

ヒト筋肉への振動刺激 と電気刺激により生起 される錯覚・反射の 制御に関する研究

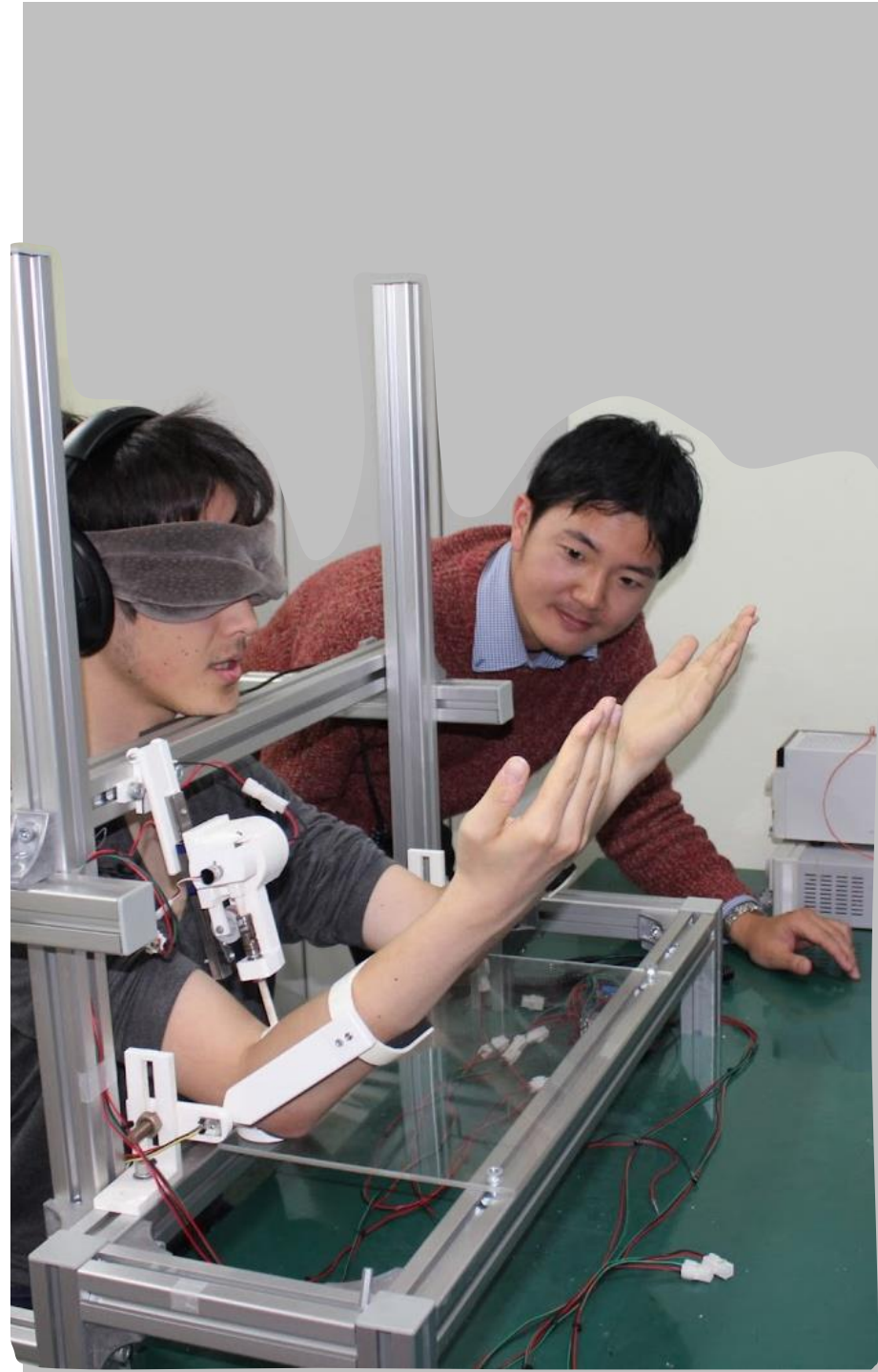


HUMAN & ENVIRONMENT
INFORMATICS LAB.

東京大学 大学院

新領域創成科学研究科 人間環境学専攻

本田 功輝



本日の発表内容

➤ 略歴紹介

錯覚・反射とは

振動刺激により生起する運動感覚と反射

運動錯覚・反射を利用したヒト動作の補正

運動錯覚をいかに精彩にするか

メカトロ・感覚・ヒト運動について研究

山口県出身

2011年 九州大学 工学部 入学

2018年~ 日本学術振興会特別研究員
2020年 (DC2)

2020年 九州大学大学院 工学府
機械工学専攻 博士後期課程修了

2020年~ 九州大学大学院工学研究
2023年 医工連携・健康長寿学講座（制御研）
助教

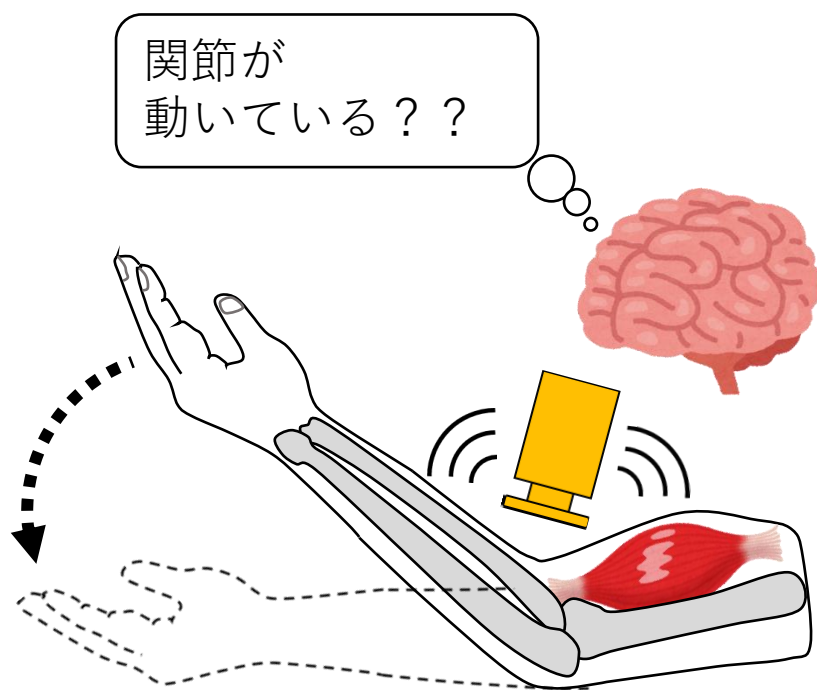
2023年~ 東京大学大学院新領域創成科学研究科
人間環境学専攻 特任助教 着任



