

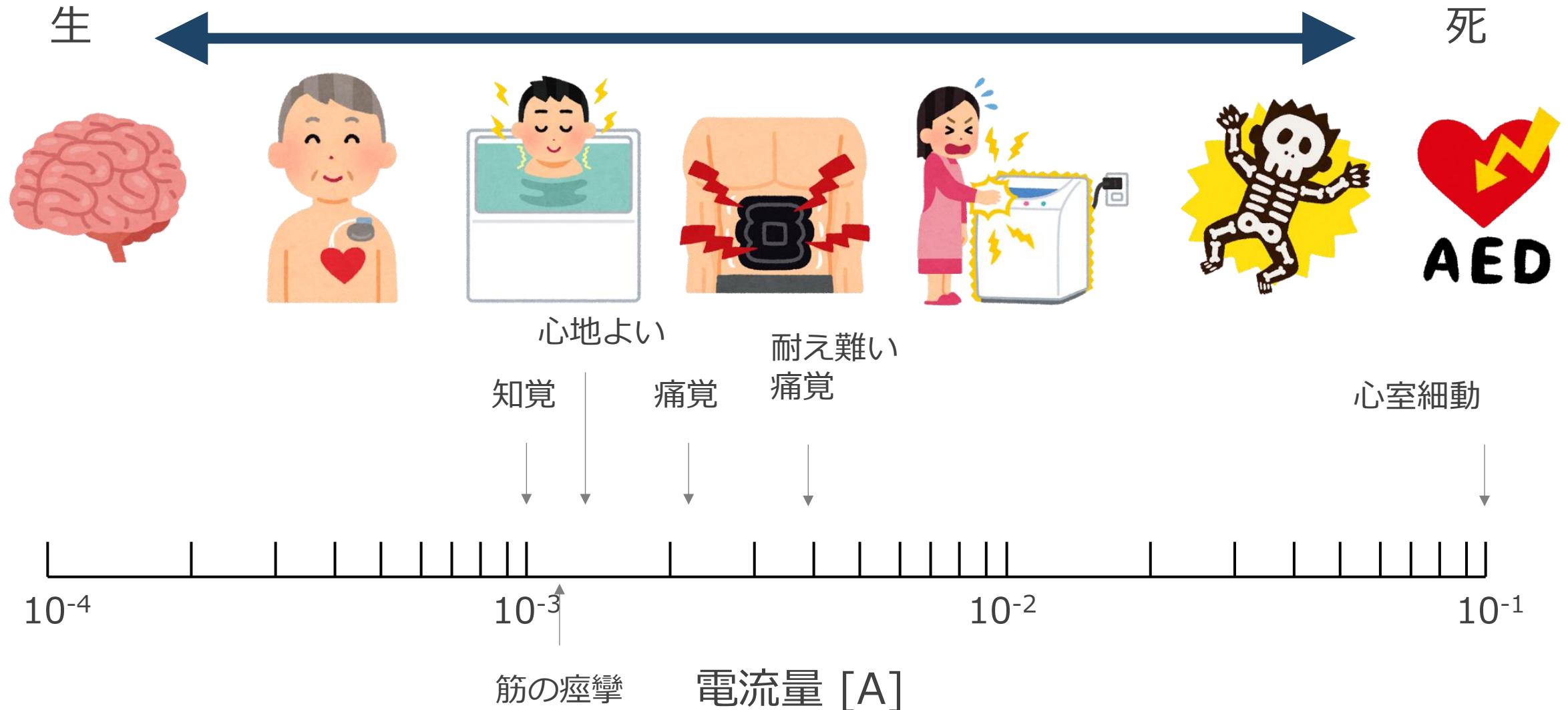
電気触覚ディスプレイに関する研究

大阪大学 大学院工学研究科

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

吉元俊輔

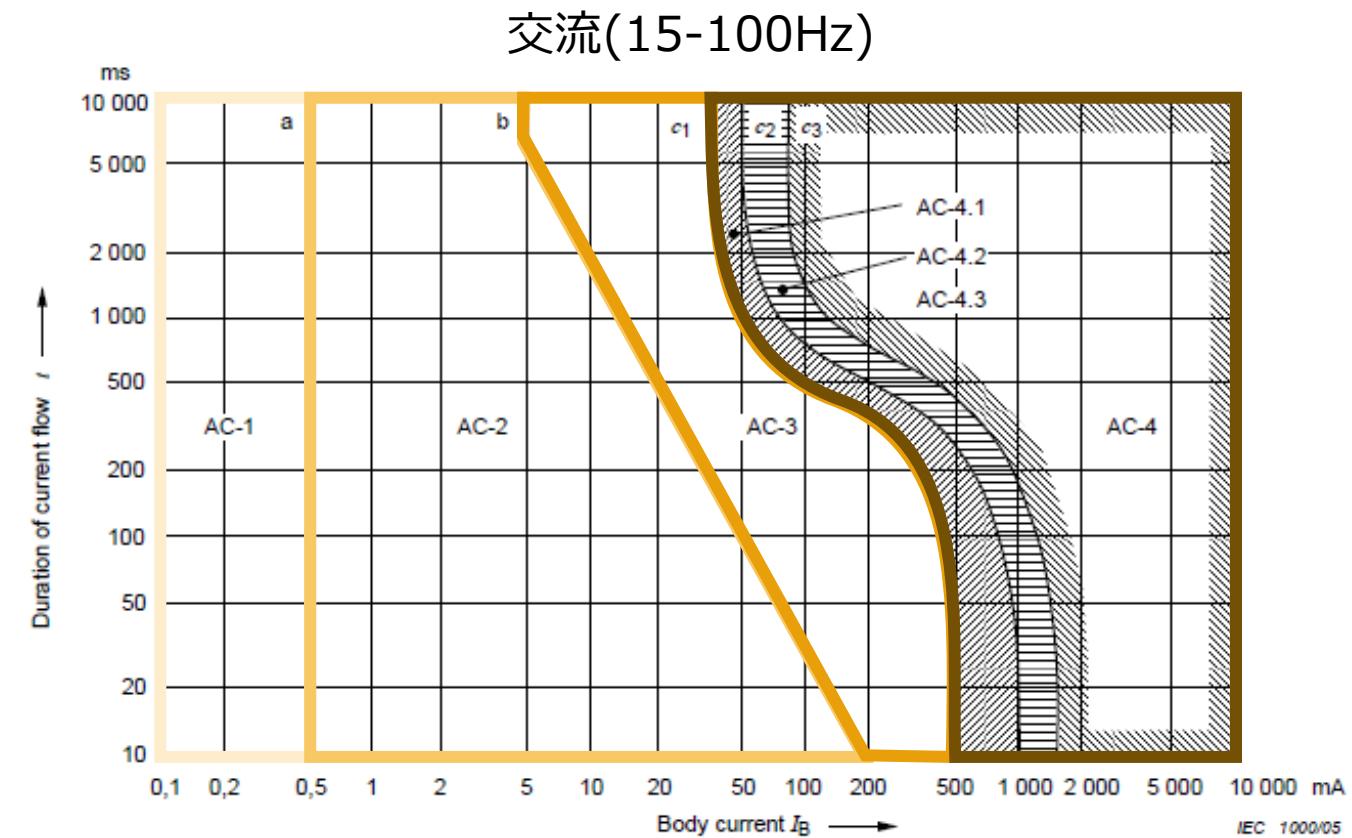
電気と生体反応



電流量と生体反応

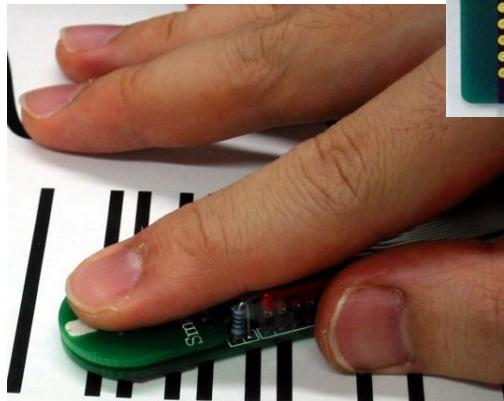
IEC TS 60479-1:2018, Effects of current on human beings and livestock –

- 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

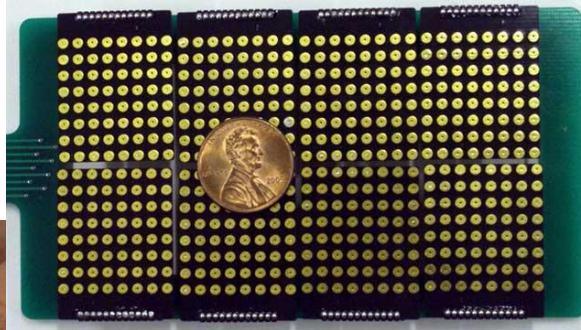


電気刺激による触覚提示

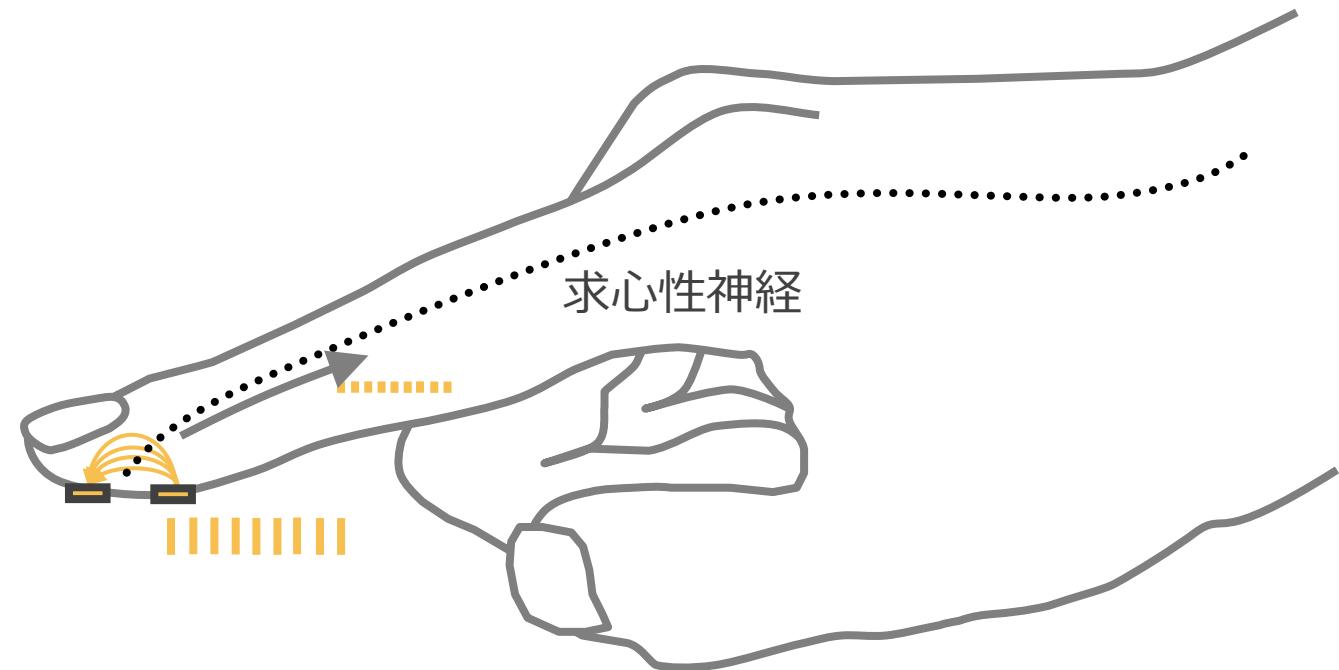
- ・皮膚上に配置した電極から皮下組織に微弱な電流を流す
- ・触覚を感受する受容器の神経が活性化され、感覚が発生



Kajimoto, et al.,
Smart touch, 2002.

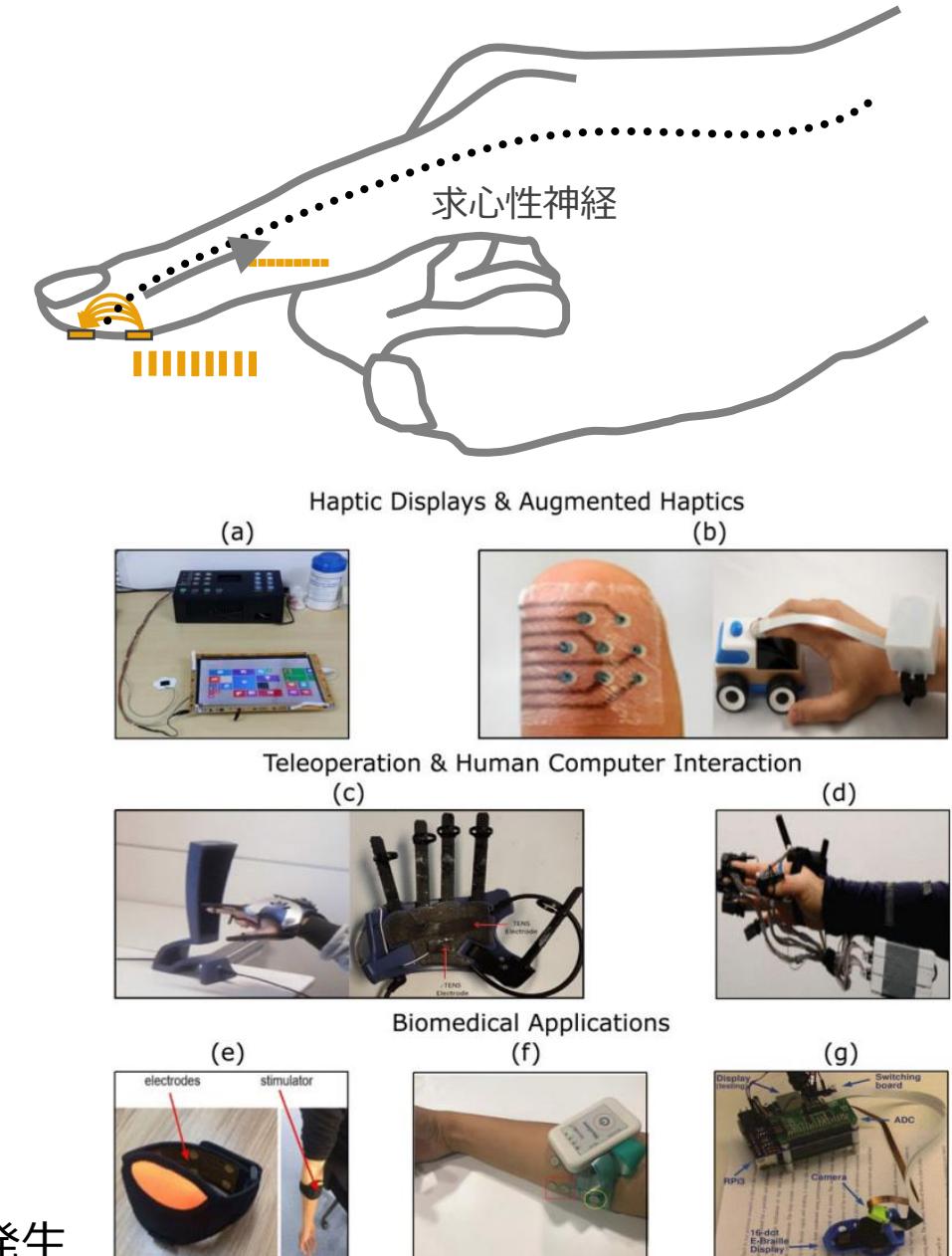
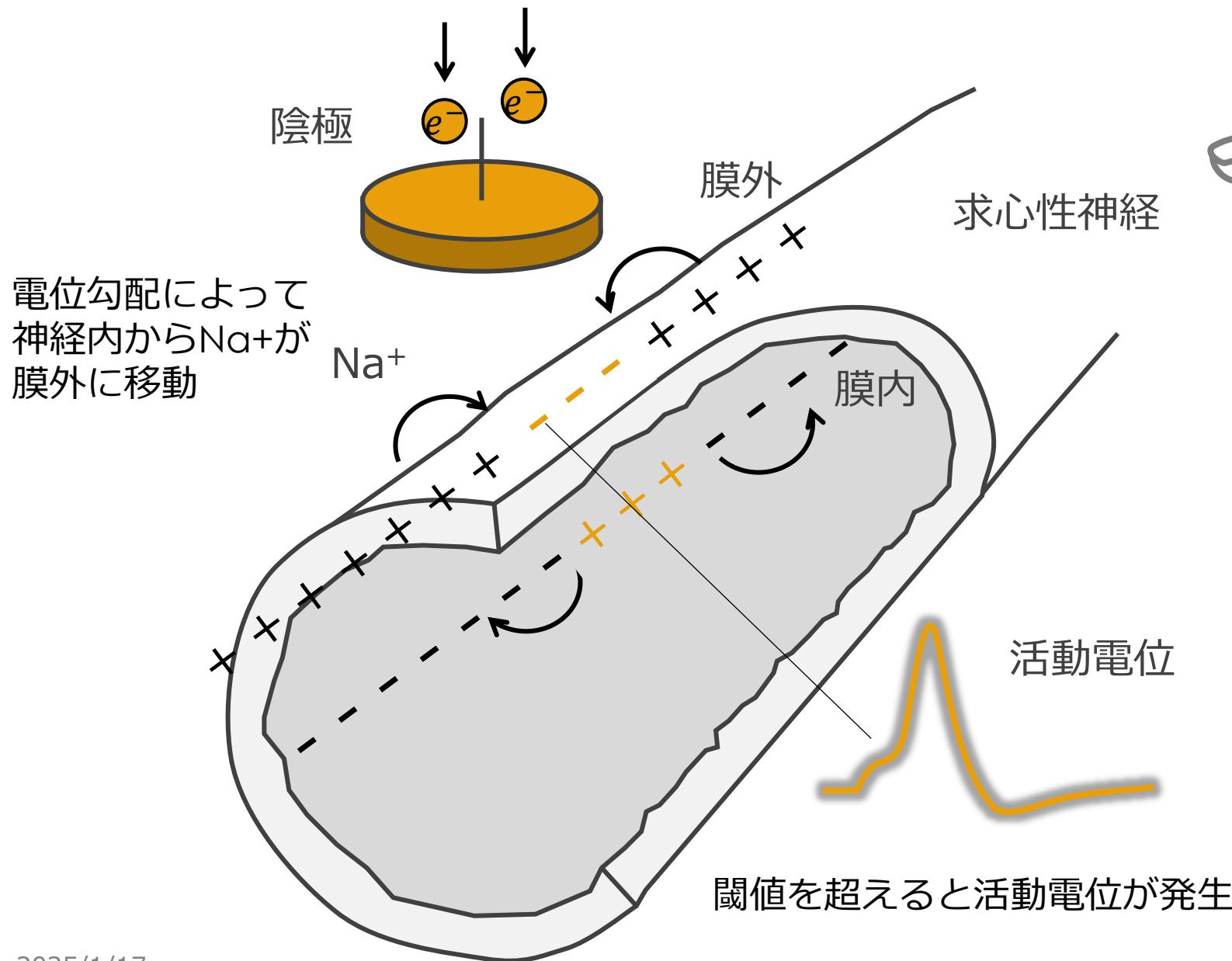


Kajimoto, et al.,
Forehead Retina System,
2006.

