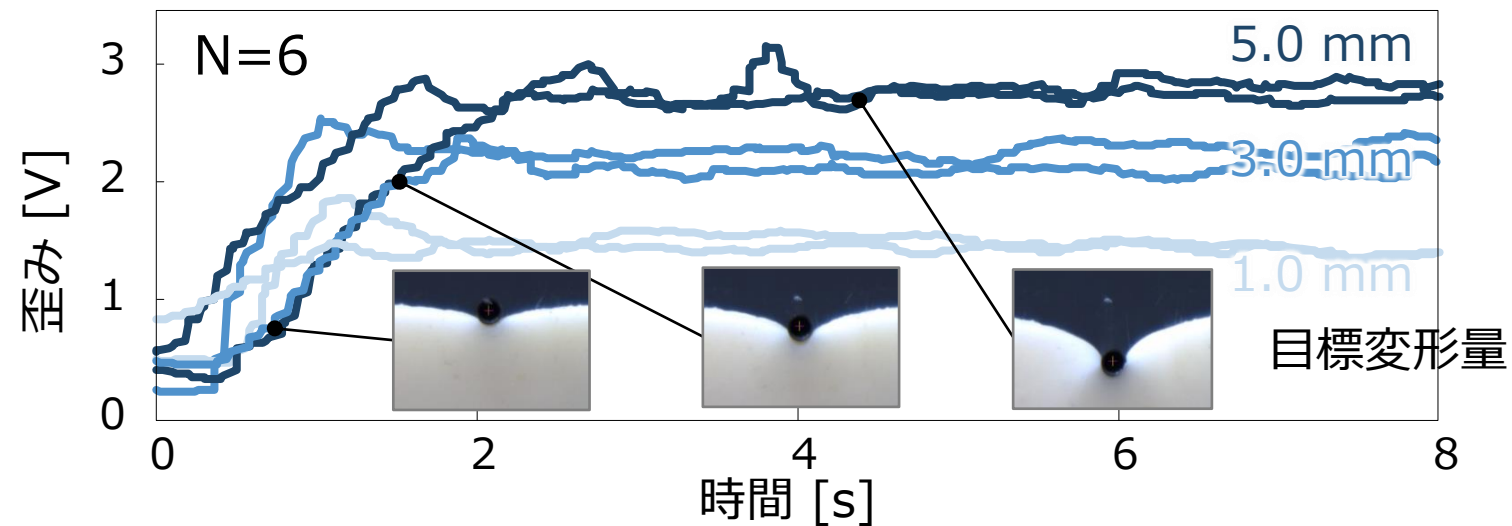
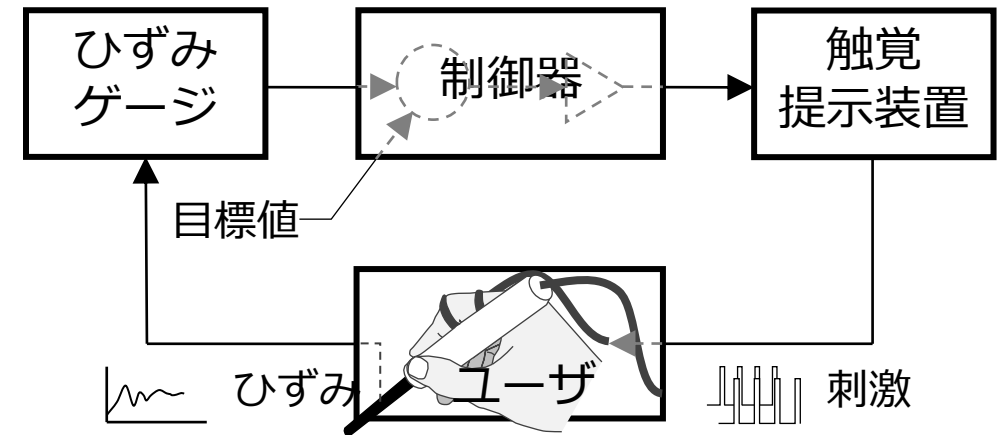
- 見えない仮想物体の境界面をなぞることが可能
- 仮想物体への侵入を3 mm以下で操作可能
- 外科手術における重要部位損傷回避に利用可