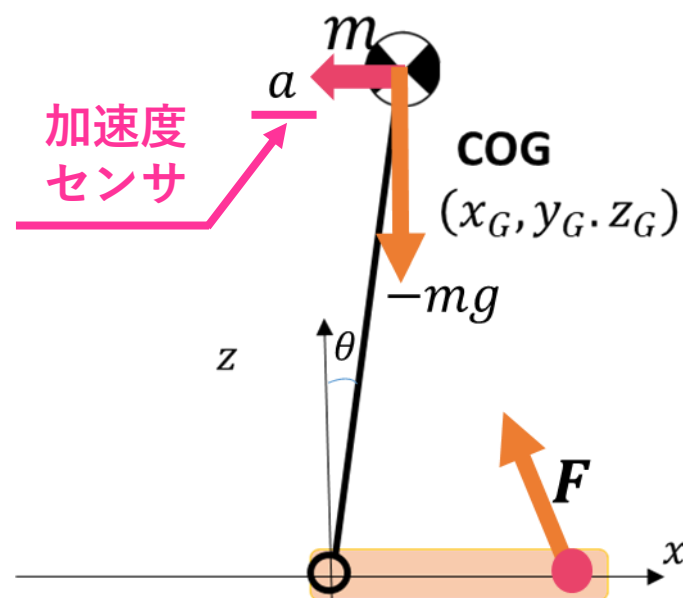
指導教官：木口量夫教授と私

通底する研究の関心

ヒトは何を感じ，いかに生き，動いているのか 機械的刺激を通して探求する



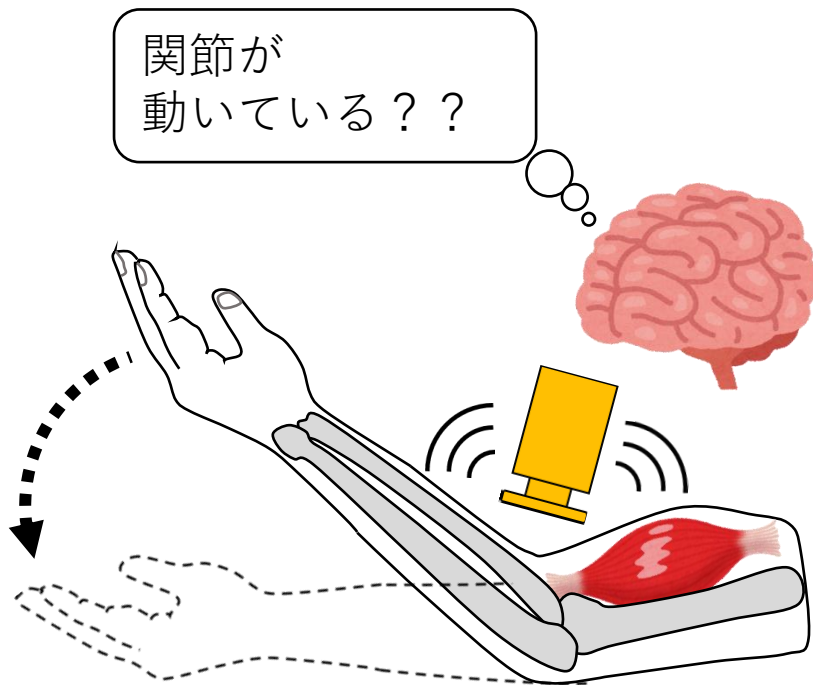
ヒト筋肉への振動刺激による
運動錯覚の研究



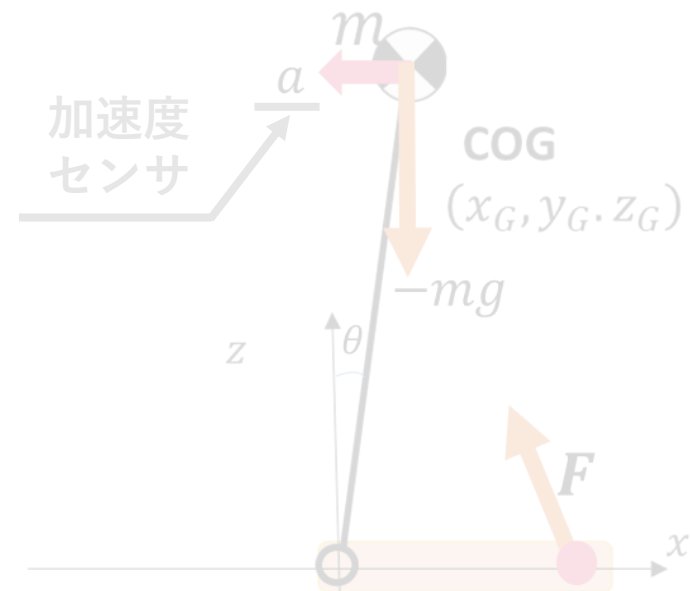
力学モデルに基づき，加速度
センサの情報からCoPを推定

通底する研究の関心

ヒトは何を感じ，いかに生き，動いているのか 機械的刺激を通して探求する



ヒト筋肉への振動刺激による
運動錯覚の研究



力学モデルに基づき，加速度
センサの情報からCoPを推定

本日の発表内容

略歴紹介

➤ 錯覚・反射とは

振動刺激により生起する運動感覚と反射

運動錯覚・反射を利用したヒト動作の補正

運動錯覚をいかに精彩にするか

錯覚とは

物理的実体と著しく異なる

知覚内容や意識経験を得ること (最新心理学辞典, 平凡社, 2013)