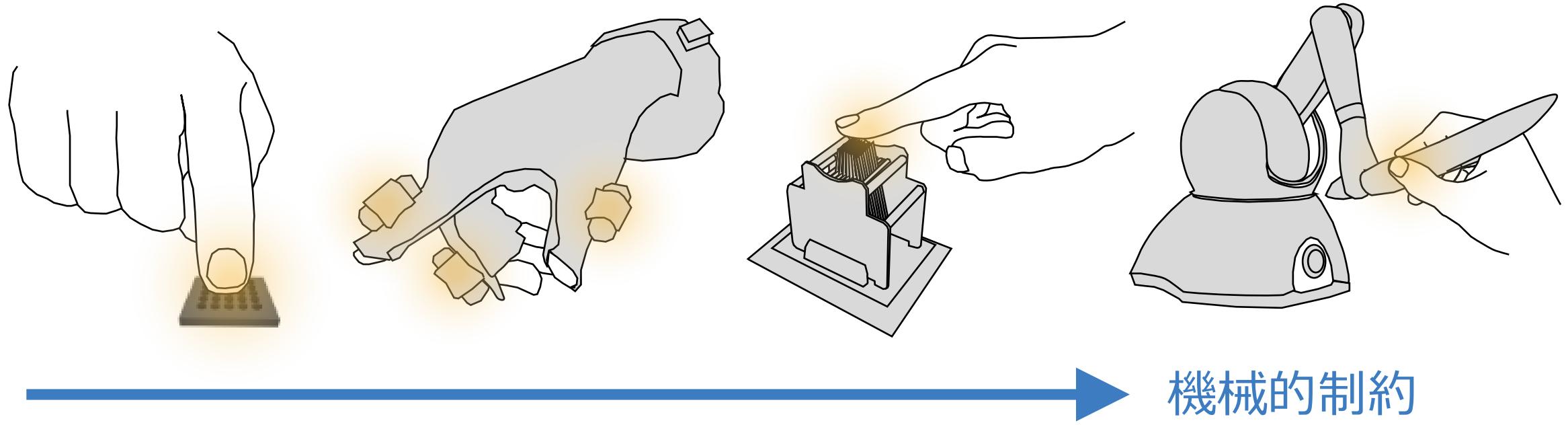


神経束の途中の経路で刺激を入力することはできないのか？

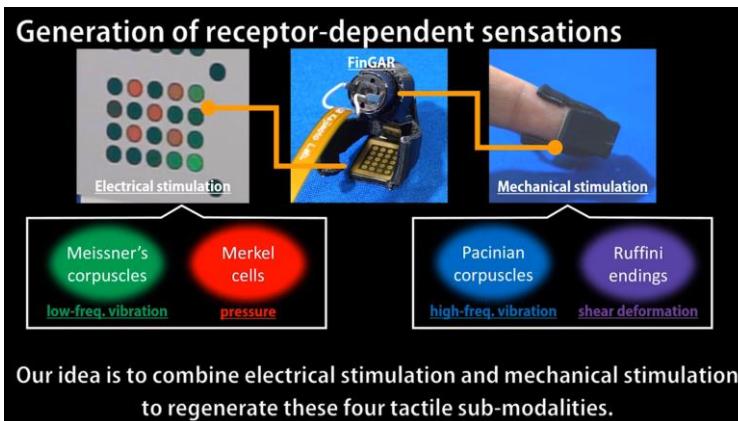
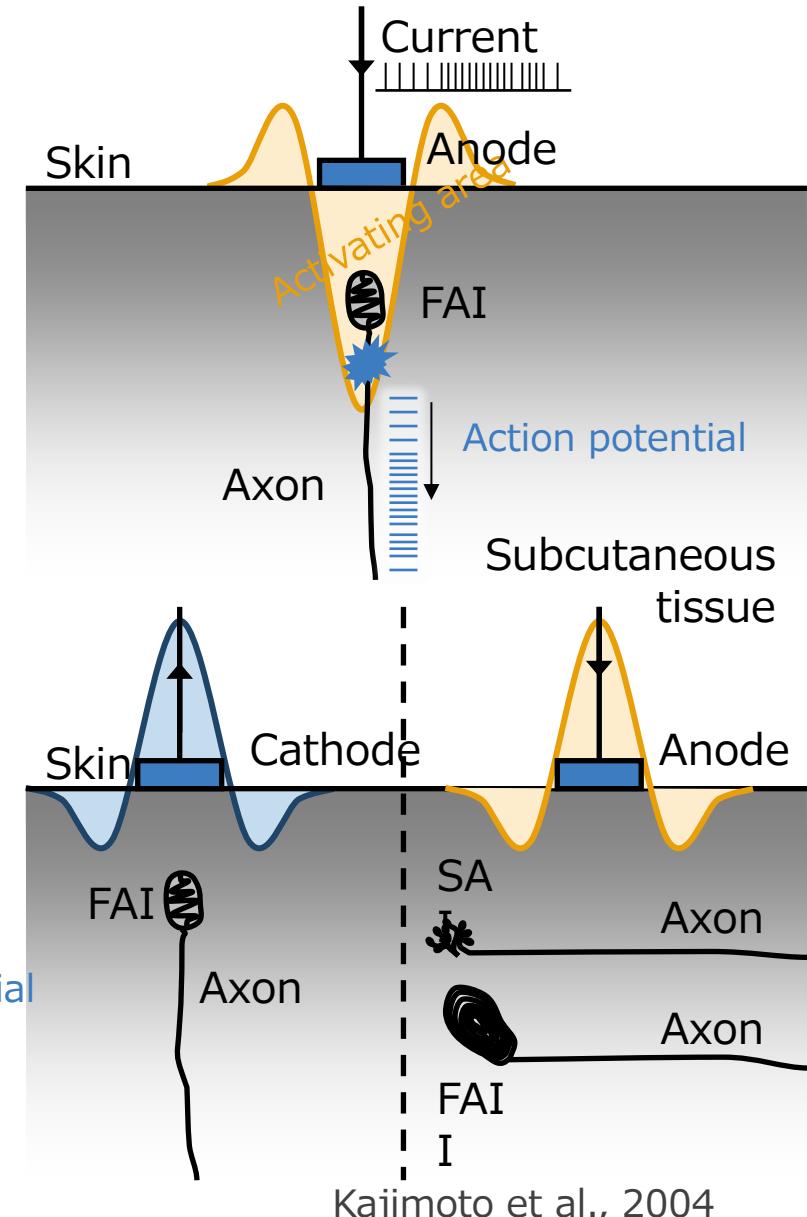
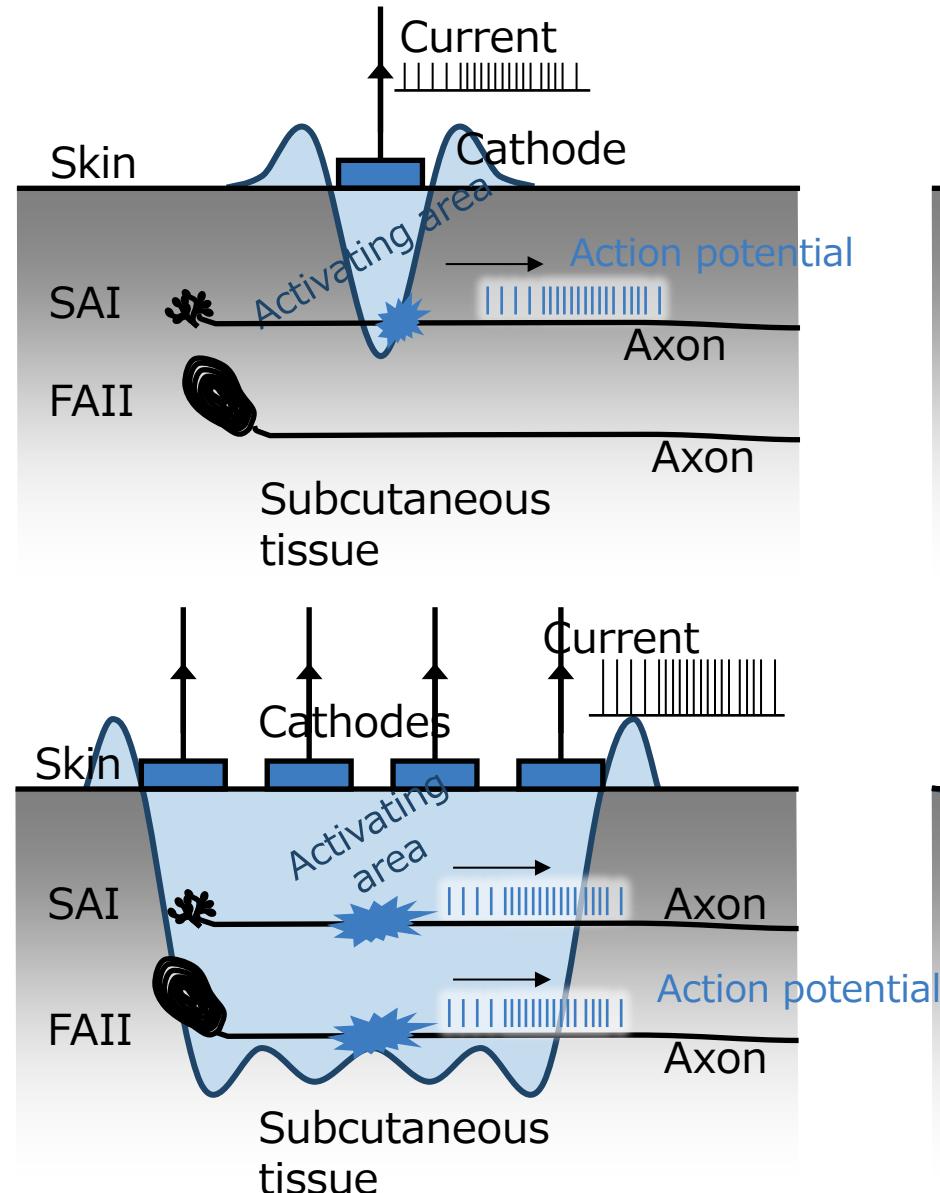
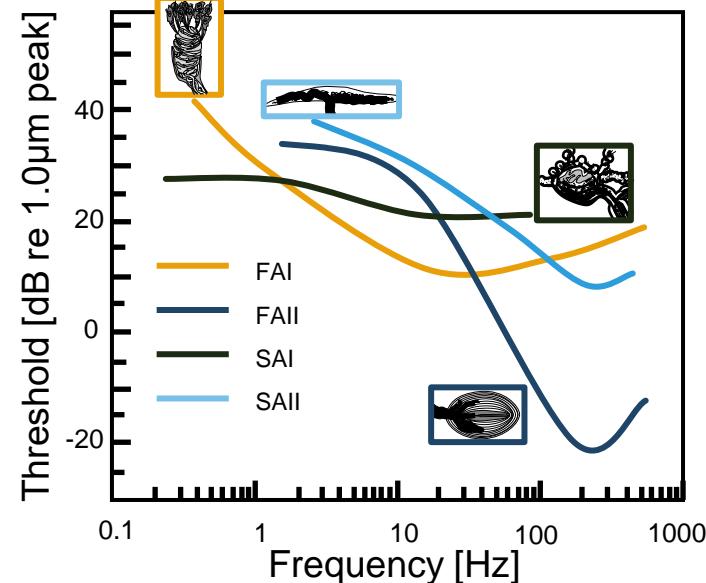
電気刺激による触覚提示



従来の力触覚ディスプレイ

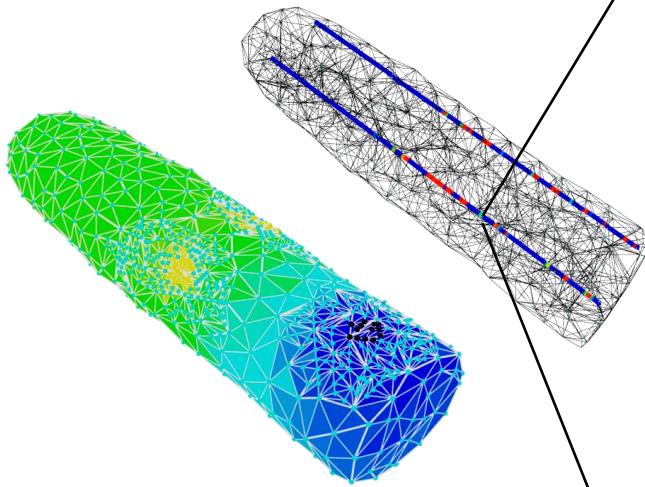


触覚提示における受容器の選択的刺激と合成

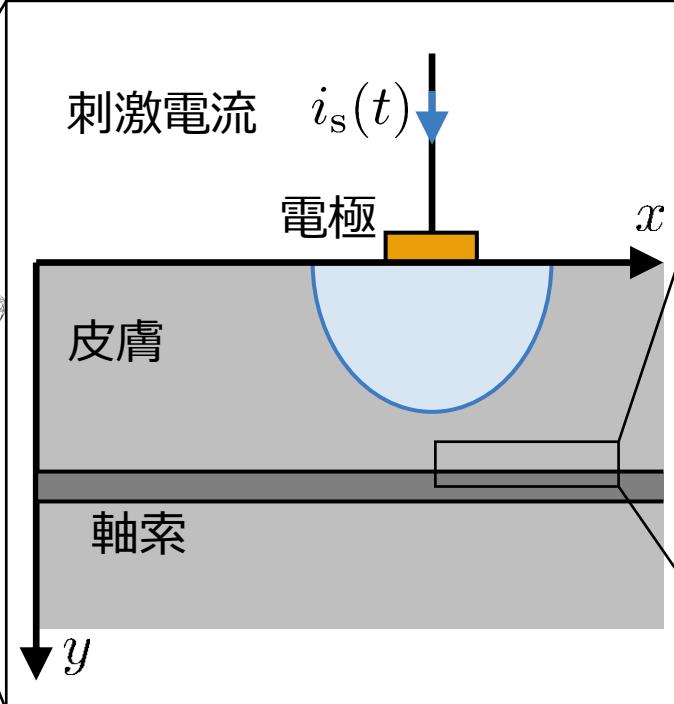


https://youtu.be/kB_uMeDtIk8

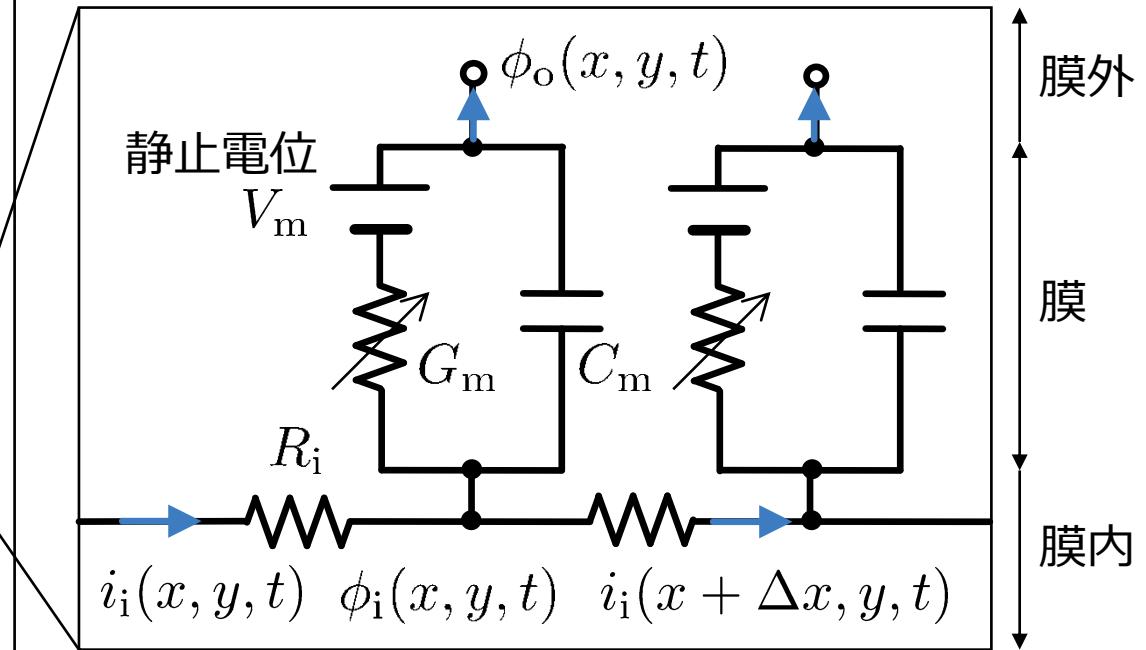
軸索方程式



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



McNeal, 1976



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

回路方程式 (静止膜電位を無視)