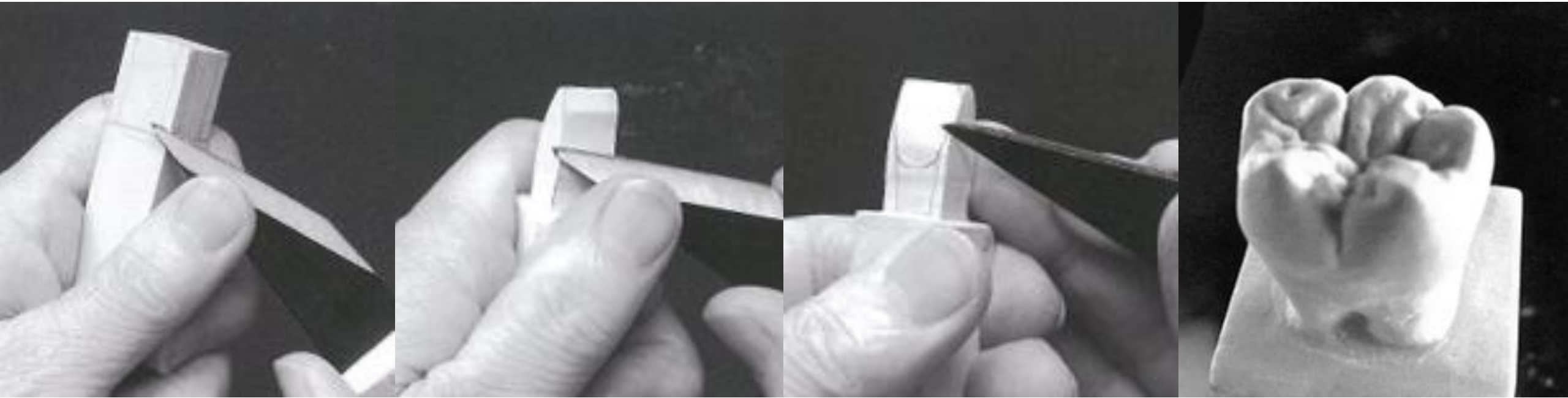
物体の牽引操作の力を教示する実験

道具のひずみから牽引量を推定し誤差を教示

- 精度：目標値の3% 以下
- 変動：変形量換算で0.2 mm以下
- 組織牽引操作での利用が可能