視覚, 聴覚, 触覚など, 様々な感覚において生起しうる

図は下記のホームページを
ご参照ください

ツェルナー錯視

(北岡明佳氏による作図, 転載許可の図,
<http://www.psy.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/catalog.html>
最終アクセス: 2023年5月25日)

図は下記論文を
ご参照ください

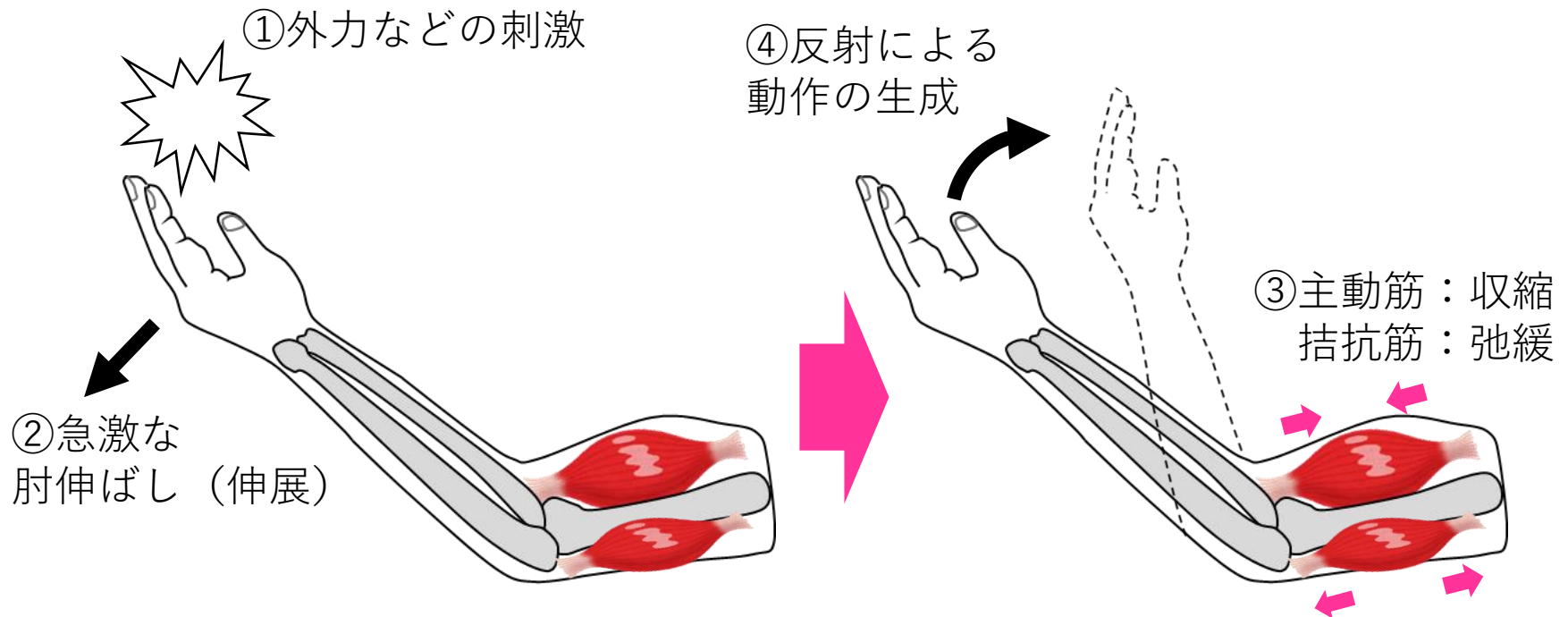
ラバーハンドイリュージョン (ロボット使用で向上)

(J. Arata, M. Hattori, S. Ichikawa and M. Sakaguchi, "Robotically
Enhanced Rubber Hand Illusion," in IEEE Transactions on Haptics, vol. 7,
no. 4, pp. 526-532, Oct.-Dec. 2014, doi: 10.1109/TOH.2014.2304722.)

反射とは

刺激に対して意識することなく、 機械的に起る身体の比較的局所的な反応

(ブリタニカ国際大百科事典より)