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

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

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

$$\tau = C_m / G_m$$

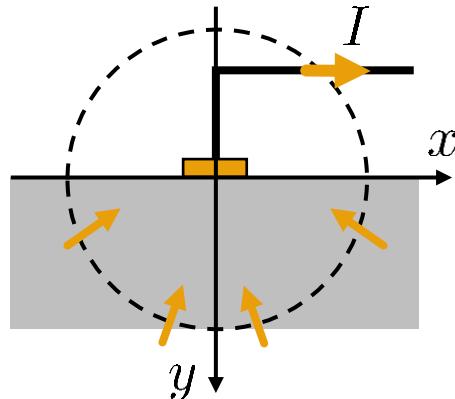
$$\kappa = G_m / R_i$$

神経活動が生じる条件

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

: 膜外の電位勾配により神経刺激が可能

体表電極(2D)による陰極電流が与える電界

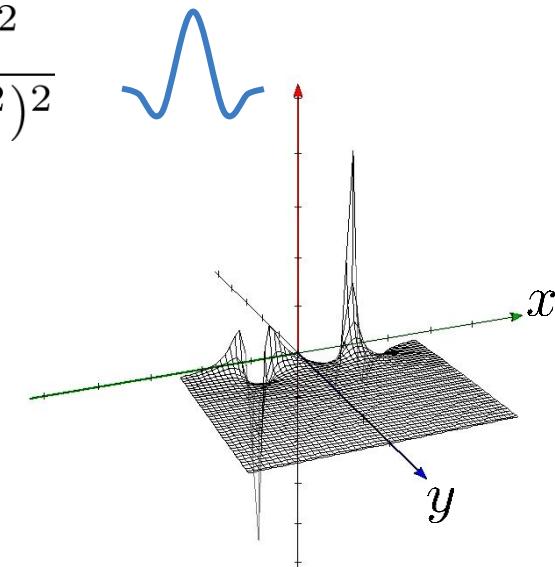


$$E = \frac{I}{2\pi\sigma\sqrt{x^2 + y^2}}$$

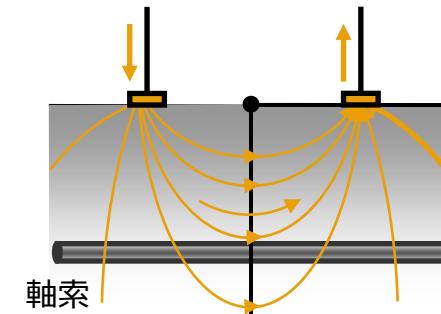
活性化関数 (Activating Function)

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

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



- 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



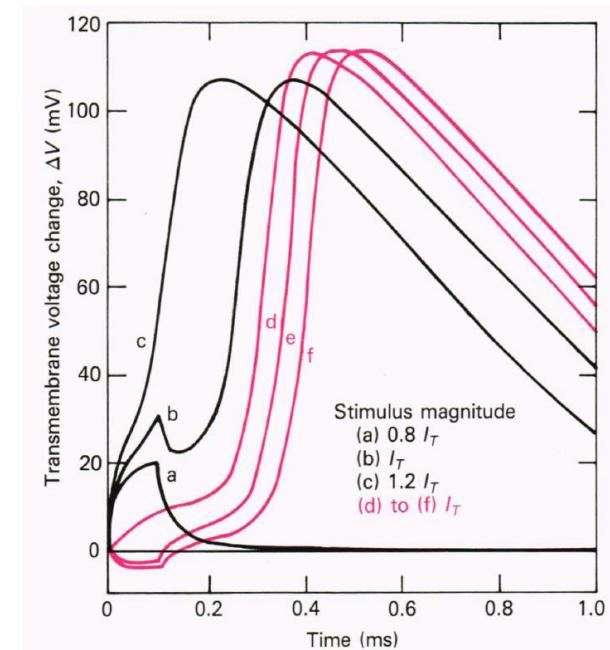
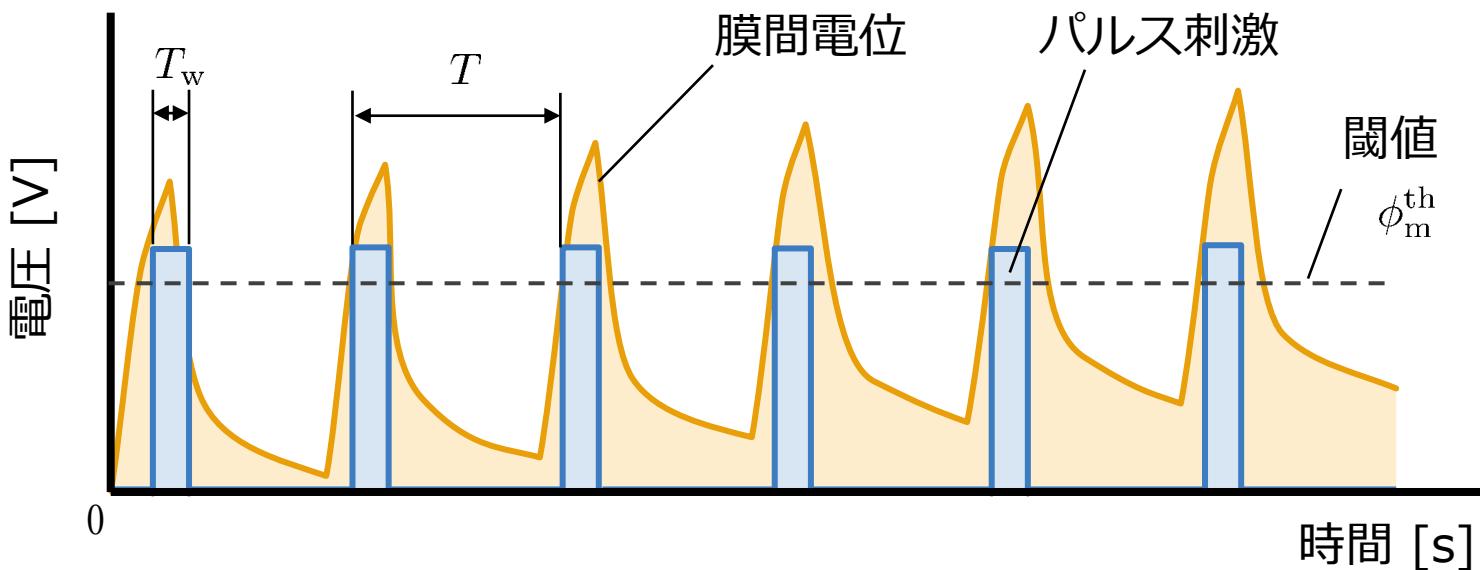
刺激波形と神経活動の関係

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

重み関数
(k_x 空間周波数領域)

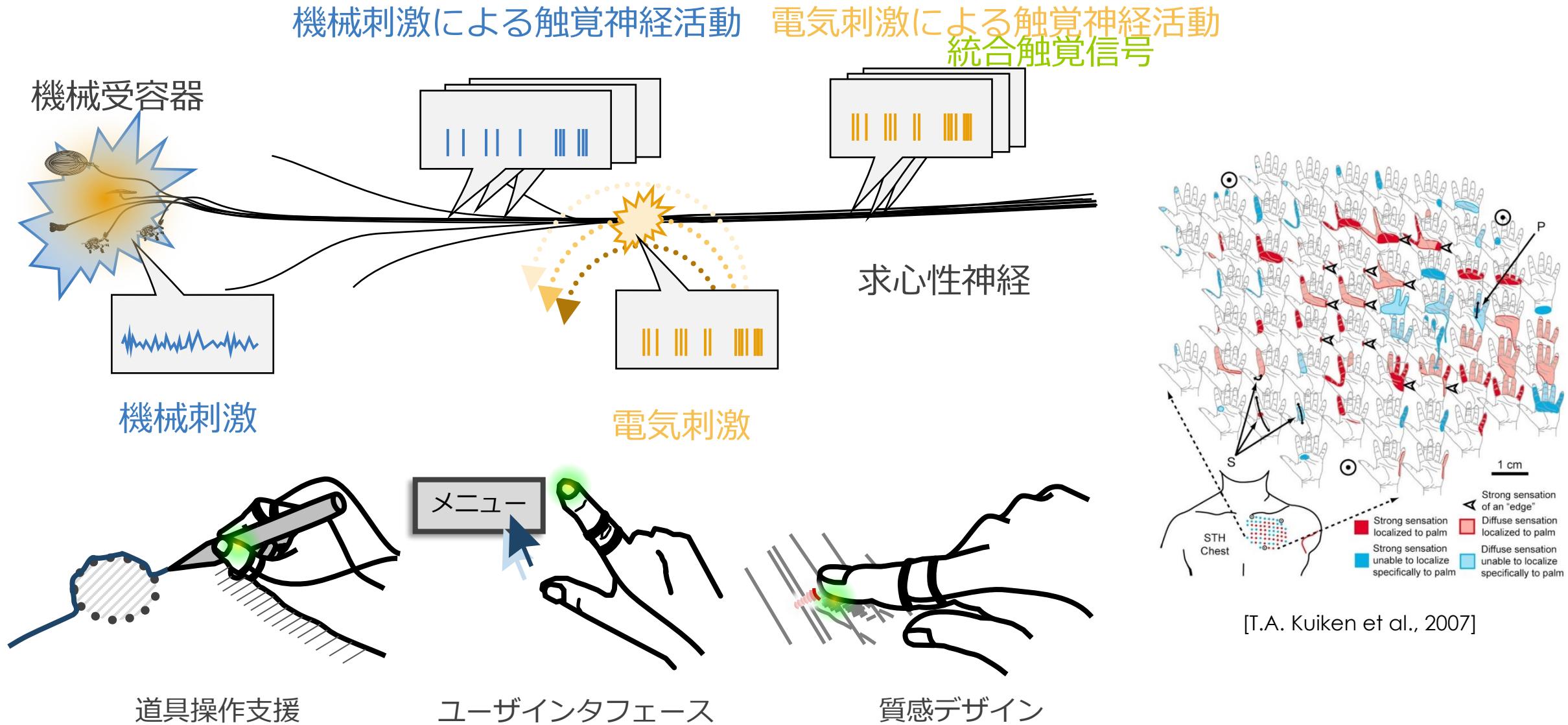
$\iota = \kappa k_x^2 + \tau, \quad \beta_{n1} = t - nT, \quad \beta_{n2} = \beta_{n1} - T_W$

100μsパルス刺激に対する応答



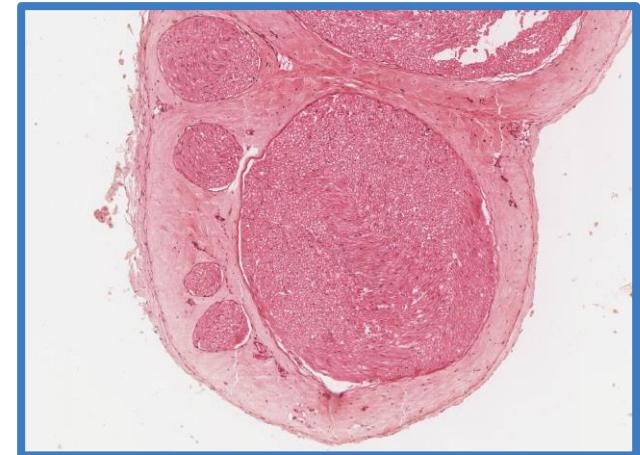
J.P. Reilly, 1985

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



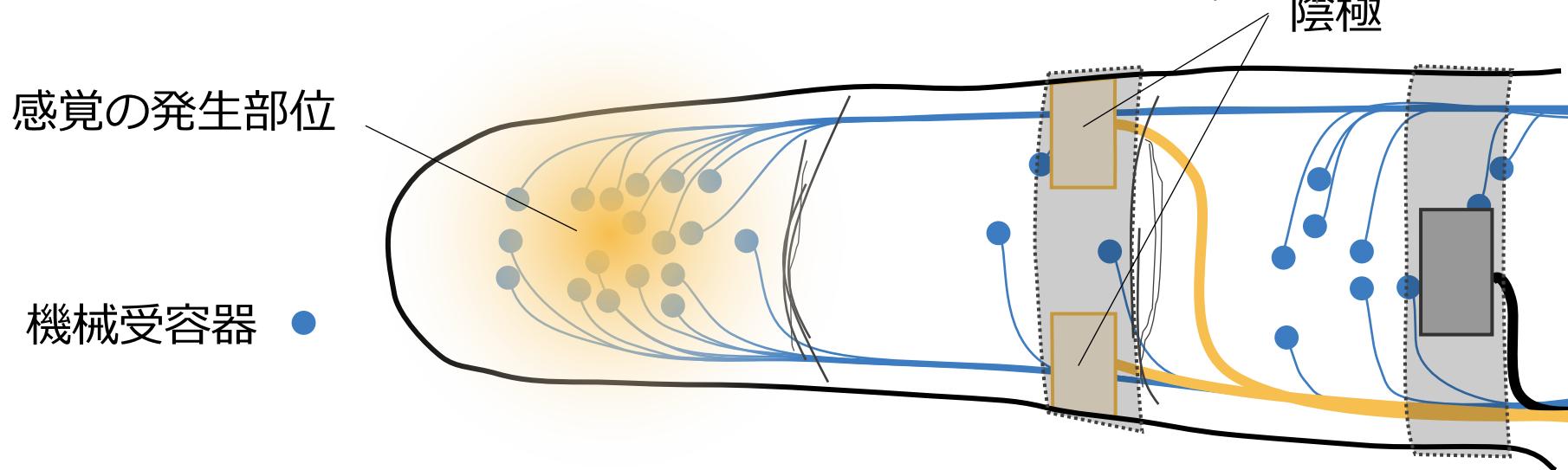
解剖学的アプローチ

- ・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



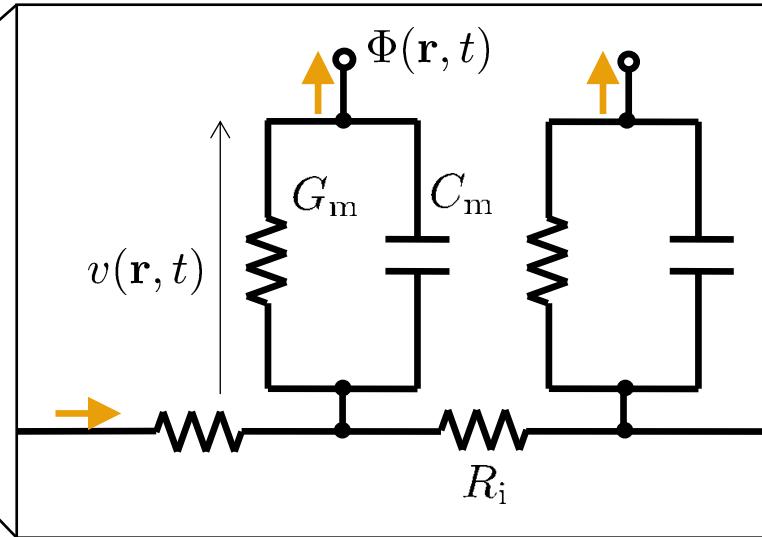
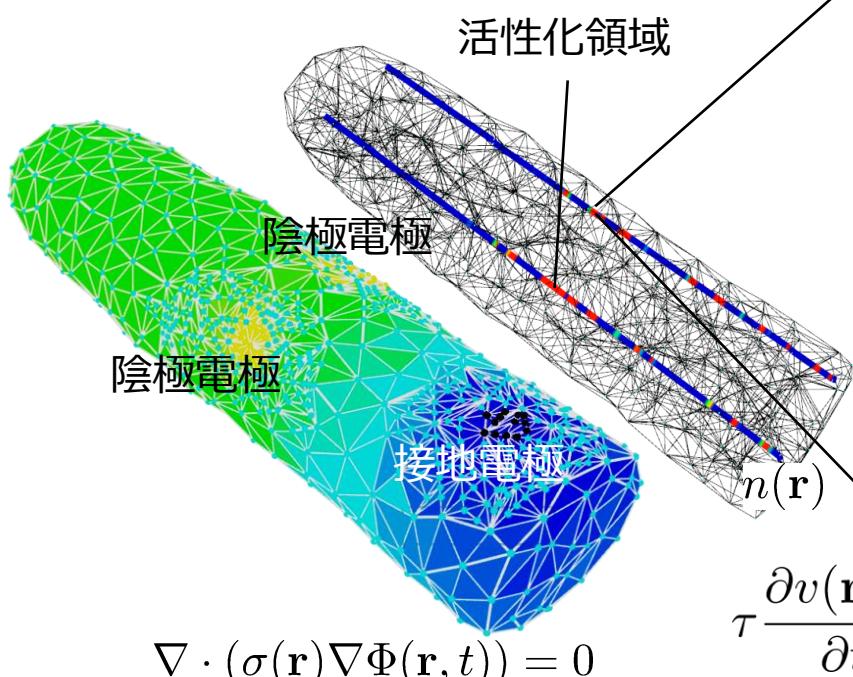
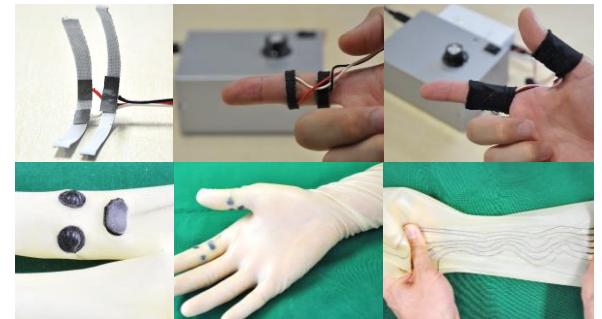
University of Michigan WebScope
http://virtualslides.med.umich.edu/Histology/Basic%20Tissues/Nervous%20Tissue/068_HISTO_40X.svs/view.apml