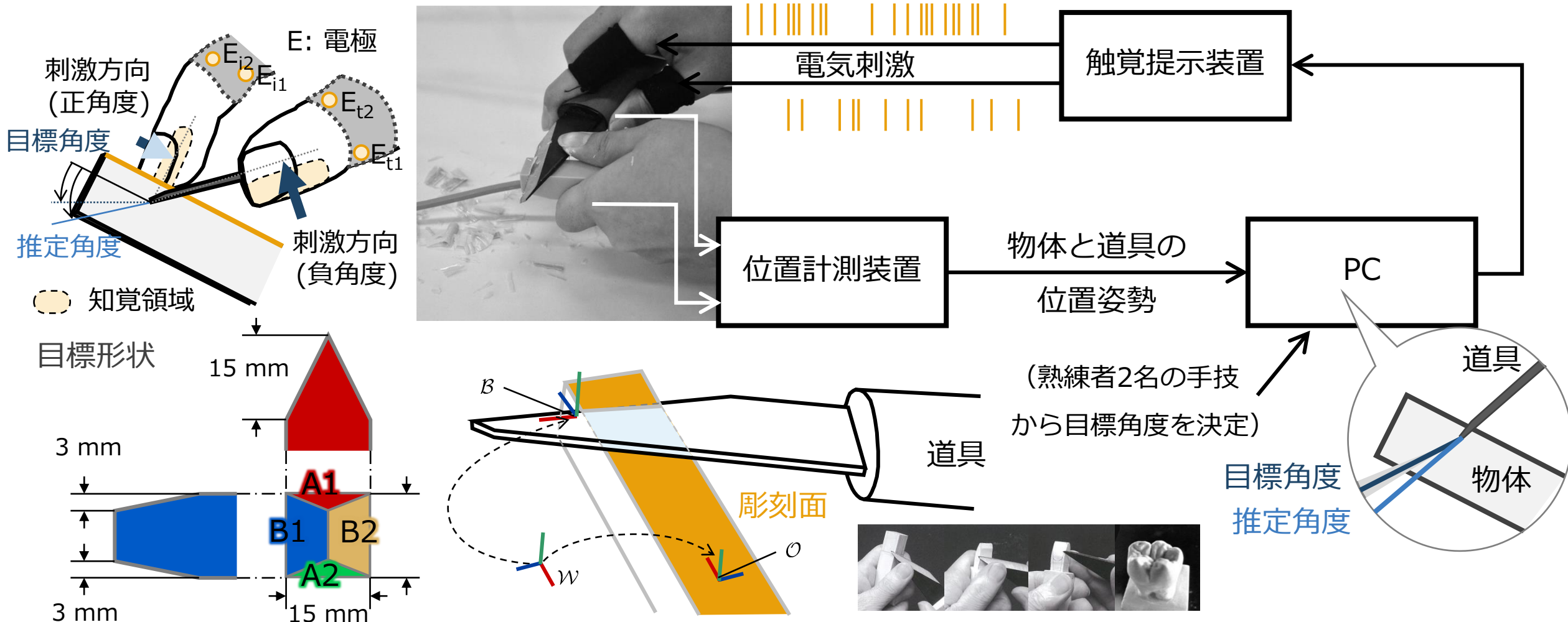


齒型彫刻



歯科技工士の技能教育への応用

S. Yoshimoto et al., IEEE Transactions on Haptics, 2016