本日の発表内容

略歴紹介

錯覚・反射とは

➤ 振動刺激により生起する運動感覚と反射

運動錯覚・反射を利用したヒト動作の補正

運動錯覚をいかに精彩にするか

錯覚・反射とは

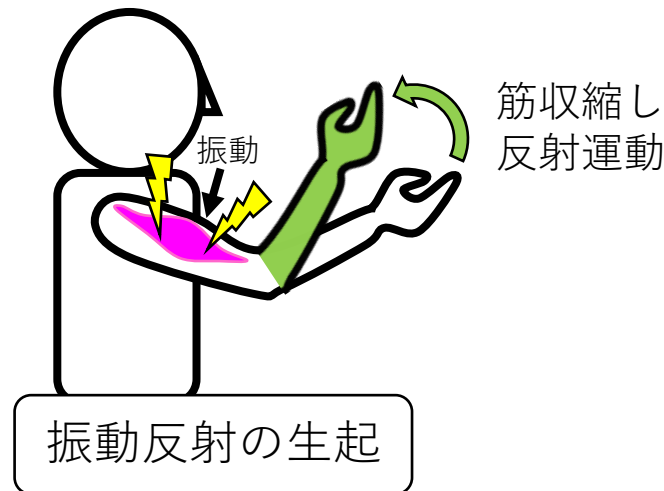
振動により誘発される錯覚と反射がある

「運動感覚の錯覚現象」 → **運動錯覚**

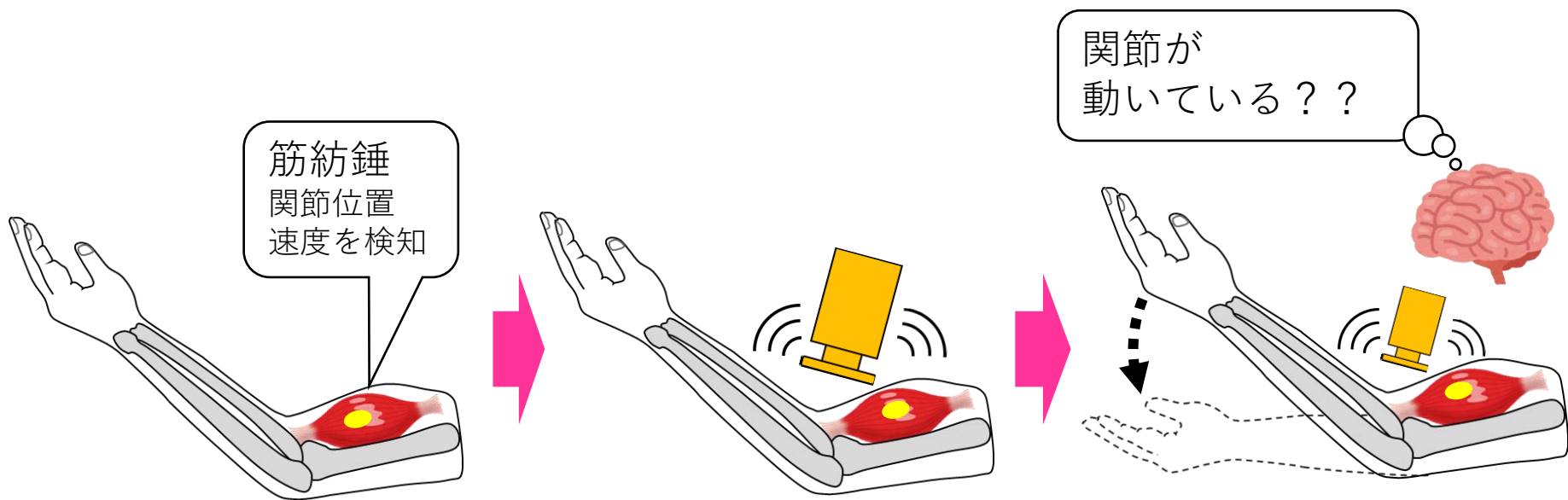
：実際には体が動いていないが動いているように感じる

「筋反射現象」 → **緊張性振動反射**

：振動刺激が加えられた筋肉が収縮する現象



振動により筋紡錘が反応し，動作を認識



1. 筋紡錘は，ヒトの
運動感覚の源泉

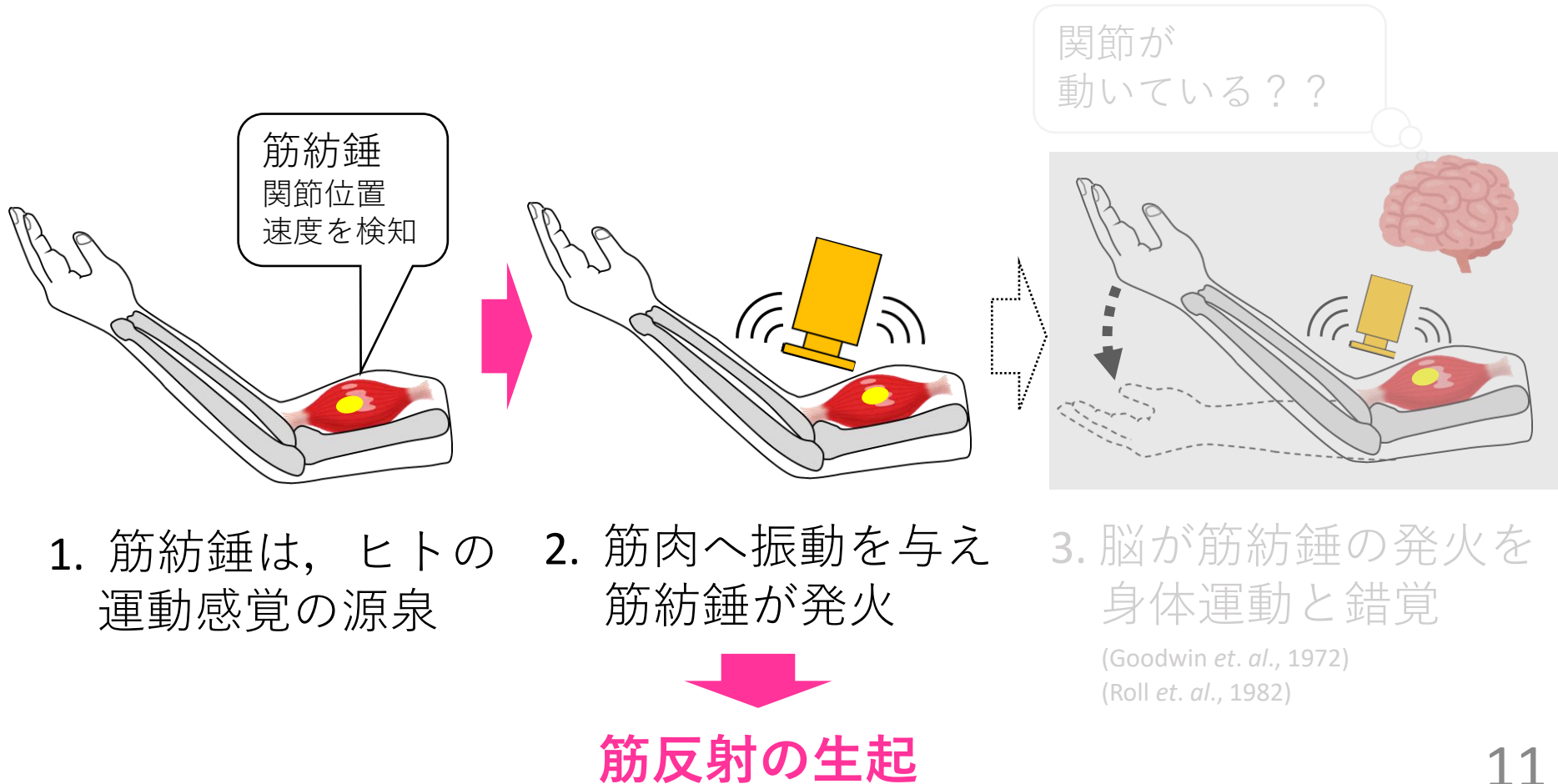
2. 筋肉へ振動を与え
筋紡錘が発火

3. 脳が筋紡錘の発火を
身体運動と錯覚

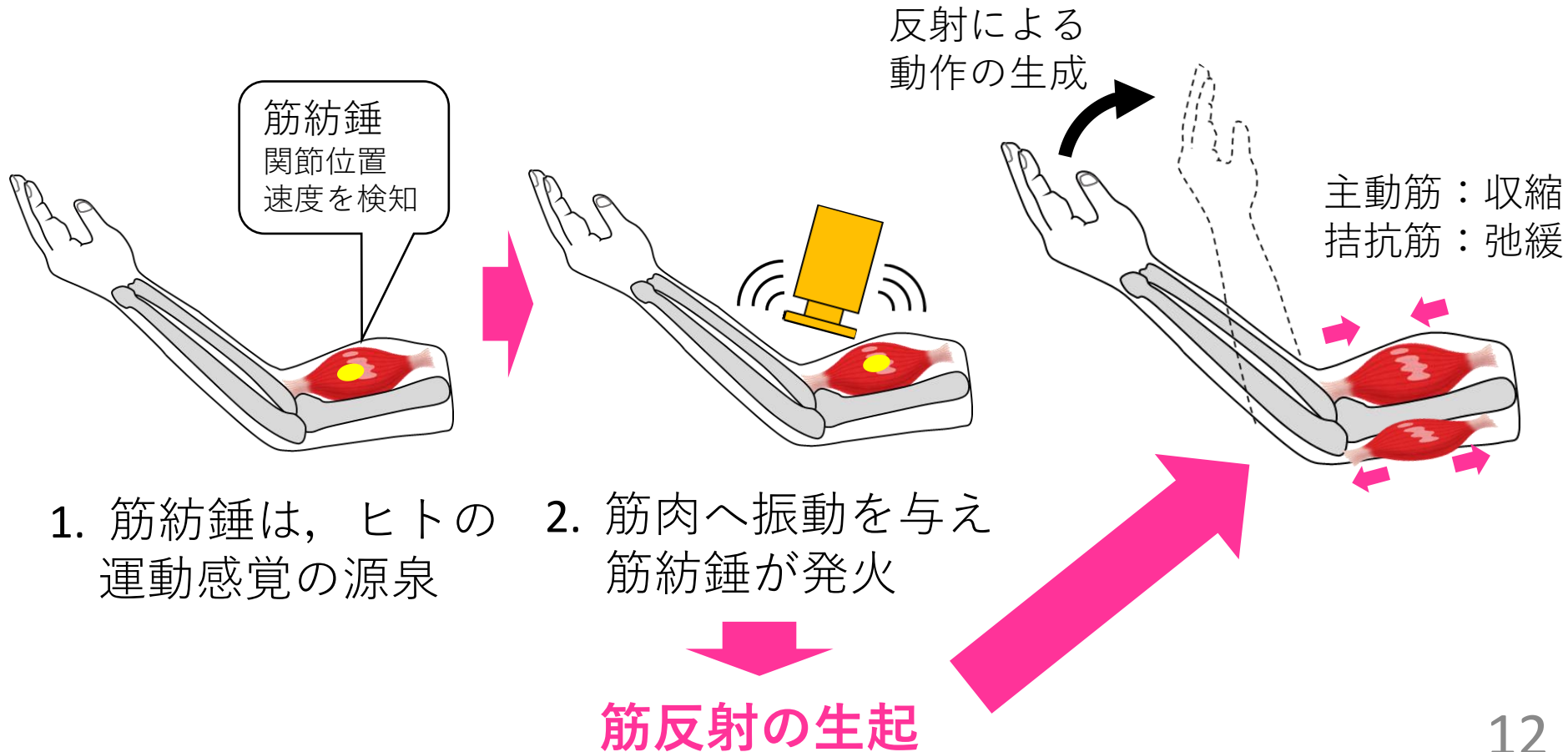
(Goodwin et. al., 1972)

(Roll et. al., 1982)

錯覚に先立ち，緊張性振動反射（TVR）も生起する



錯覚に先立ち，緊張性振動反射（TVR）も生起する



本日の発表内容

略歴紹介

錯覚・反射とは

振動刺激により生起する運動感覚と反射

➤ 運動錯覚・反射を利用したヒト動作の補正

運動錯覚をいかに精彩にするか

ヒト筋肉へ振動刺激を加えると、動作が変わる



実際の
肘関節角度

動作
変化

上腕二頭筋への振動刺激

被験者の意図する
肘関節角度

なんの役にたつのか？

動作変化に着目：危険な動作を気づかないうちに補正，振戦抑制