陰極

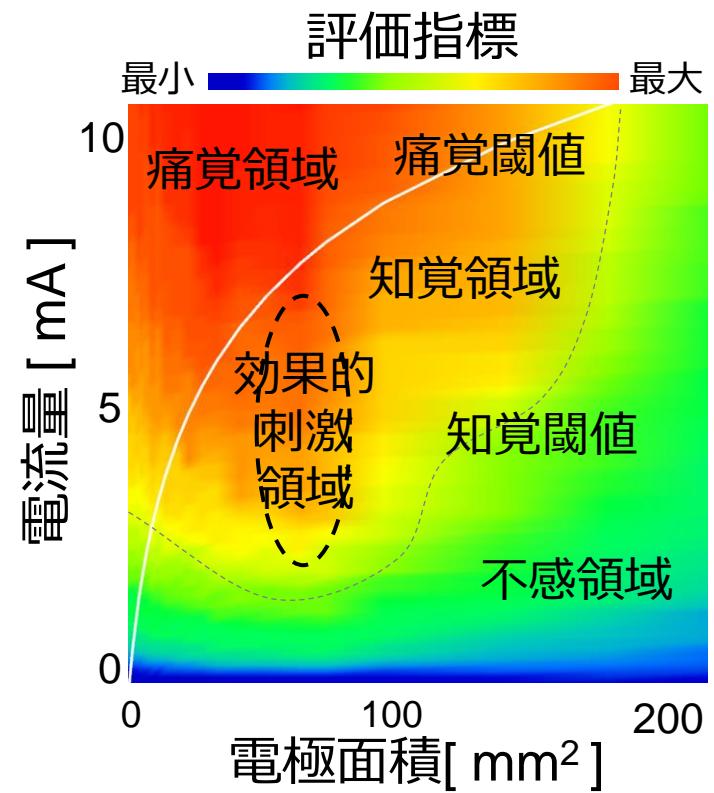


効果的な電極面積をシミュレーションにより探索

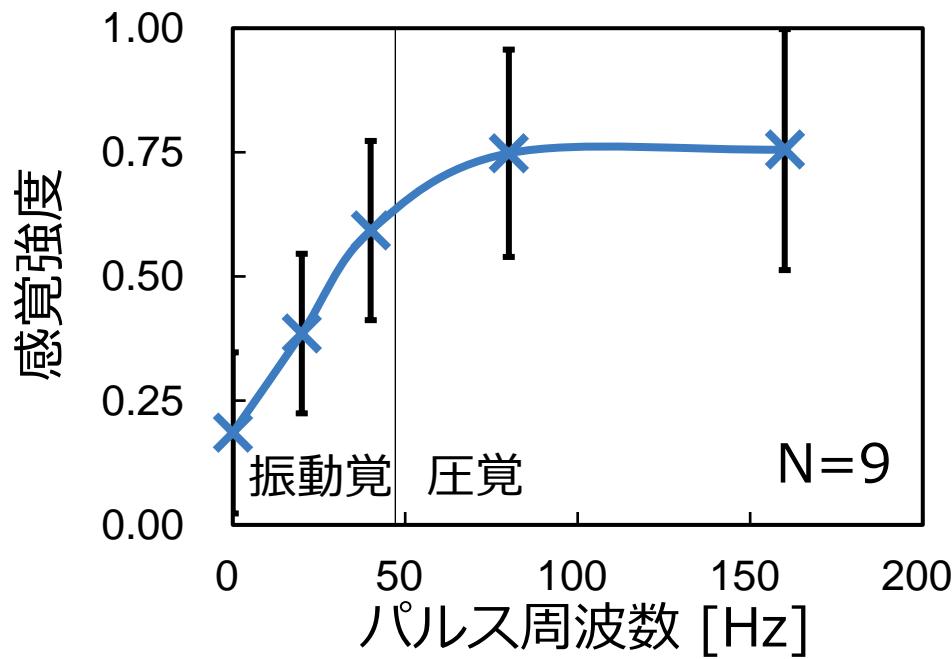
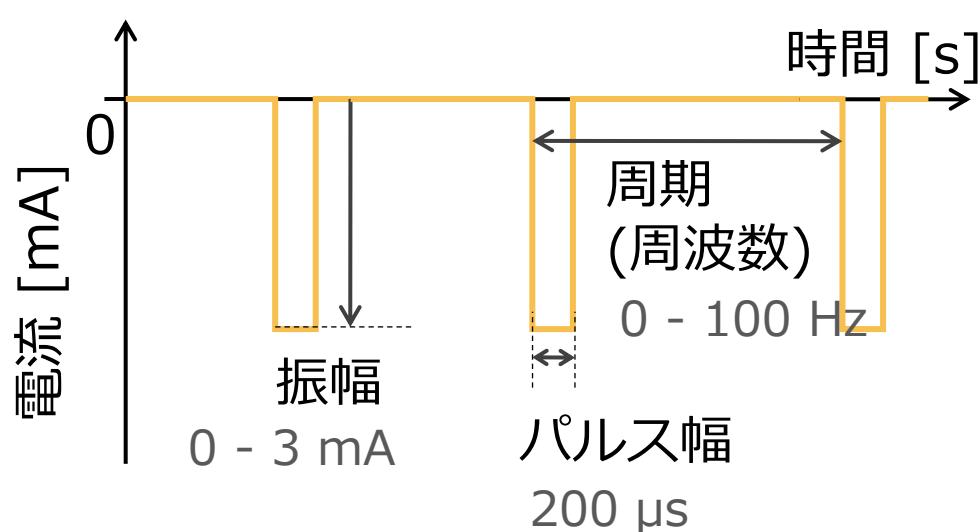
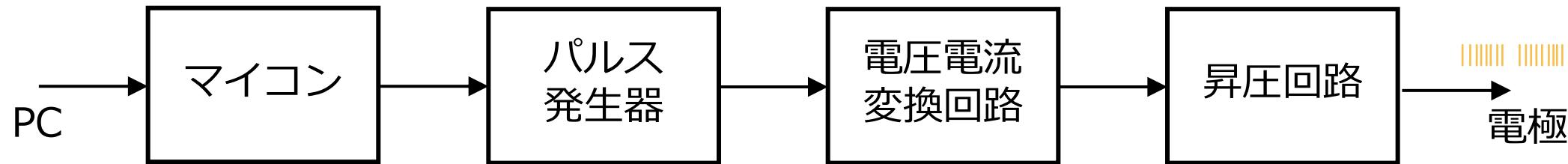
- ・**陰極電流**で皮膚表面に水平な神経を活性化可能
- ・電流量・電極面積が感覚に影響：面積64 mm²程度が良好



$$\tau \frac{\partial v(\mathbf{r}, t)}{\partial t} - \lambda \frac{\partial^2 v(\mathbf{r}, t)}{\partial n^2} + v(\mathbf{r}, t) = \lambda \frac{\partial^2 \Phi(\mathbf{r}, t)}{\partial n^2}$$

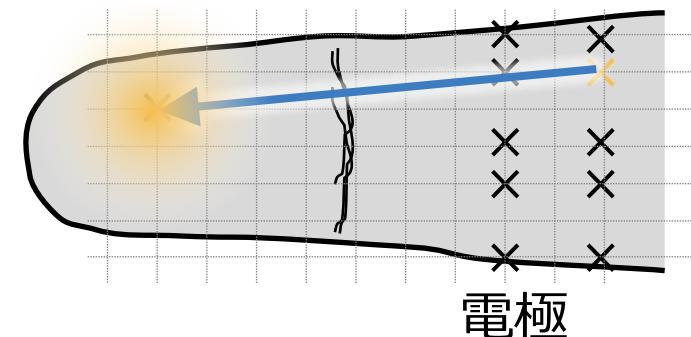
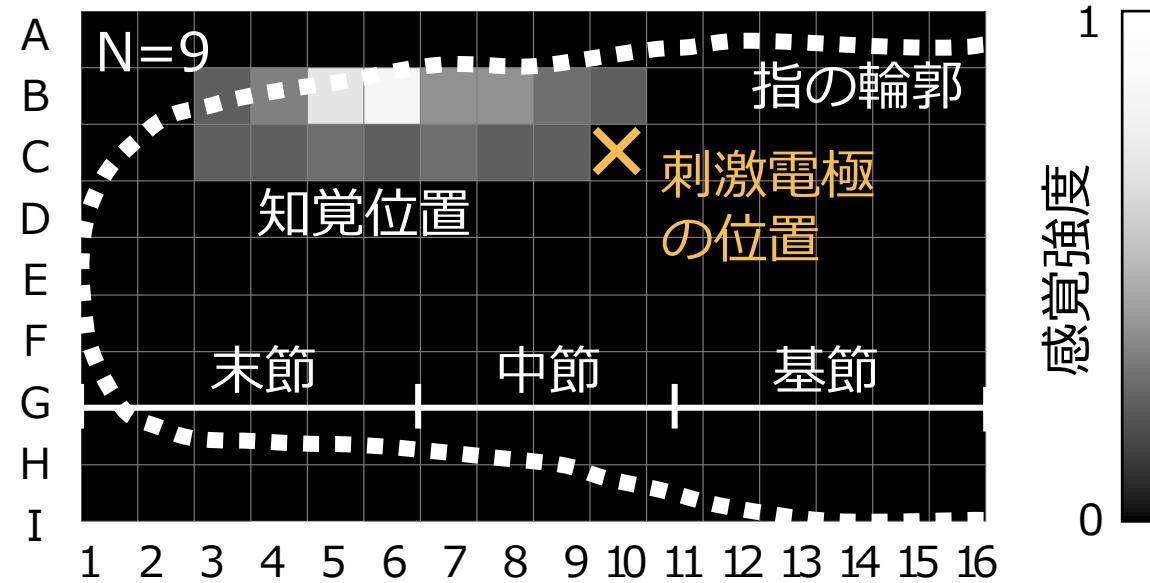
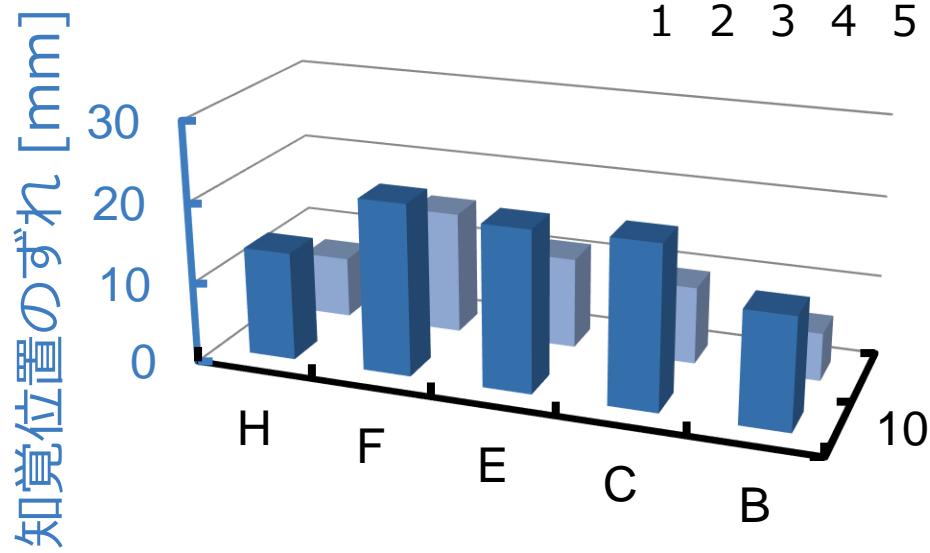