目標角度 (熟練者から取得) との誤差に応じて指先に電気触覚を重畳して角度を教示

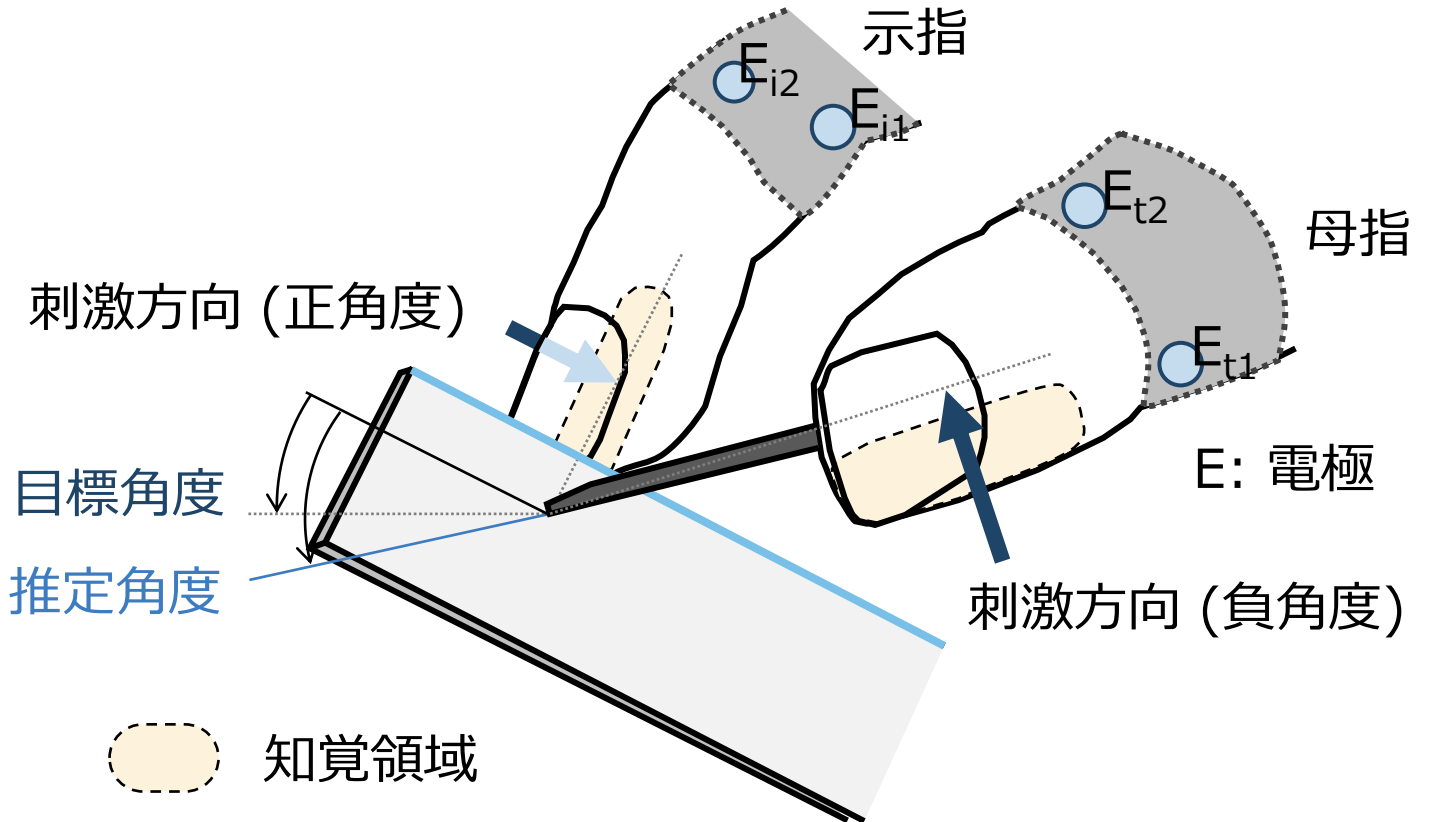
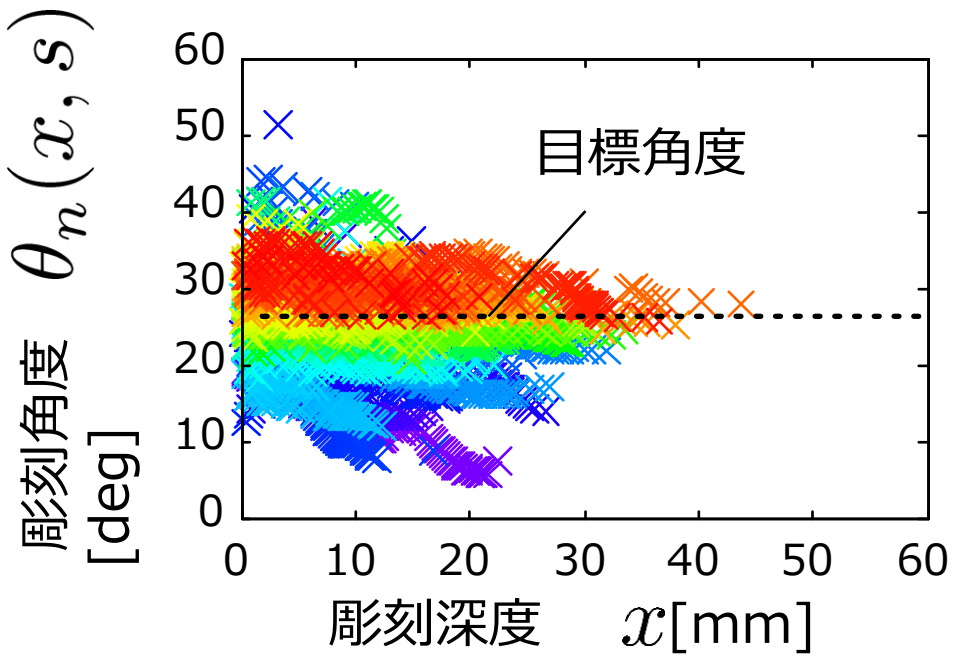
角度の教示 (刺激計算)