錯覚量制御に着目：実際の状態よりも大きな感覚：リハビリなど



(Honda, *et al.*, Proc. Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, 2016)

(Honda *et al.*, IEEE Access, 2020)

なんの役にたつのか？

動作変化に着目：危険な動作を気づかないうちに補正，振戦抑制
錯覚量制御に着目：実際の状態よりも大きな感覚：リハビリなど



(Honda, et al., Proc. Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, 2016)

(Honda et. al., IEEE Access, 2020)

研究背景：パワーアシストロボットを用いた認知アシスト

使用者の筋力をアシストするため，外骨格型パワーアシストロボットの研究が進められている。



使用者が筋力と共に視覚・聴覚といった環境認知機能も衰えている場合，周囲の環境を適切に認識できず，衝突事故などが発生する危険性がある

センサにより人間と環境とのインタラクションを監視し
必要なときに危険動作を安全動作へ変更



ロボット技術：「認知アシスト」



研究背景：使用者の筋力を活用した動作変更手法

ロボット技術：「認知アシスト」

これまでは、外骨格型パワーアシストロボットに装着されたアクチュエータからの外力によって動作変更を生成していた



使用者自身の筋力・骨格を活用して動作変更を生成することができれば、パワーアシストの必要性に応じて認知アシストの手法を選択することができる

上肢パワーアシストロボットによる
認知アシスト (木口ら, 2008)