刺激装置の構成と刺激波形

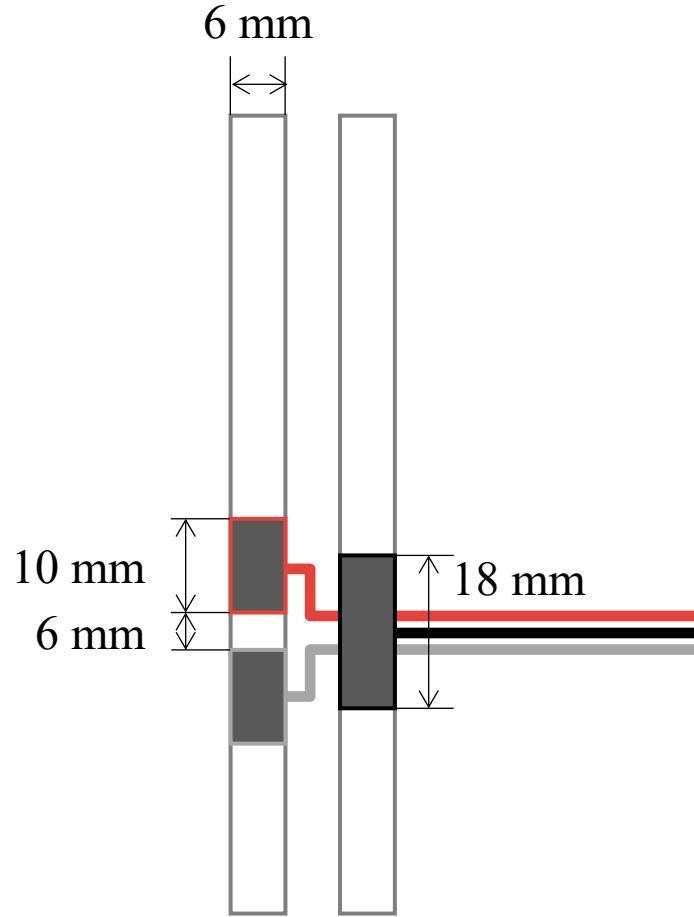


パルス周波数と波高が感覚強度・様式に影響

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

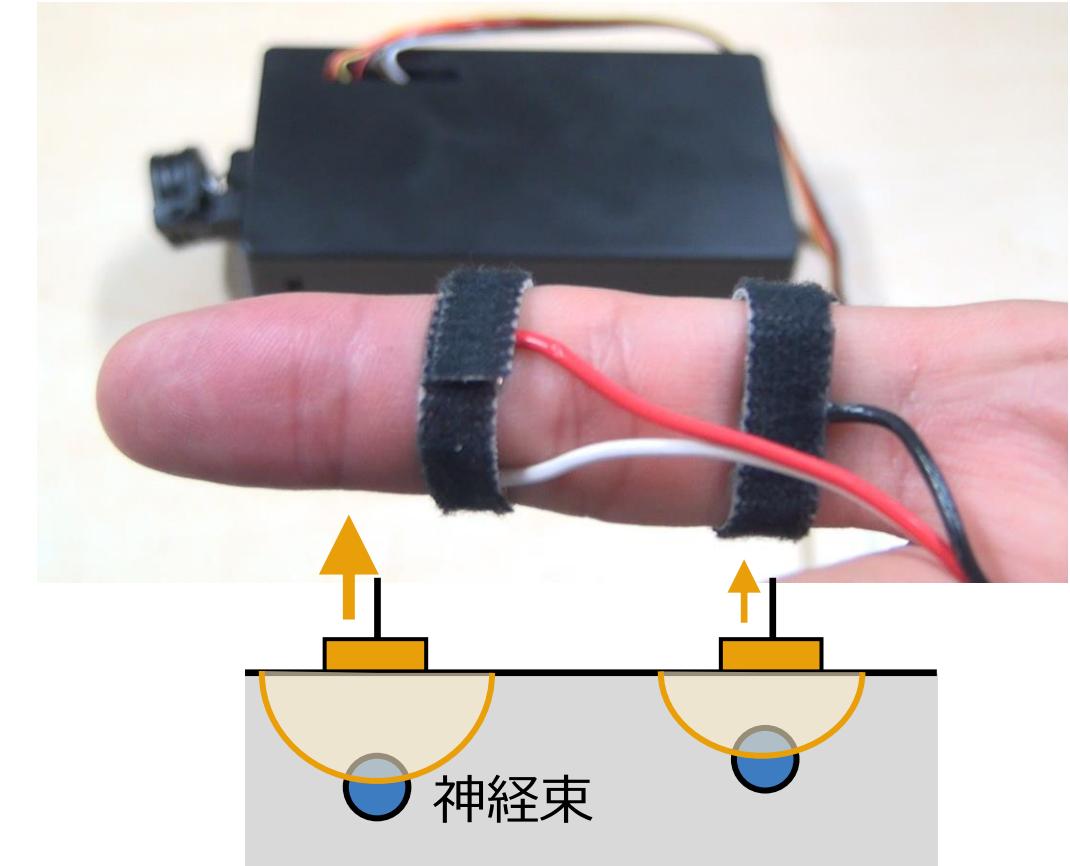


接地電極の面積を
大きくすることで
電流密度を刺激電極に集中

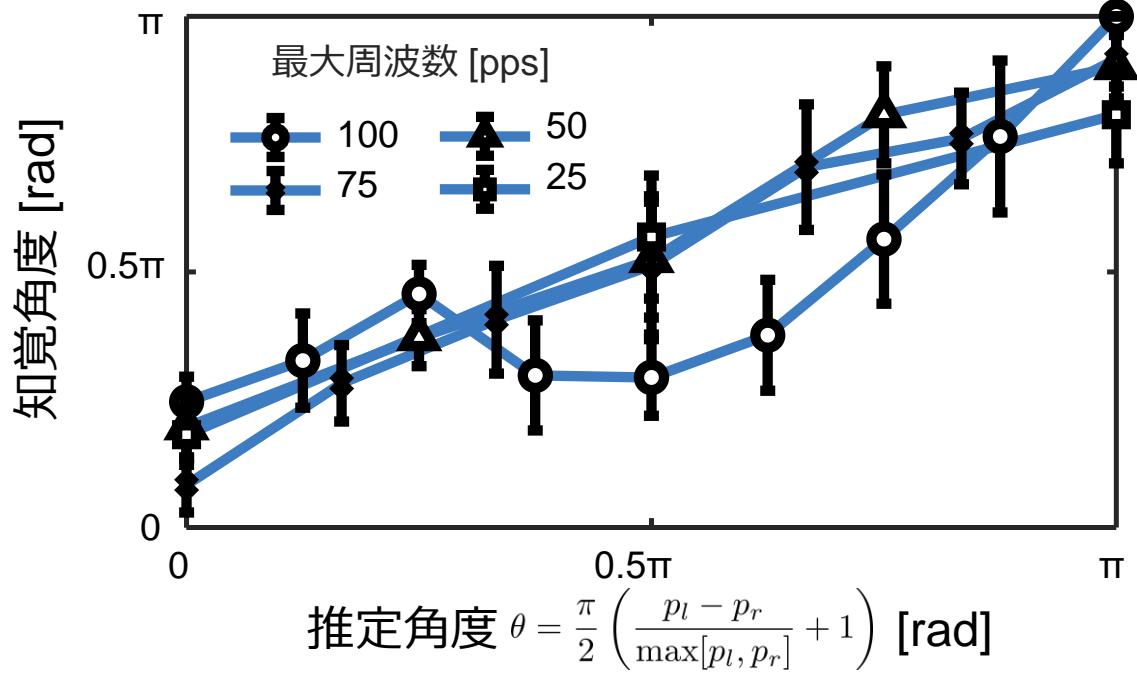
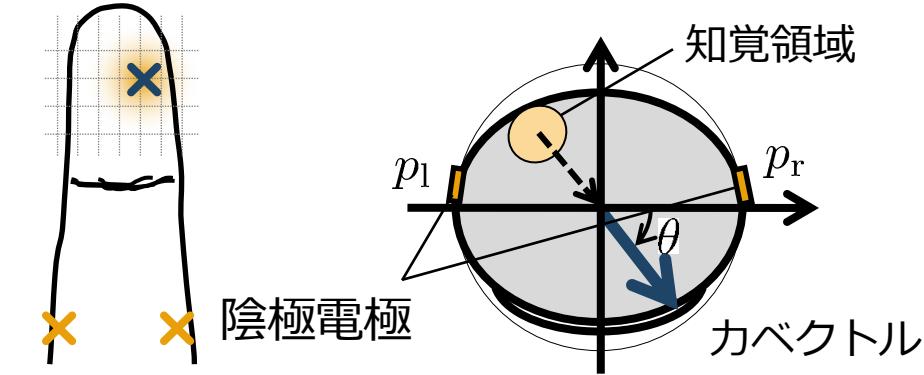
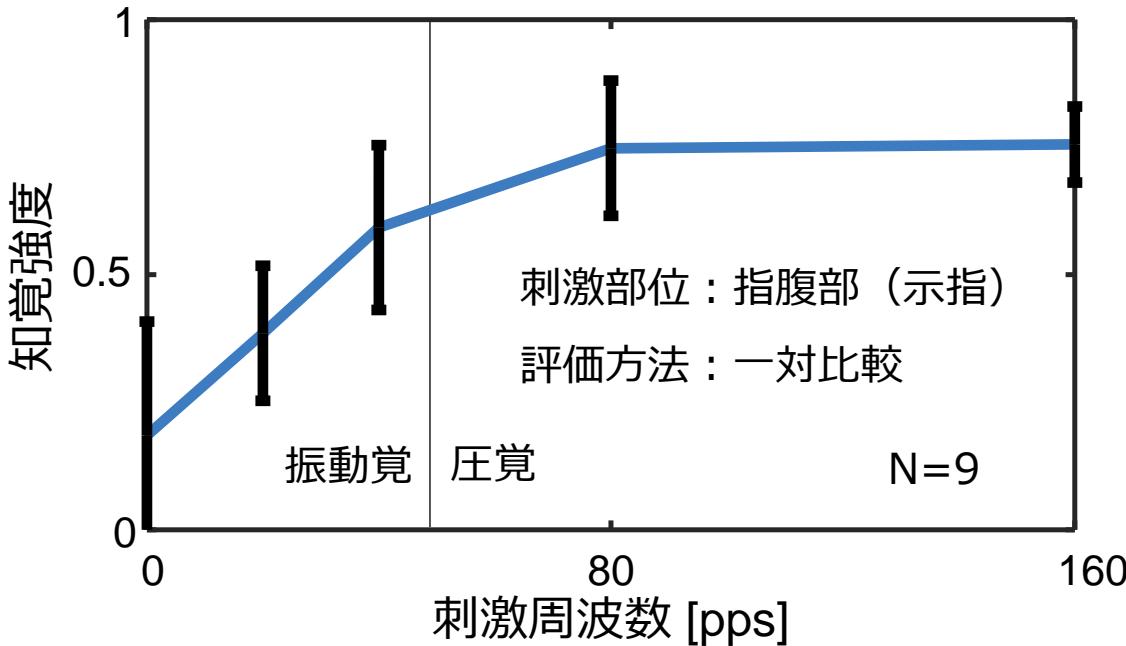


PET糸 + Ni+Cu+Ni

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

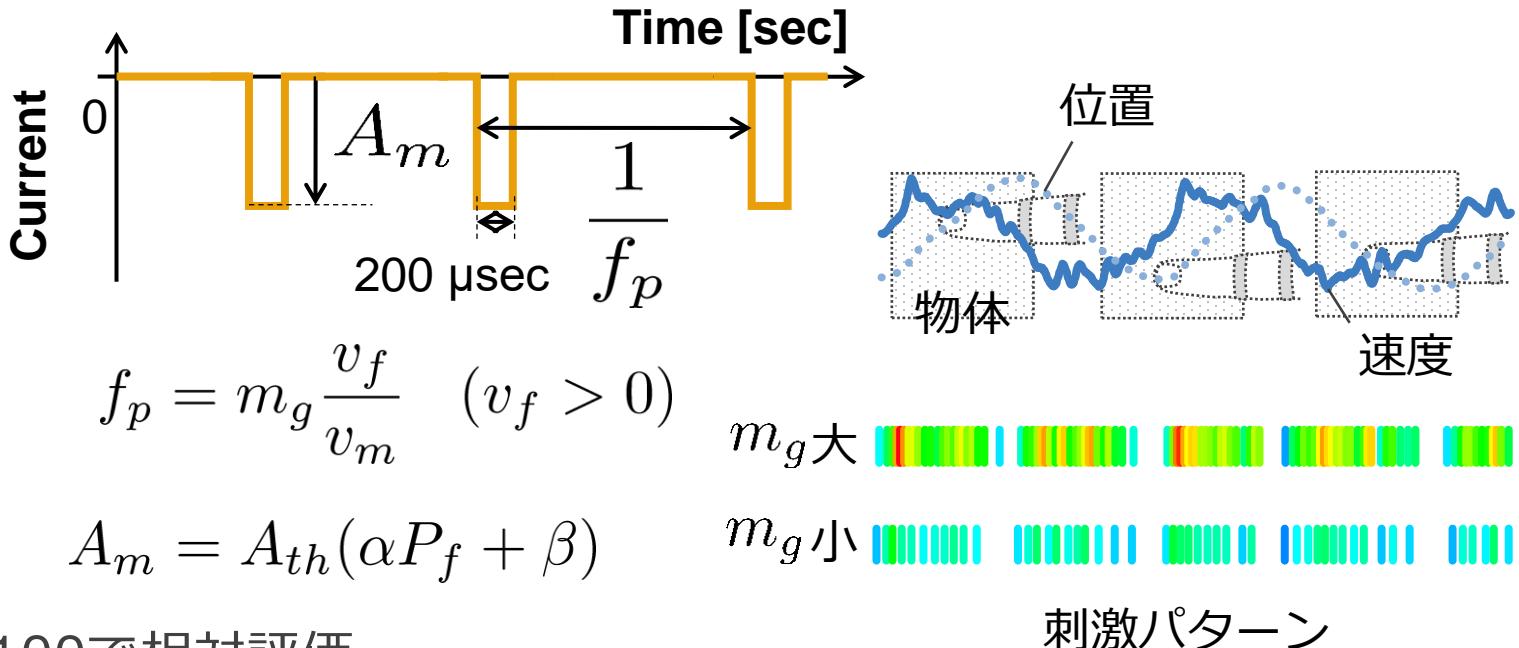


電気刺激パラメータと知覚の関係

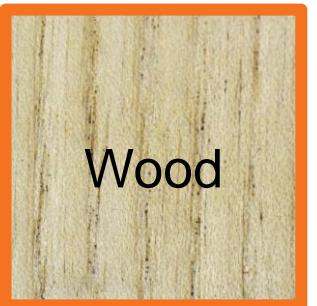


パルス周波数が感覚強度に影響、2極刺激で部位を制御 = 多自由度な情報提示

指の速度に応じてパルス刺激の周波数を制御



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



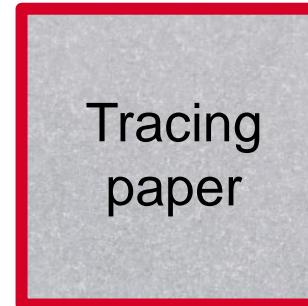
Wood



Velcro
tape



Taurillon
leather



Tracing
paper



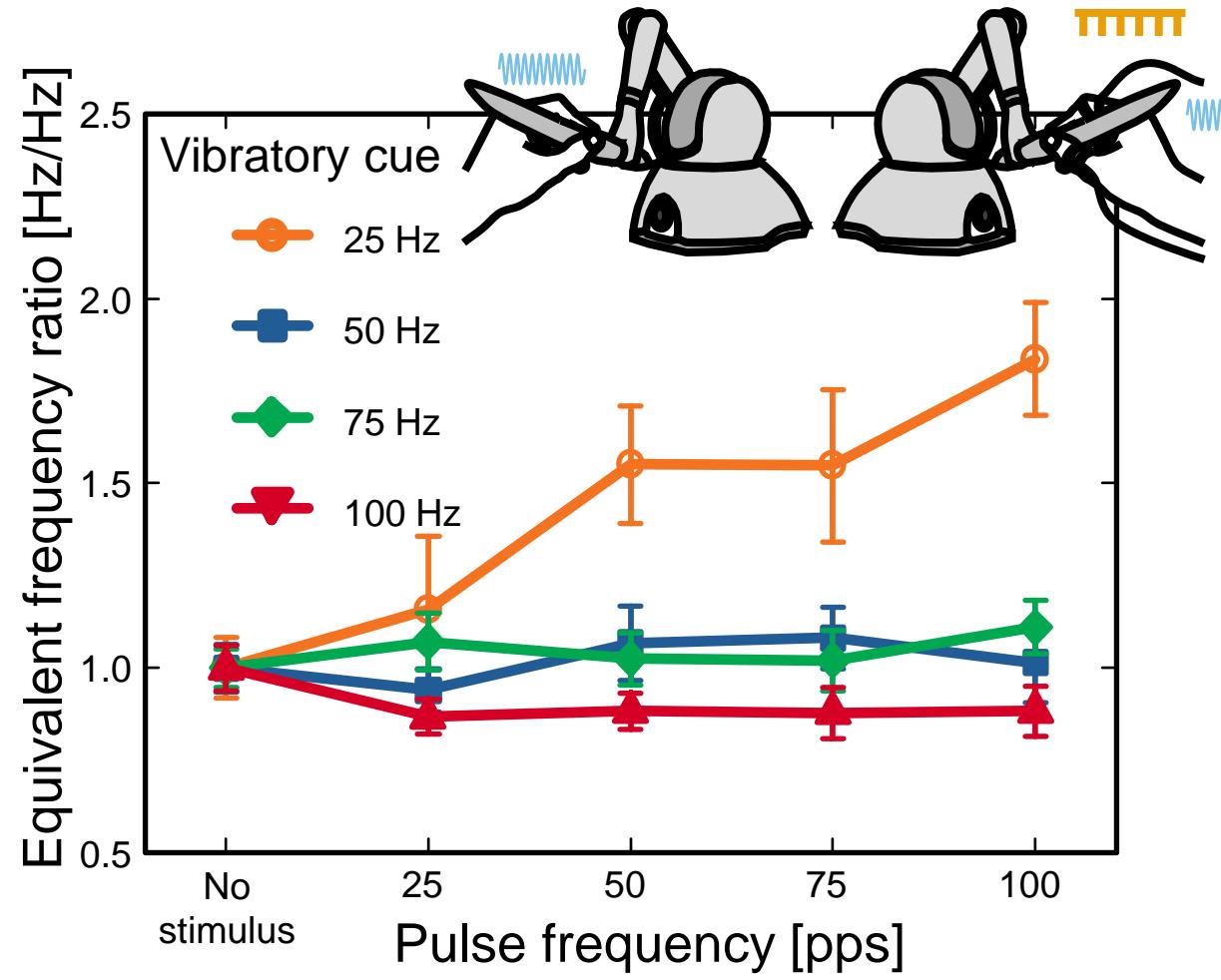
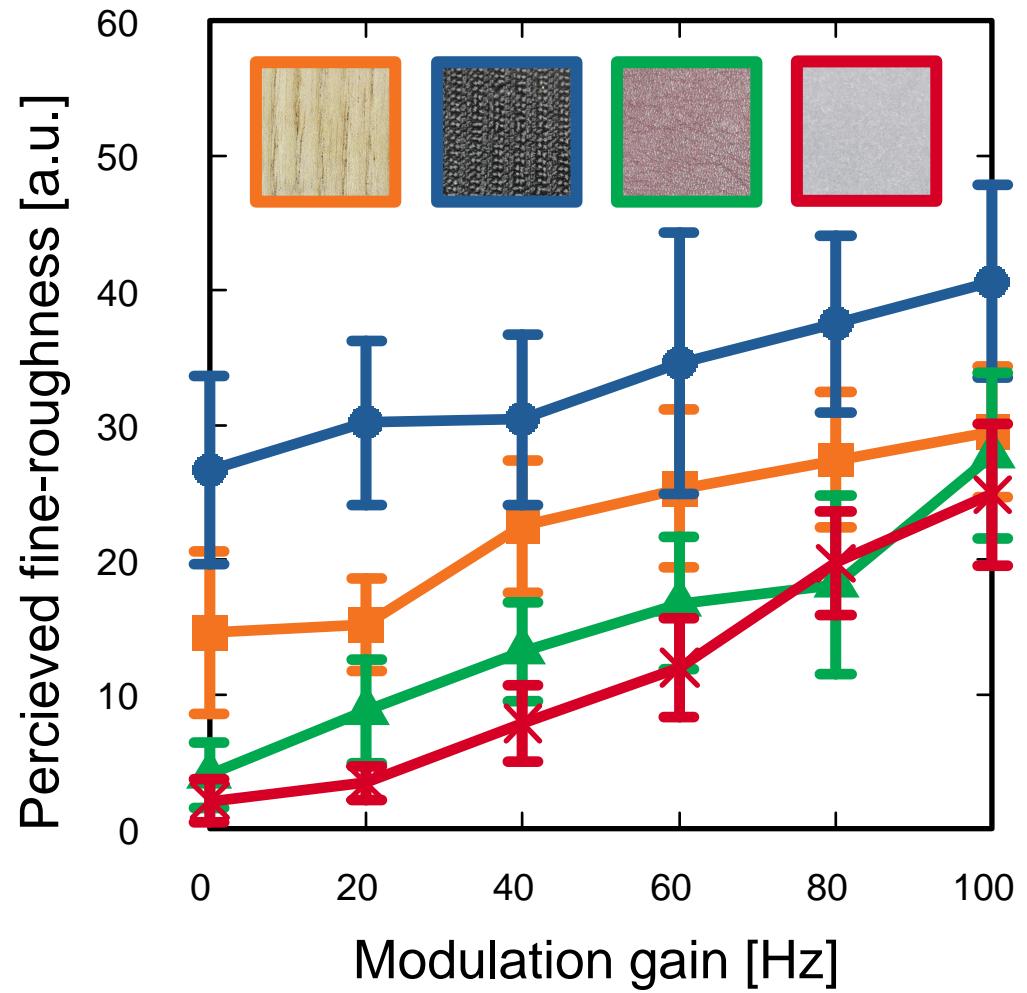
Sand paper