$$f = \begin{cases} \alpha \left(\frac{|\phi - \theta_n(x, s)|}{\sigma_n} - 3 \right) & \text{if } |\phi - \theta_n(x, s)| > 3\sigma_n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

分散
目標角度

刺激パルス周波数

推定角度



指先への触覚重畳がもたらす効果を検証

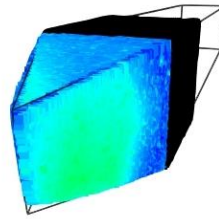


- 触覚フィードバック
- 聴覚フィードバック
- フィードバックなし

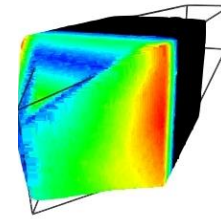
彫刻成果物



高精度

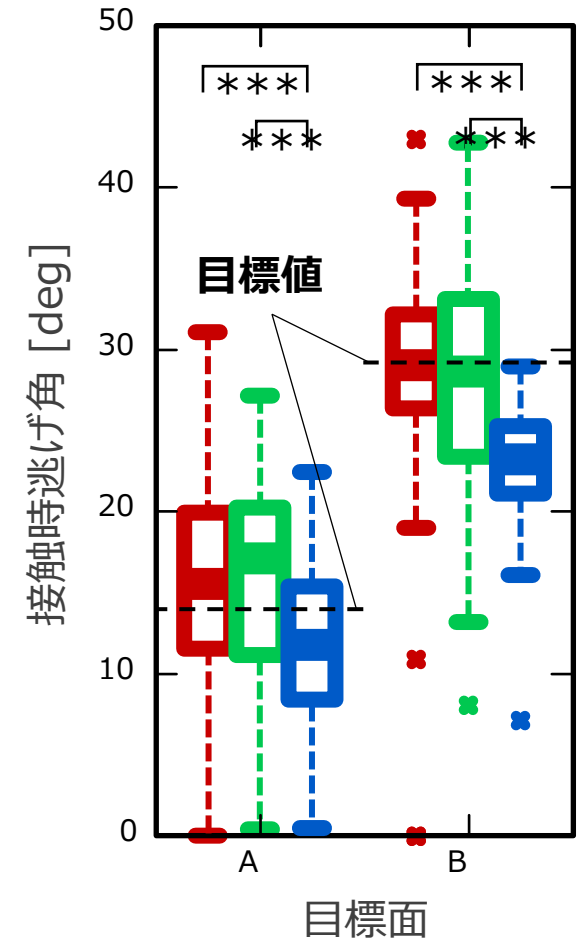
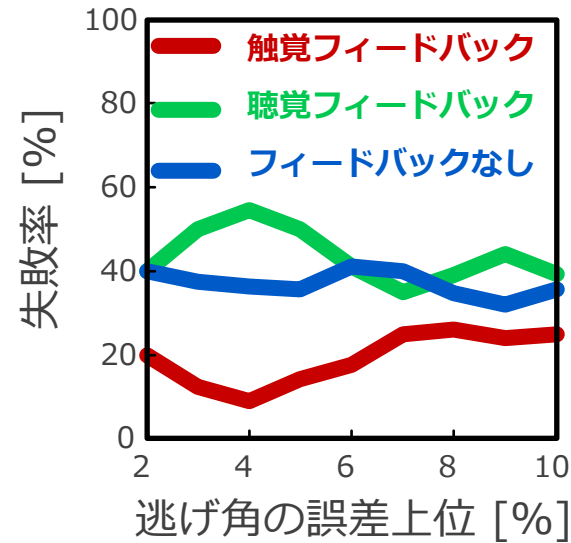
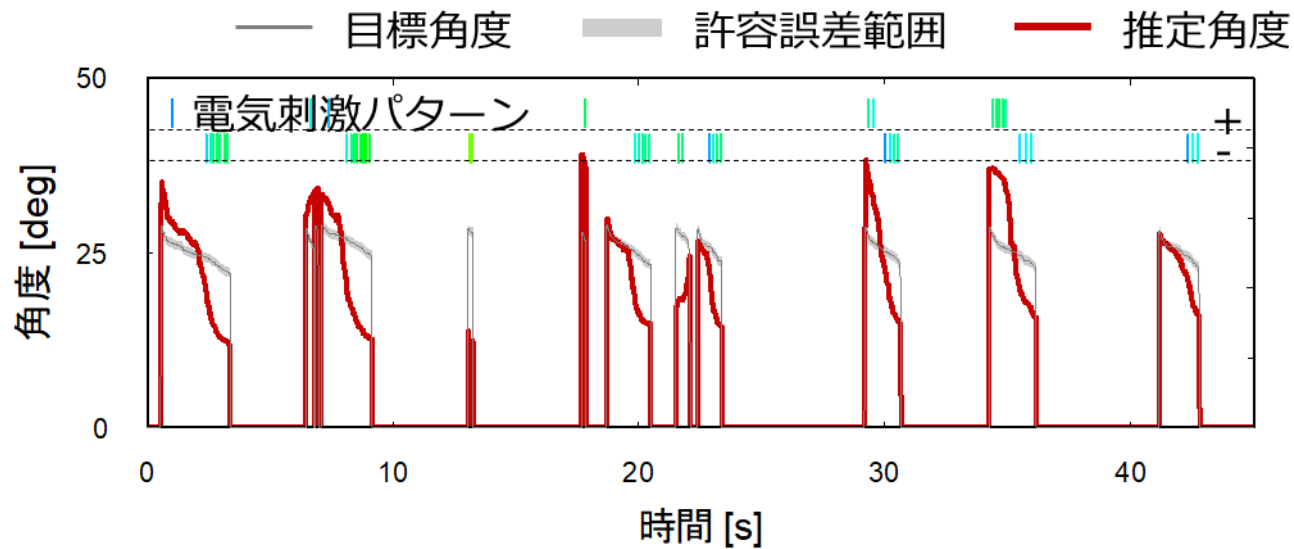


低精度



誤差絶対値 [mm]