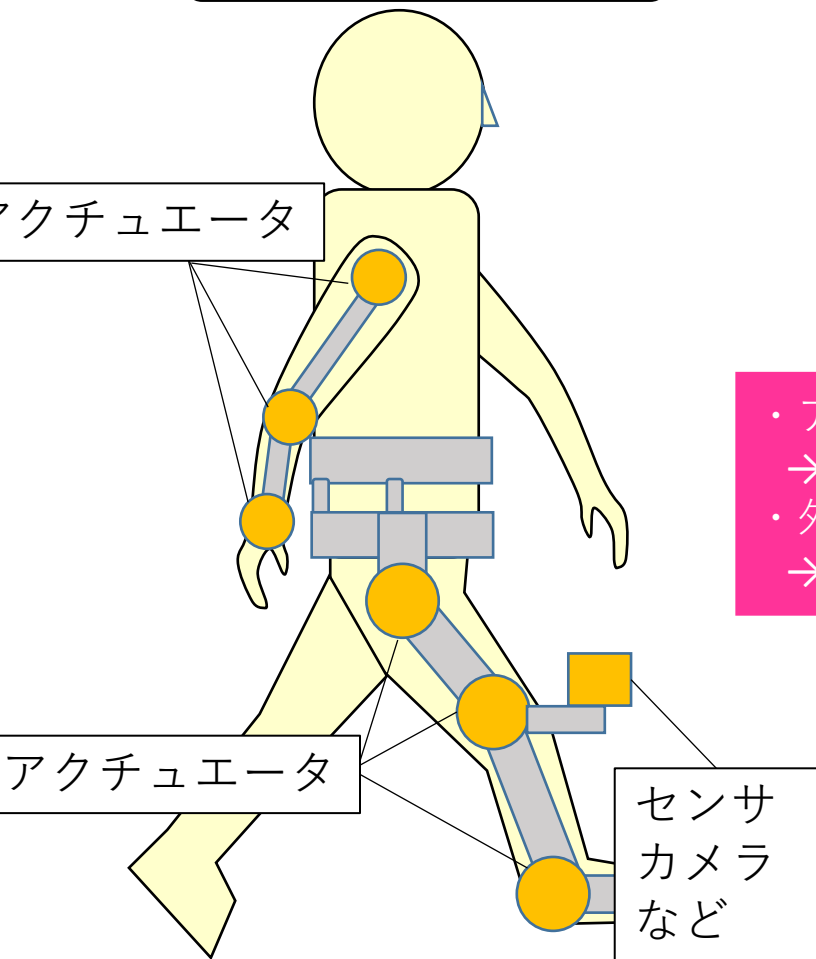
適切なリーチング動作へ補正

着眼点

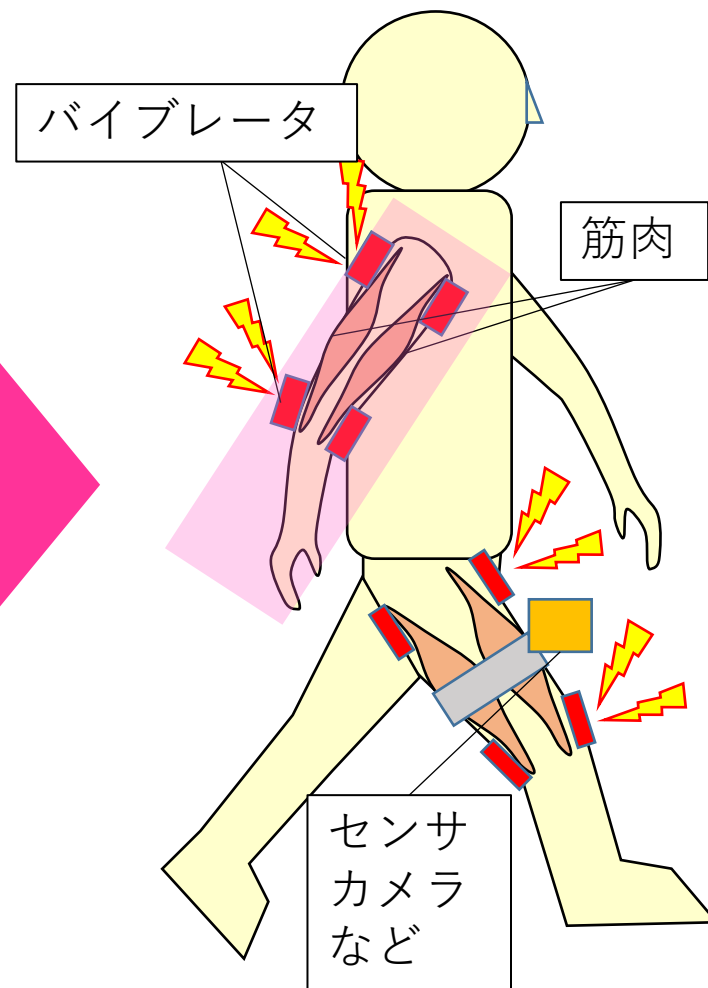
神経生理学の分野において、人体への振動刺激によって誘発される「**運動感覚の錯覚**」と「**筋反射現象**」が知られている。運動錯覚や反射現象を利用することで、使用者の筋力を活用して動作変更を生成できる可能性がある