Urethane

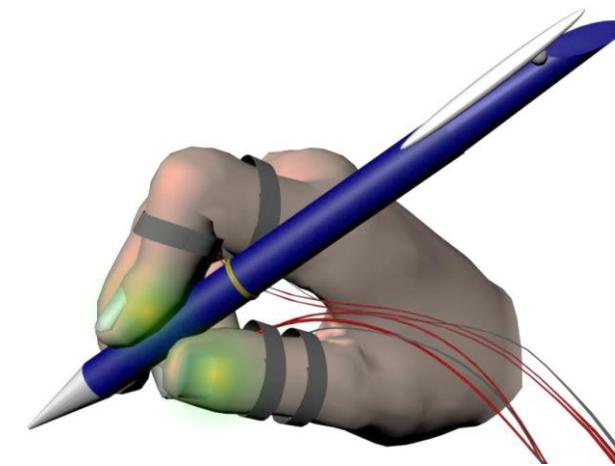
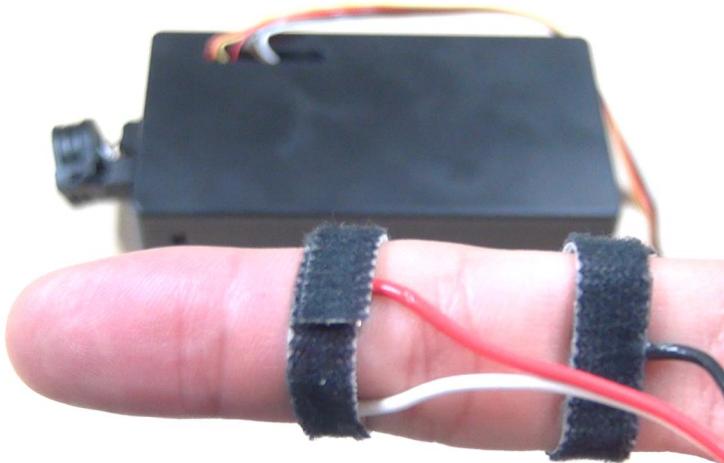
Reference

重畠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



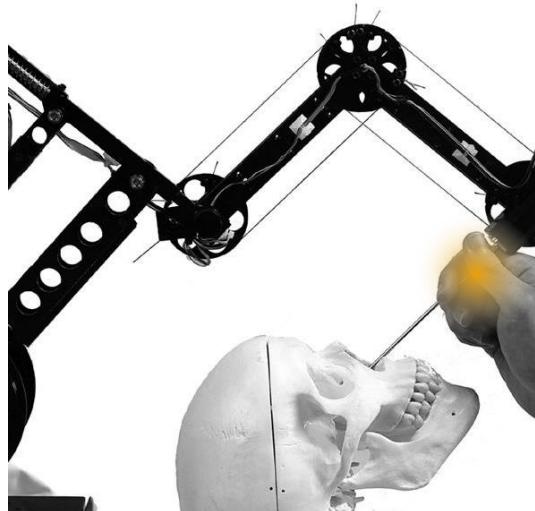
動作や操作を妨害しないため、
様々な場面での利用が可能

触覚フィードバックの応用展開

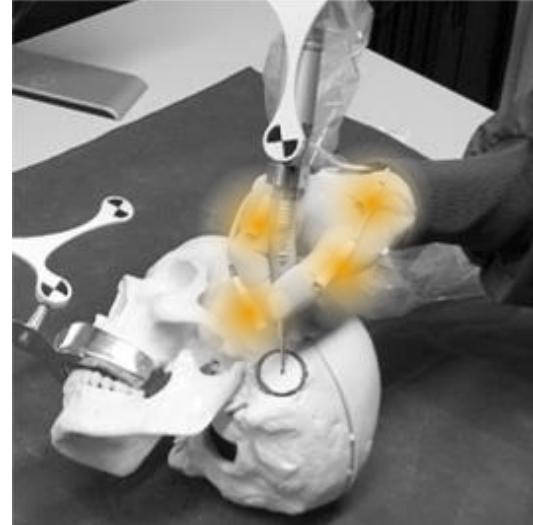
制御

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.



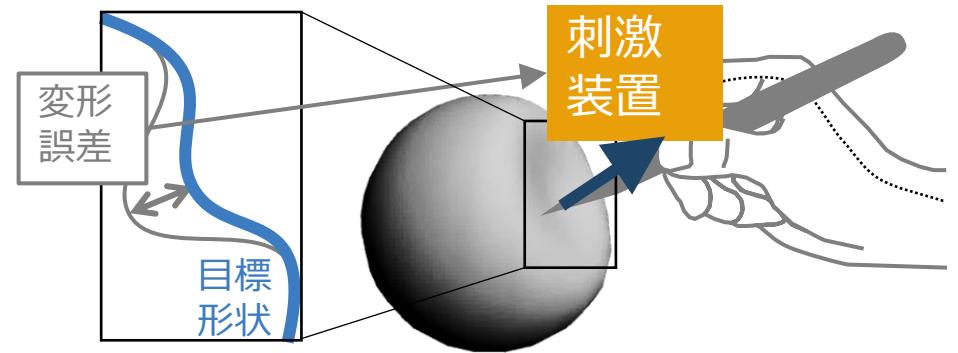
Brell, et.al.,
conTACT, 2007.

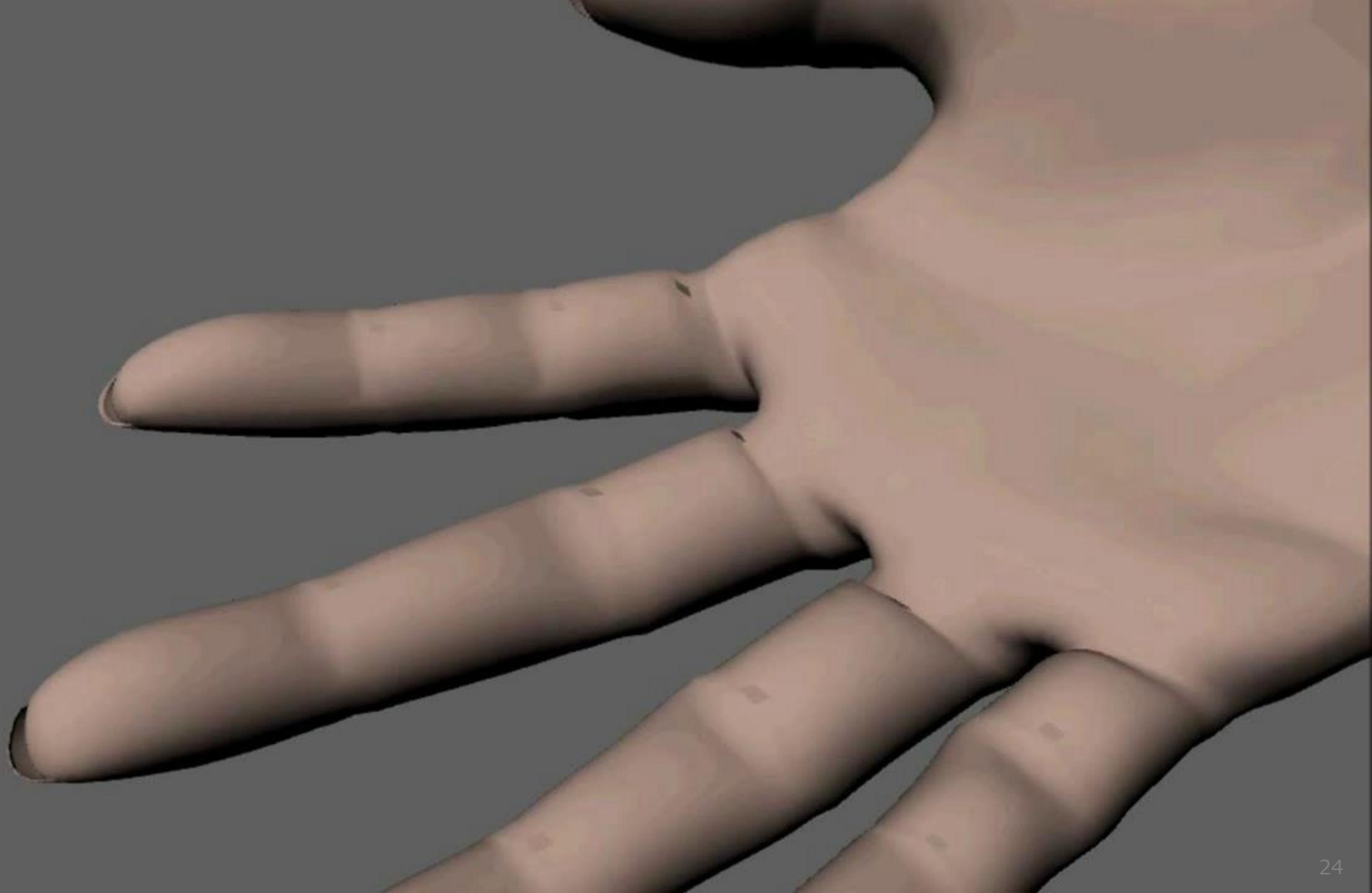


King, et.al., Pneumatic Balloon Tactile
Display, 2009.

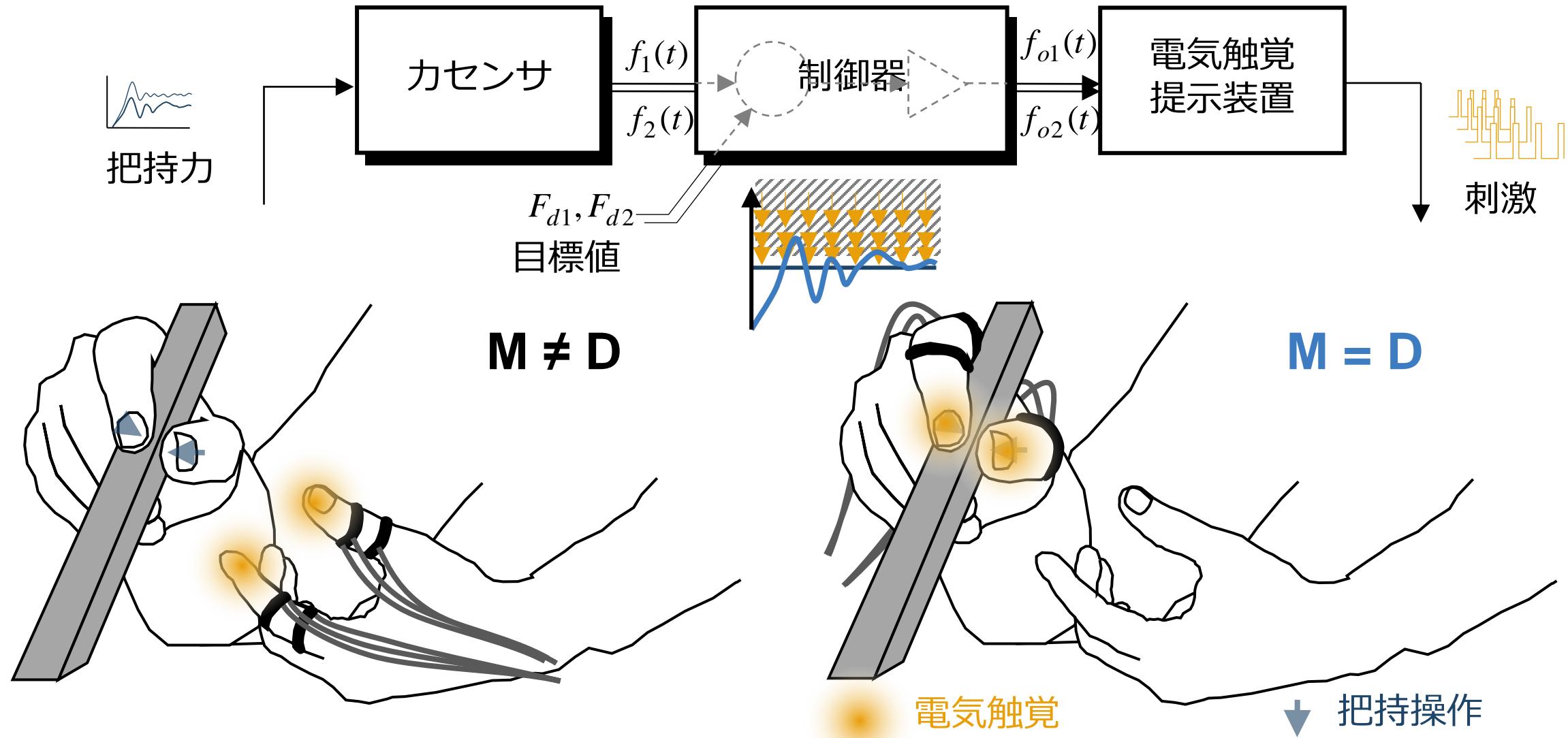


W. McMahan, et.al.,
VerroTouch, 2011.

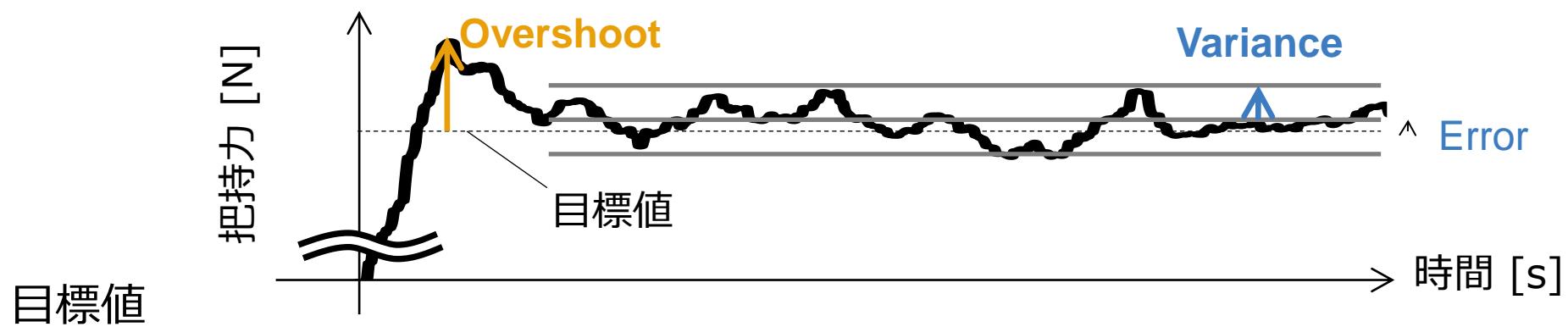




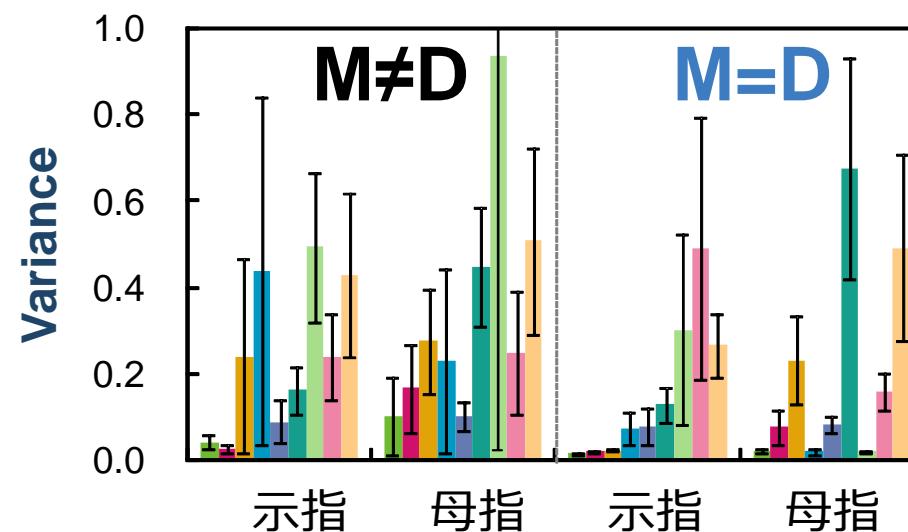
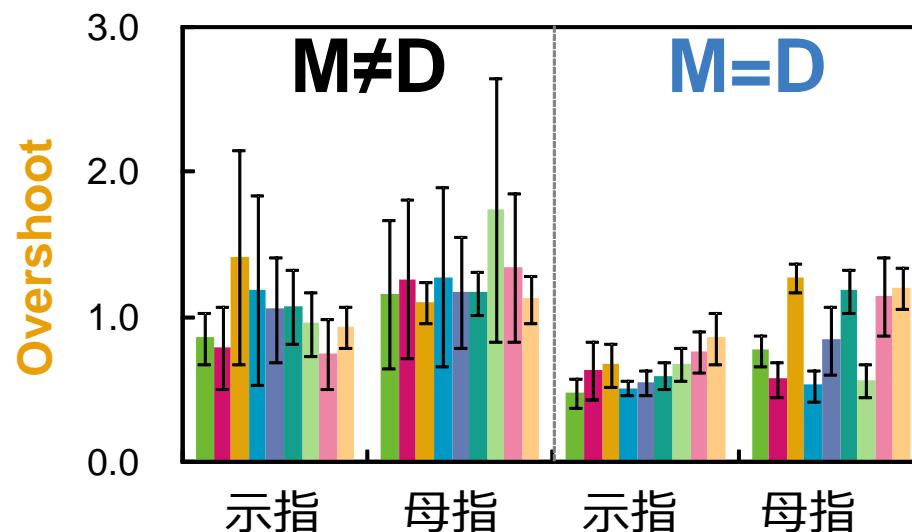
操作部位と提示部位が同じ ($M=D$) であることの意義