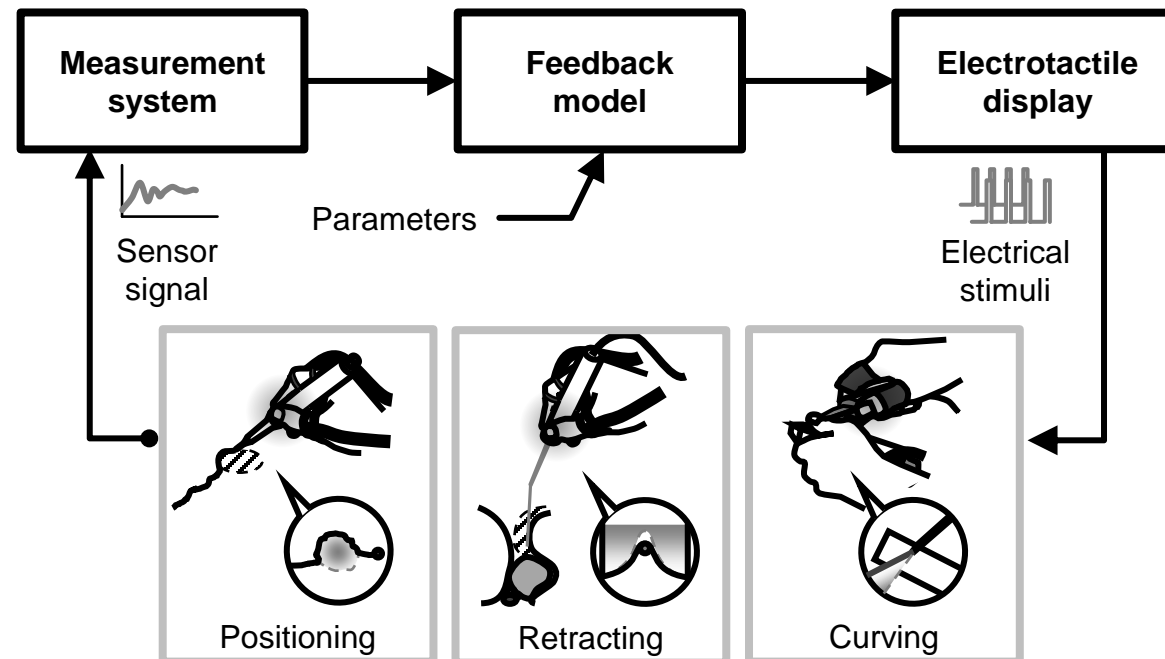
専門学生12名, 各条件2回



触覚提示で逃げ角を目標値に近づけることが可能, 彫刻の失敗率を軽減できる

電気触覚フィードバックによる作業支援のまとめ

- 操作に関連した情報に基づいて触覚刺激を与え，作業を効率化
- 操作と提示が適切に連動することが重要，特に安定性に貢献
- 手術支援：術具の位置決め（侵入回避） ・ 組織の牽引（損傷回避）
- 手技訓練：歯科領域における歯型彫刻手技の学習



応用可能性について

- 技能訓練：操作を阻害せず空間的な情報をわかりやすく提示
- 遠隔操作：遠隔ロボット手術等における触感情報の伝達
- ゲーム用リモコン：リモコン操作感覚の提示
- プロトタイピングシステム：商品の質感設計
- 人工触覚：神経損傷患者のための触覚機能補助

- 課題：
電気刺激の安定化，個人差の軽減，刺激調整の簡略化，電気刺激特有の不快感

電気刺激関連発表文献

1. 吉元俊輔, 電気触覚重畳による手術手技教示, システム/制御/情報 (解説), 2022
2. S. Yoshimoto et al., "Electrotactile Augmentation for Carving Guidance", IEEE Transactions on Haptics, 9(1): 43-53, 2016.
3. S. Yoshimoto et al., "Material Roughness Modulation via Electrotactile Augmentation", IEEE Transactions on Haptics, 8(2): 199-208, 2015.
4. 吉元ら, "組織牽引支援のための歪計測に基づく電気触覚フィードバック", 生体医工学, 50(1): 84-91, 2012.
5. 吉元ら, "空間透明型電気触覚ディスプレイの開発と道具操作支援への応用", 生体医工学, 49(1): 54-61, 2011.
6. 黒田ら, "空間透明型触覚提示装置および道具操作支援システム", 特許5549979号.
7. S. Yoshimoto et al., "Development of a Spatially Transparent Electrotactile Display and Its Performance in Grip Force Control", In Proceedings of EMBC 2011.
8. 吉元俊輔, 黒田嘉宏, 井村誠孝, 大城理, 物体表面の自己相似性を伝える電気触覚パルス頻度変調. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.16, No.3, pp.307-315, 2011.
9. S. Yoshimoto et al., "Tactile Mapping Approach using Electrical Stimulus Pattern", In Proceedings of IEEE RO-MAN 2009.