研究のゴール： 自身の筋力を活用する認知アシスト

従来の認知アシスト



振動刺激を用いた認知アシスト



- ・アクチュエータ
→使用者の筋肉
- ・外骨格
→使用者の骨格

使用者の筋力・骨格を活用した認知アシストが可能

認知アシスト実現に向けた基礎的検討

- ① 動作変更量の増減に影響を与える振動パラメータは？
- ② 振動刺激のパラメータを変更することによって動作変更量を制御することが可能か？

上肢認知アシストの実現を目指し、
おもに**肘関節屈曲・伸展運動**に注目

認知アシスト実現に向けた基礎的検討

- ① 動作変更量の増減に影響を与える振動パラメータは？
- ② 振動刺激のパラメータを変更することによって
動作変更量を制御することが可能か？

上肢認知アシストの実現を目指し、
おもに**肘関節屈曲・伸展運動**に注目

動作変更量に影響を与える振動パラメータの検討

振動を与える腕と与えない腕の角度差で効果測定



実際の
肘関節角度

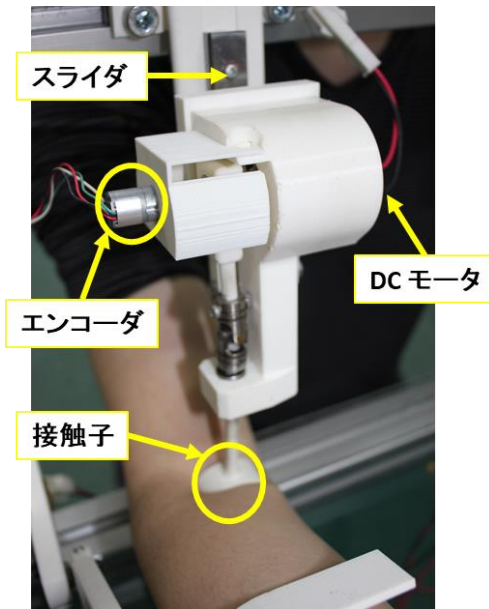
動作
変化

上腕二頭筋への振動刺激

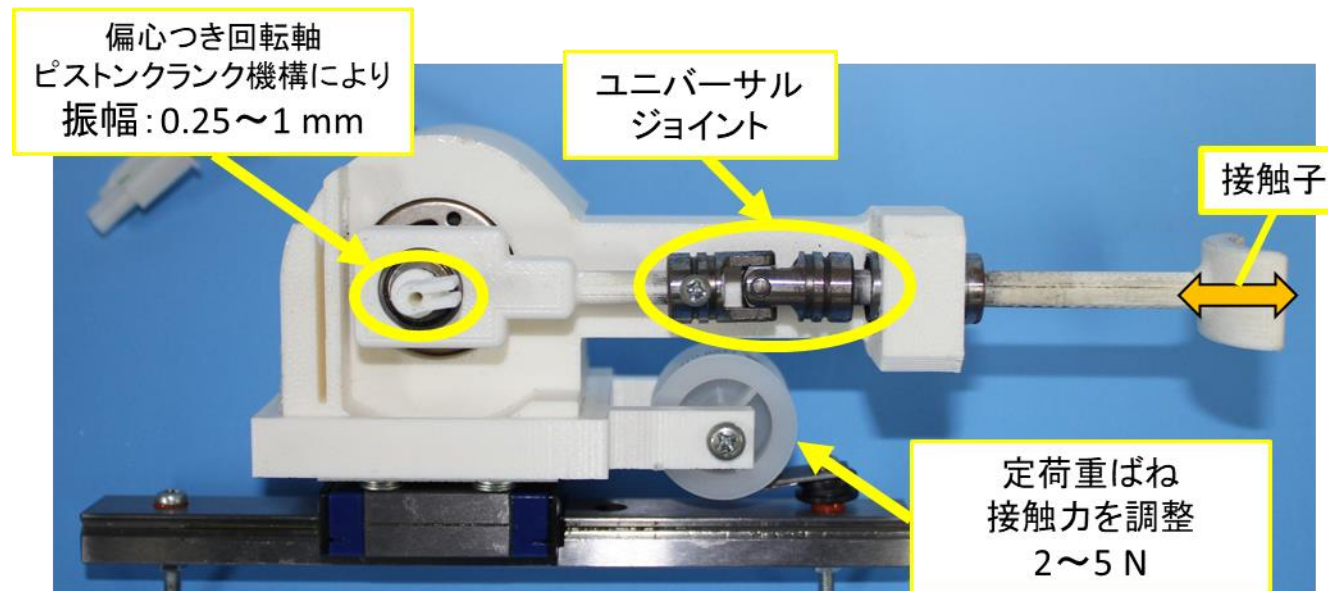
被験者の意図する
肘関節角度

動作変更量に影響を与える振動パラメータの検討

運動錯覚・緊張性振動反射に関する先行研究から、
振動刺激の周波数・振幅・接触力が動作変更量に影響を与える可能性



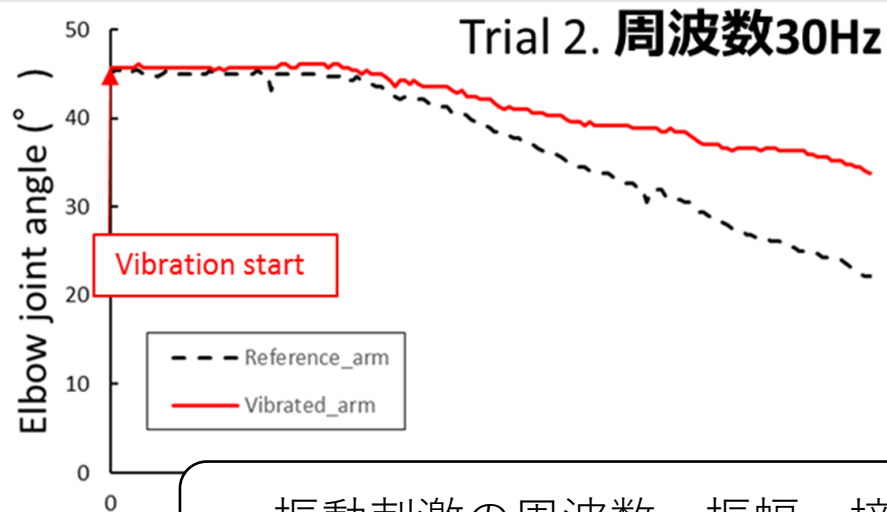
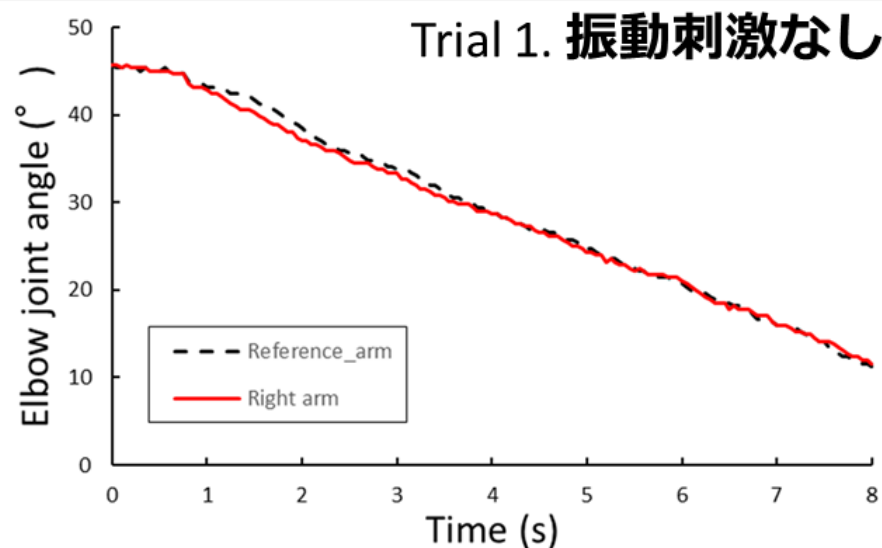
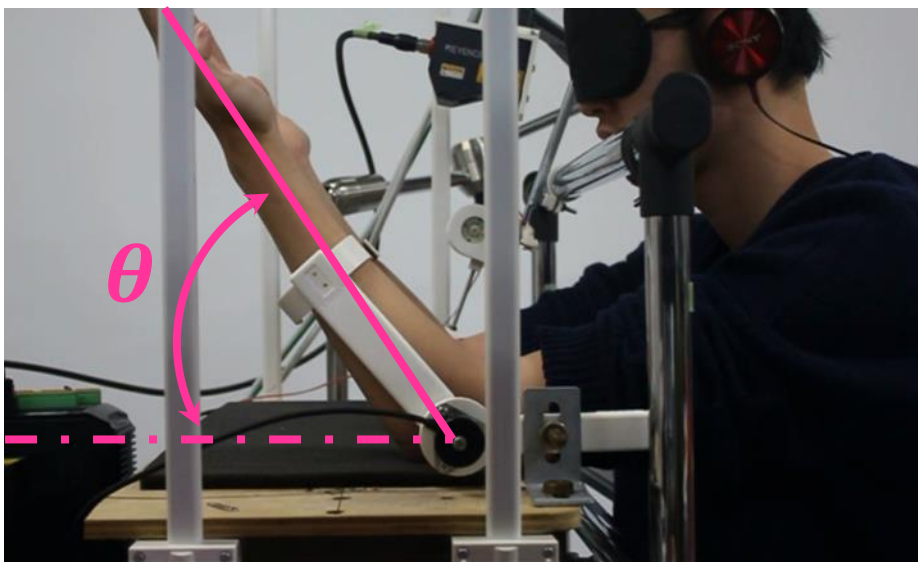
装置に取り付けた状態
(Honda et. al. IEEE Access, 2020を一部改変)