オーバーシュートと変動の軽減に寄与



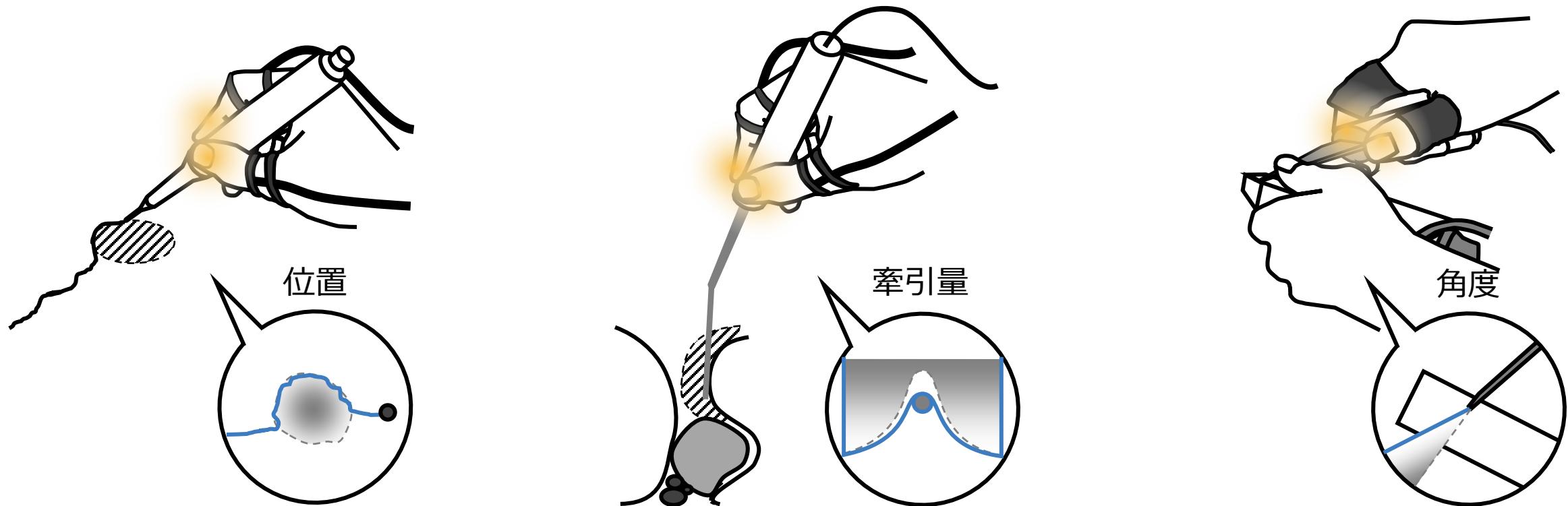
| Index | 0.5 N | 0.5 N | 0.5 N | 2.0 N | 2.0 N | 2.0 N | 6.0 N | 6.0 N | 6.0 N |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Thumb | 0.5 N | 2.0 N | 6.0 N | 0.5 N | 2.0 N | 6.0 N | 0.5 N | 2.0 N | 6.0 N |



N=9

医療分野における応用例

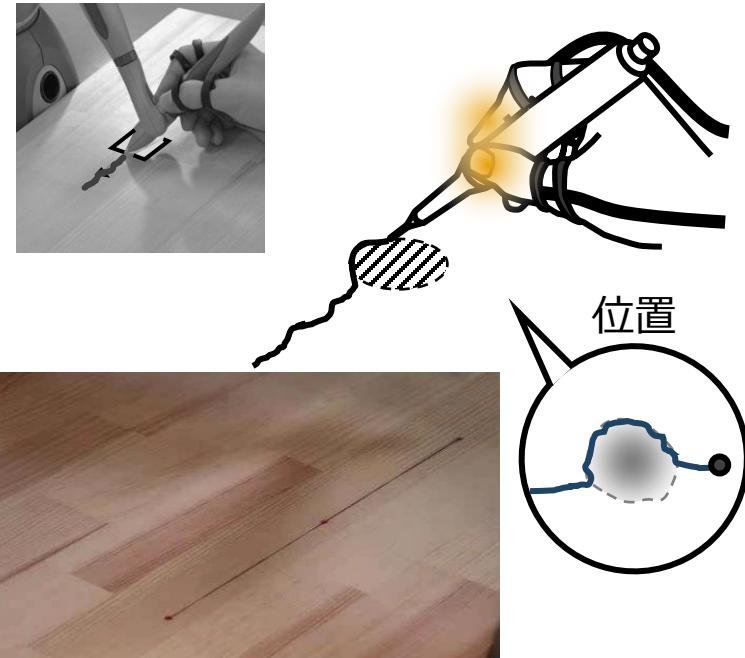
- ・手術支援：術具の位置決め（侵入回避）
- ・組織の牽引（損傷回避）
- ・手技訓練：歯科領域における歯型彫刻手技の学習



電気触覚ディスプレイの医療分野における応用

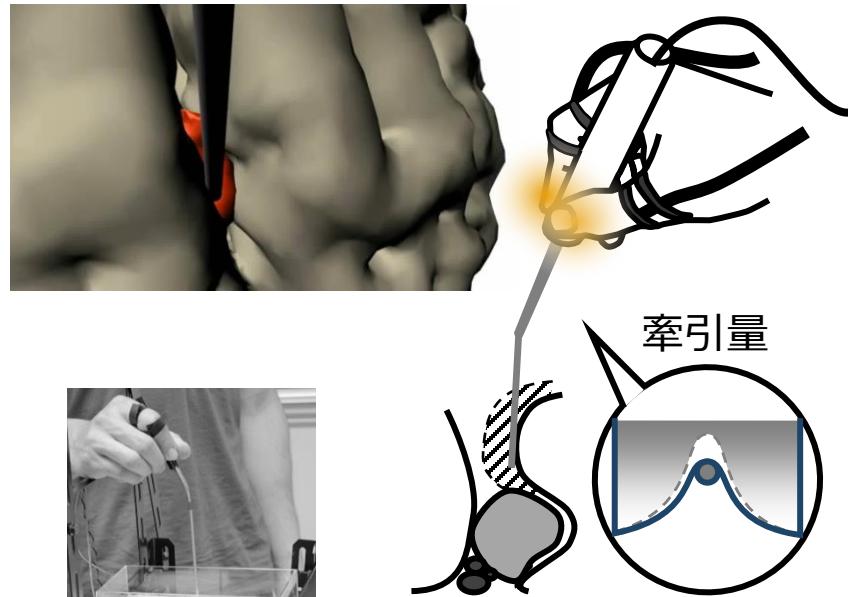
吉元俊輔, 電気触覚重畠による手術手技教示, システム/制御/情報 (解説), 2022

術具の位置決め（侵入回避）



生体医工学シンポジウム2010
ベストリサーチアワード

組織の牽引（損傷回避）



生体医工学シンポジウム2011
ベストリサーチアワード

歯型彫刻手技の学習



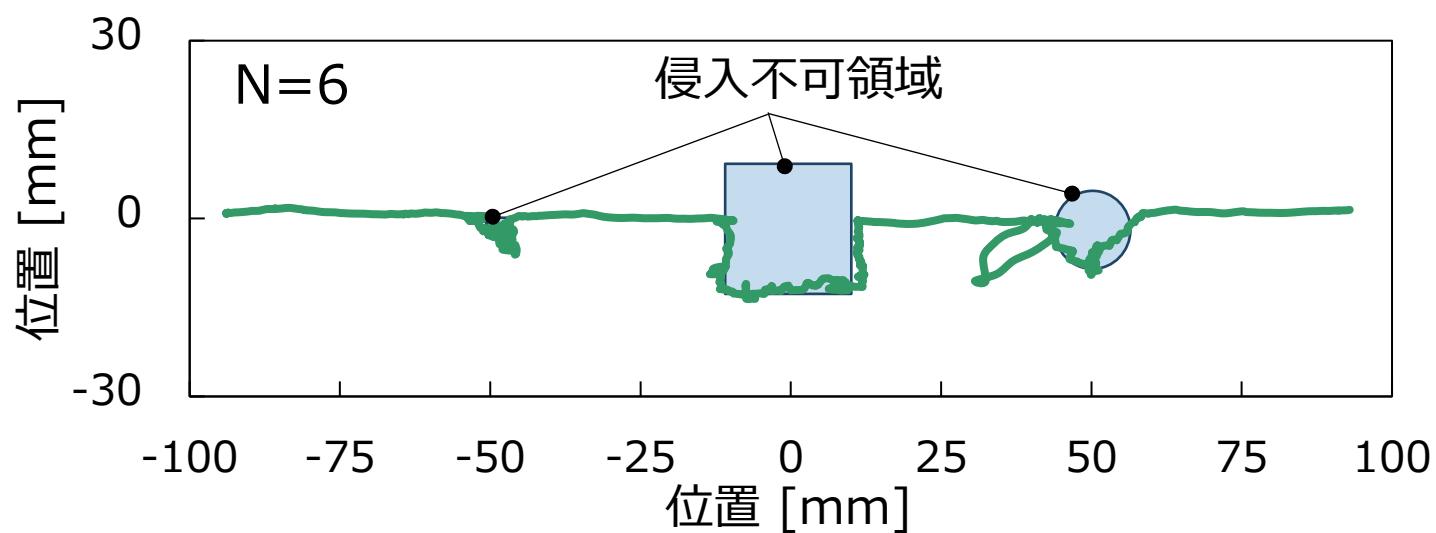
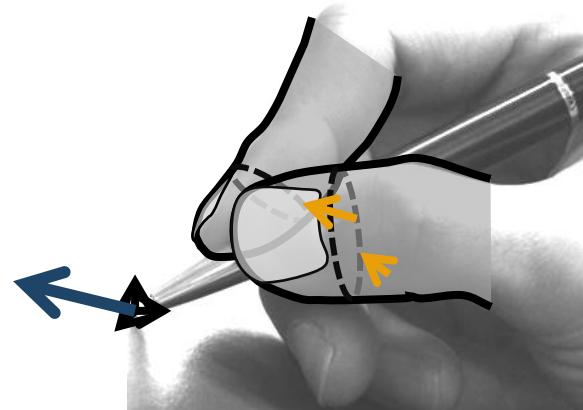
JST A-STEP 2013年度FSステージ
シーズ顕在化タイプ採択

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

なぞり操作中に力ベクトルに対応する触覚を重畳

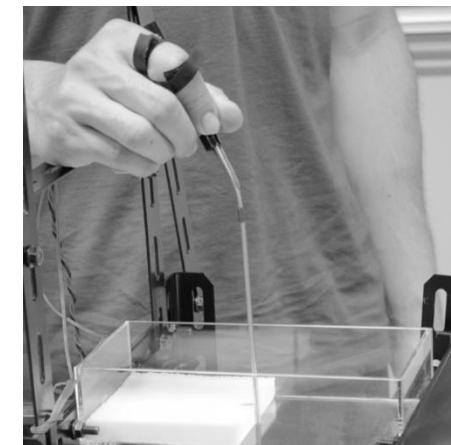
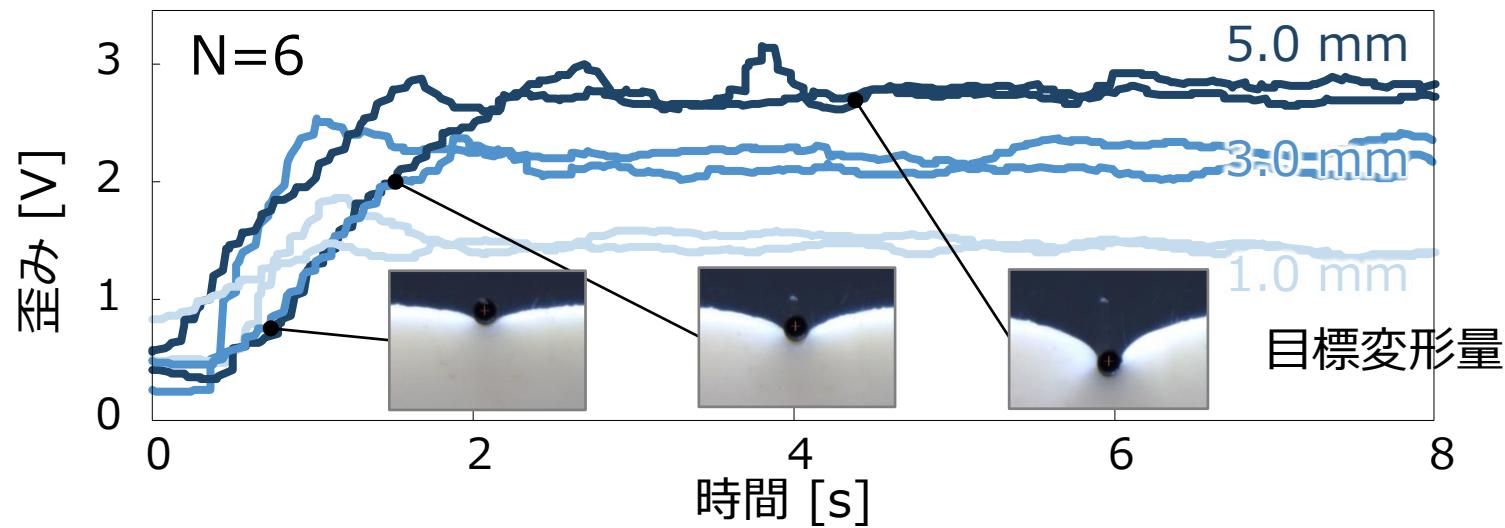
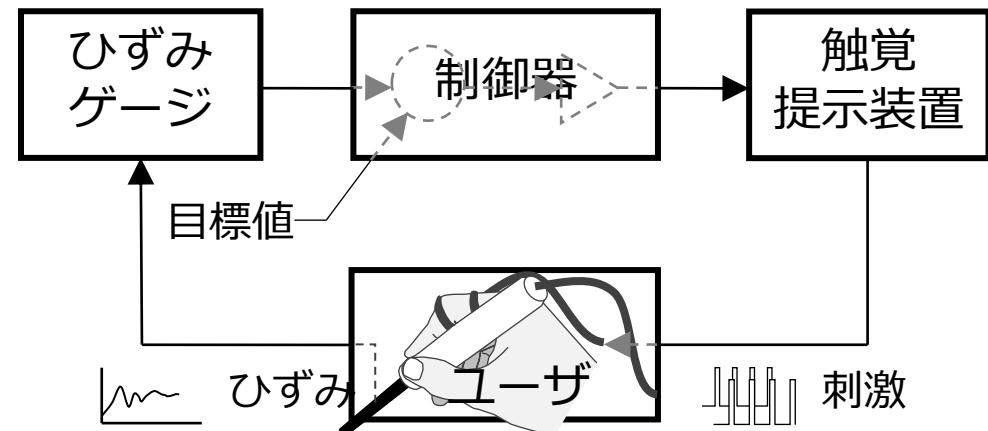
- 見えない仮想物体の境界面をなぞることが可能
- 仮想物体への侵入を3 mm以下で操作可能
- 外科手術における重要部位損傷回避に利用可



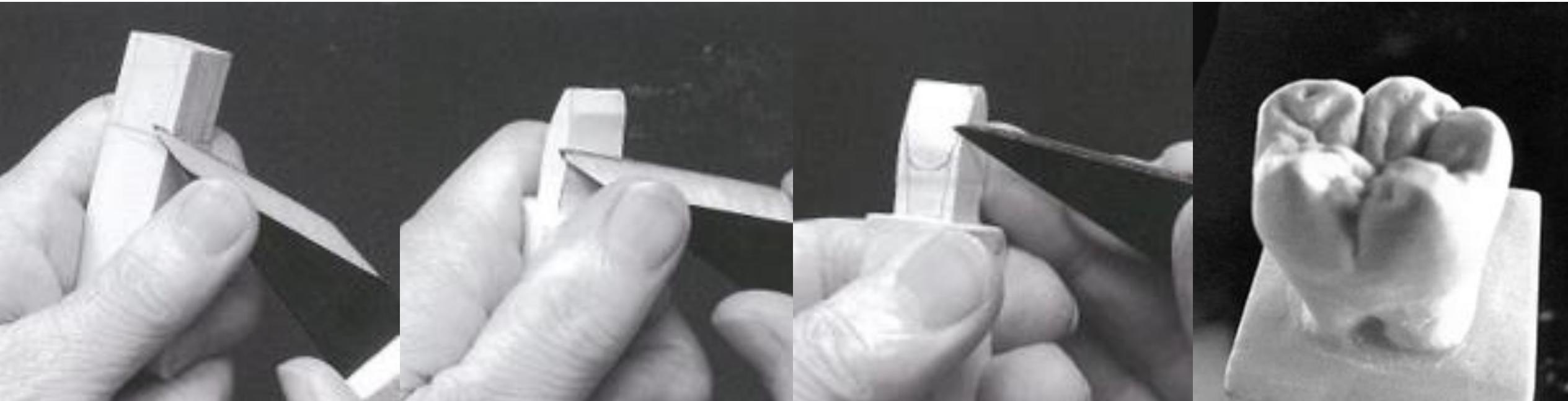
物体の牽引操作の力を教示する実験

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

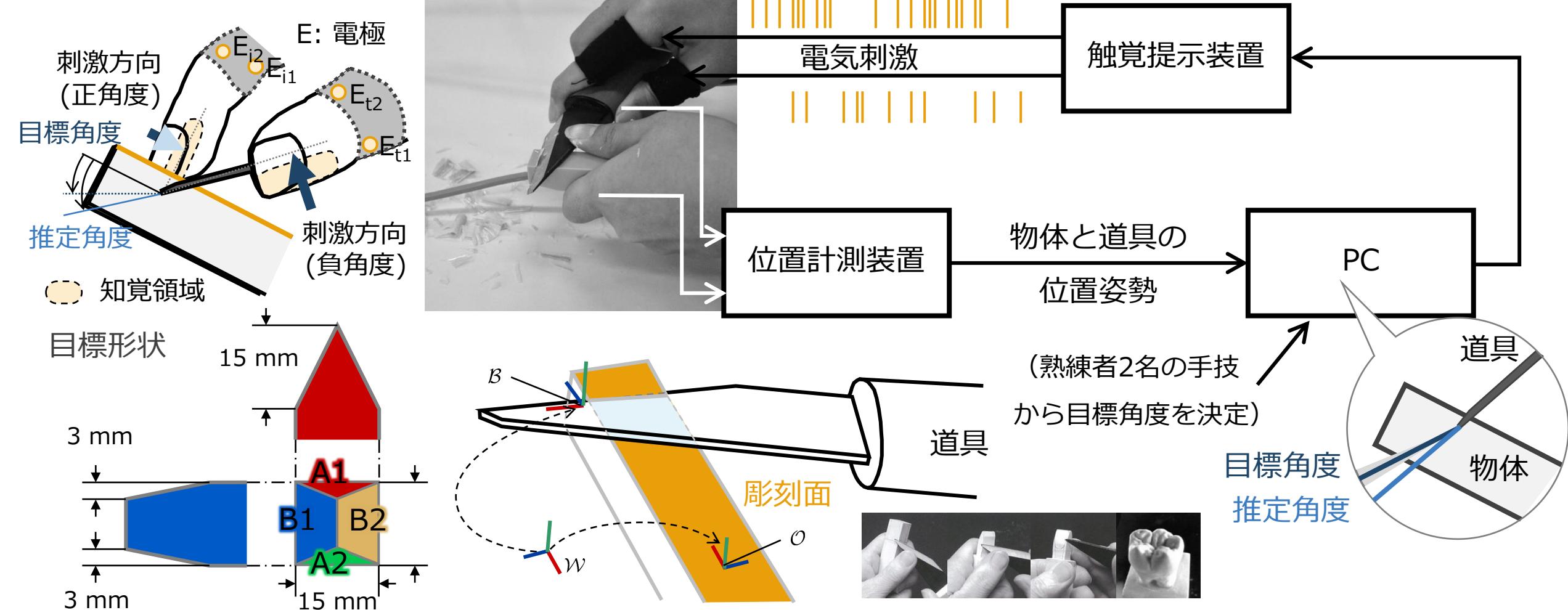


齒型彫刻



歯科技工士の技能教育への応用

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

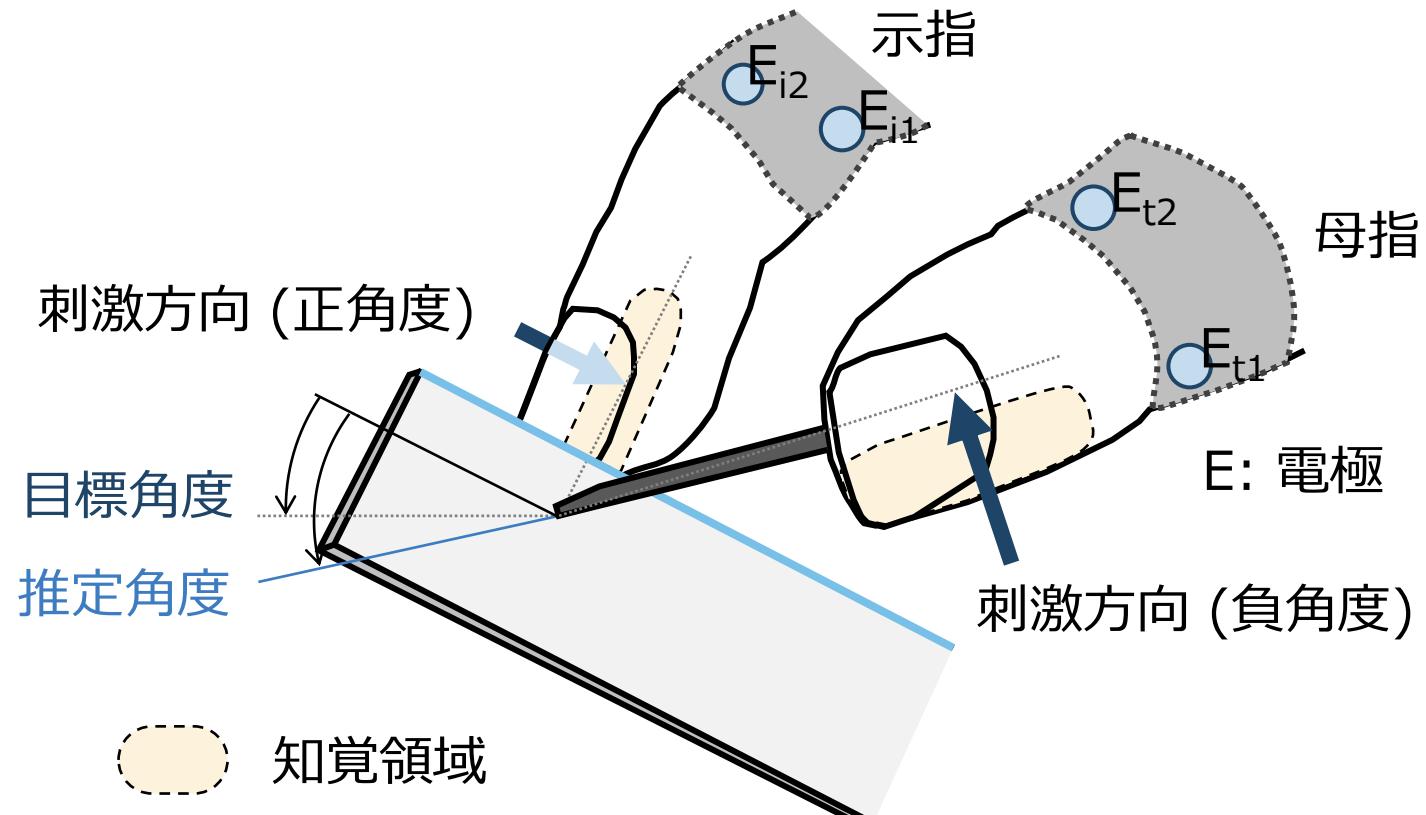
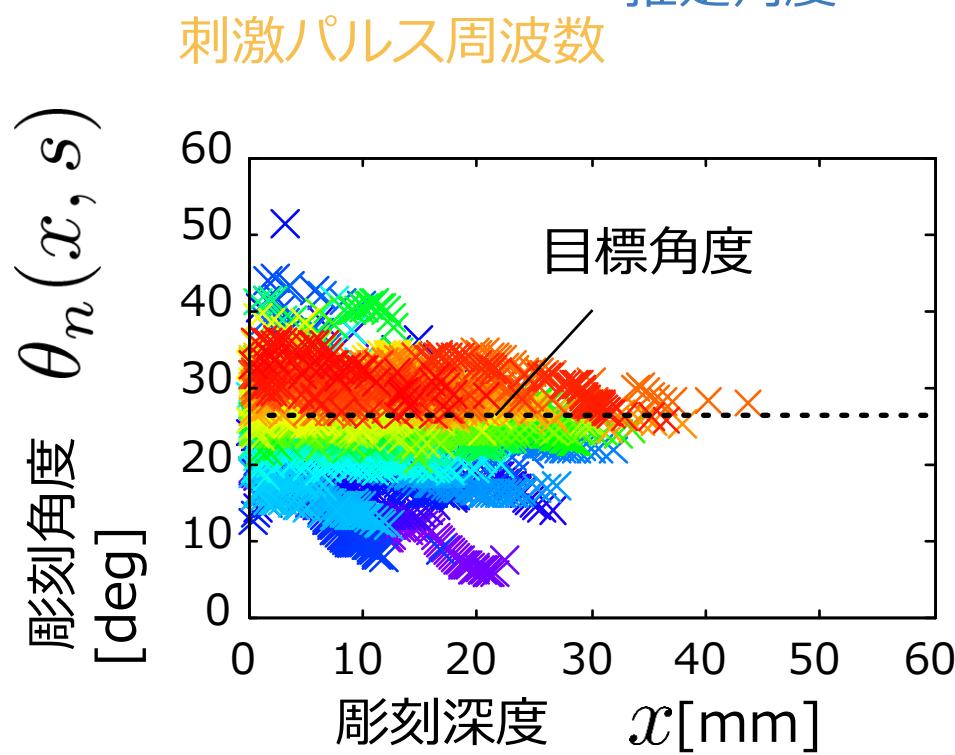


目標角度（熟練者から取得）との誤差に応じて指先に電気触覚を重畳して角度を教示

角度の教示（刺激計算）

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

分散
目標角度
推定角度

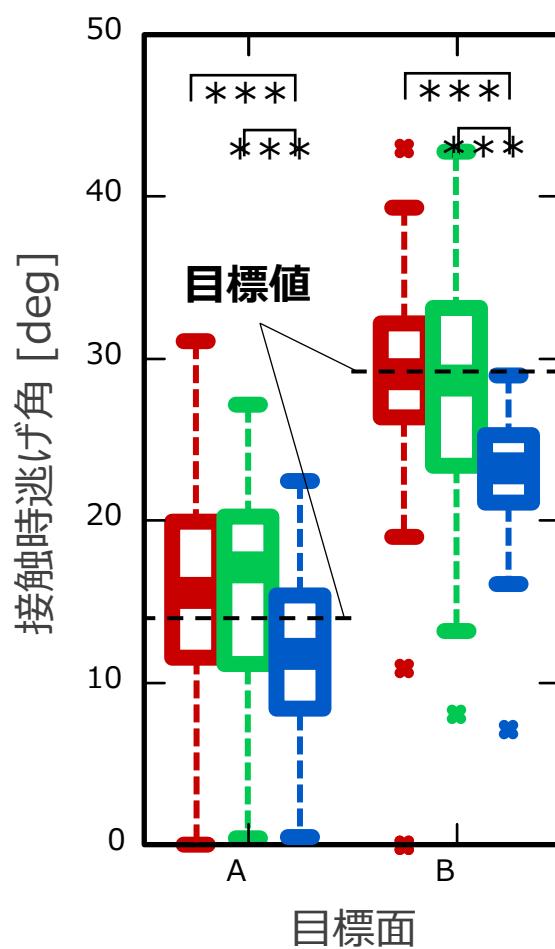
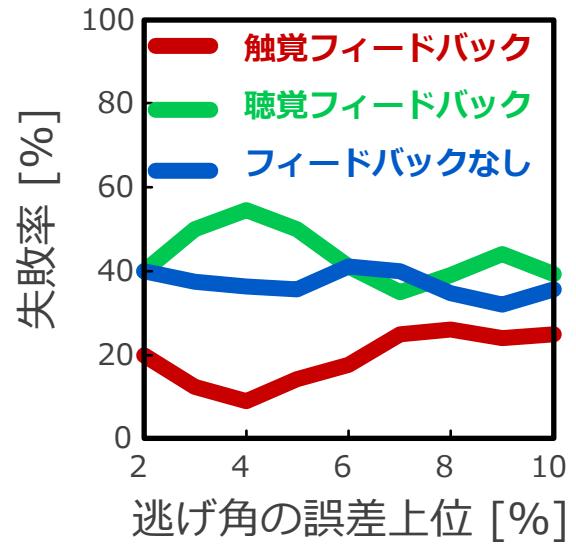
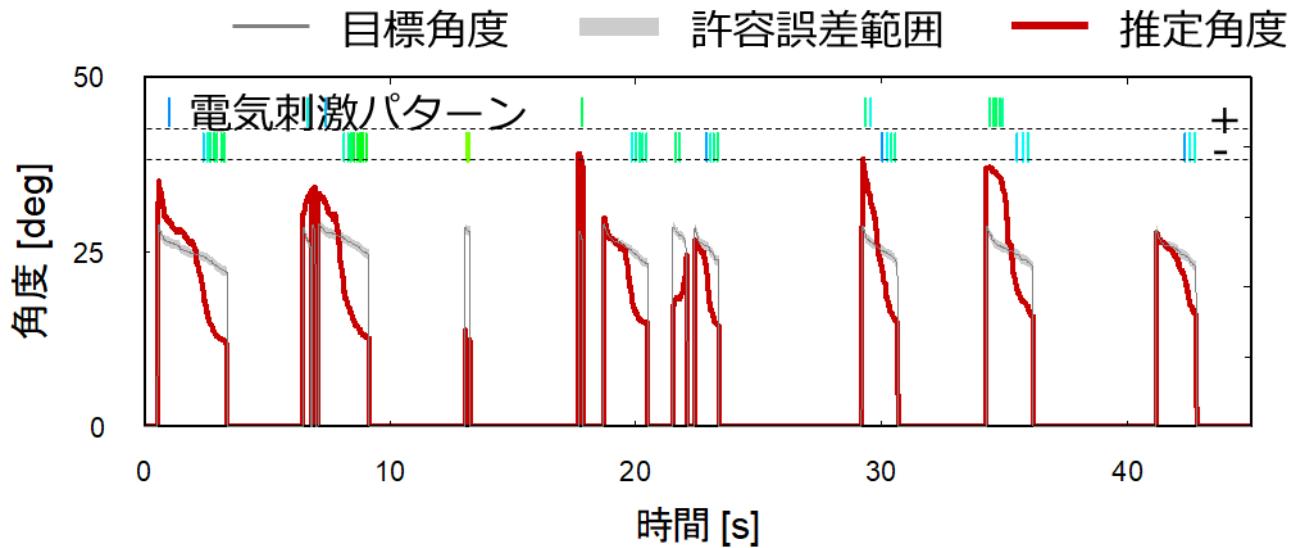
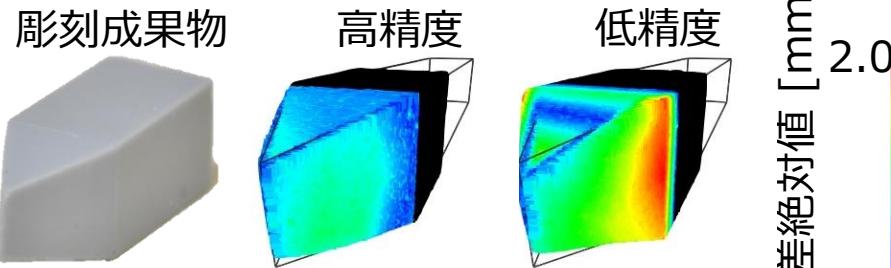


指先への触覚重畳がもたらす効果を検証



- 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

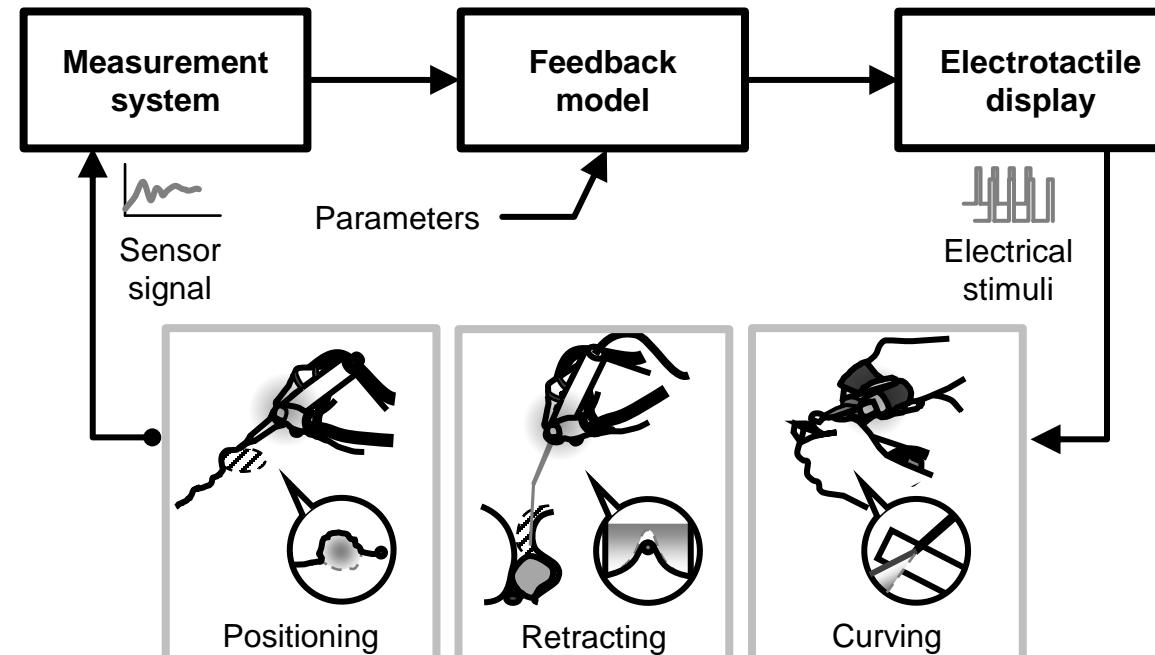
専門学生12名、各条件2回



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, 電気触覚重畠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.