ピストンクランク機構により一定振幅定荷重ばねにより接触力調整
(Honda et. al. IEEE Access, 2020を一部改変)

振動刺激の周波数・振幅・接触力を調整可能な振動子の作成

動作変更量に影響を与える振動パラメータの検討



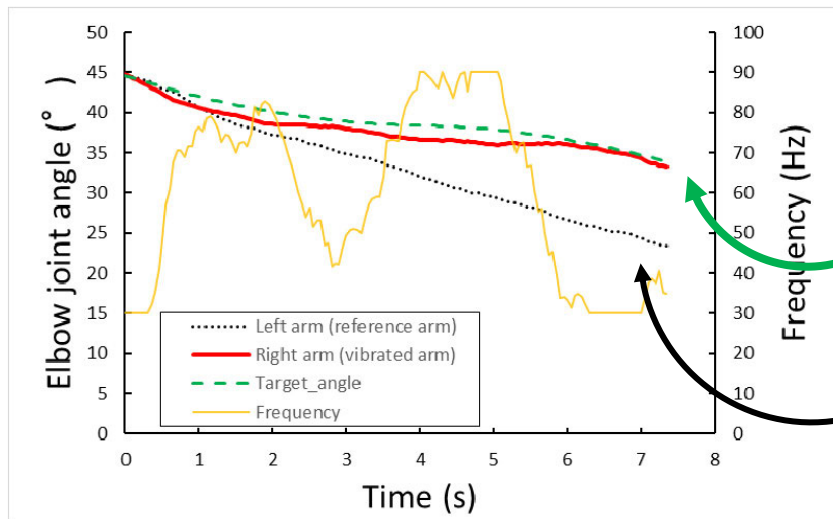
振動刺激の周波数・振幅・接触力を変化させ、**周波数**が
動作変更量の増減に影響を与えると発見

認知アシスト実現へ向けた基礎的検討

- ① 動作変更量の増減に影響を与える振動パラメータは？
- ② 振動刺激のパラメータを変更することによって動作変更量を制御することが可能か？

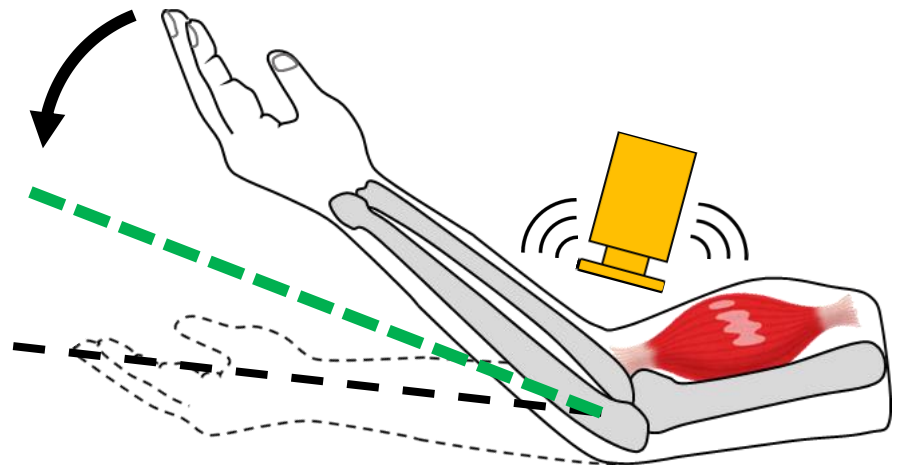
上肢認知アシストの実現を目指し、
おもに**肘関節屈曲・伸展運動**に注目

動作中の錯覚生起，動作変更量制御に成功



(Honda et. al. IEEE Access, 2020)

肘関節伸展動作



— 実際の肘関節角度 意図する肘関節角度 - - - 目標肘関節角度

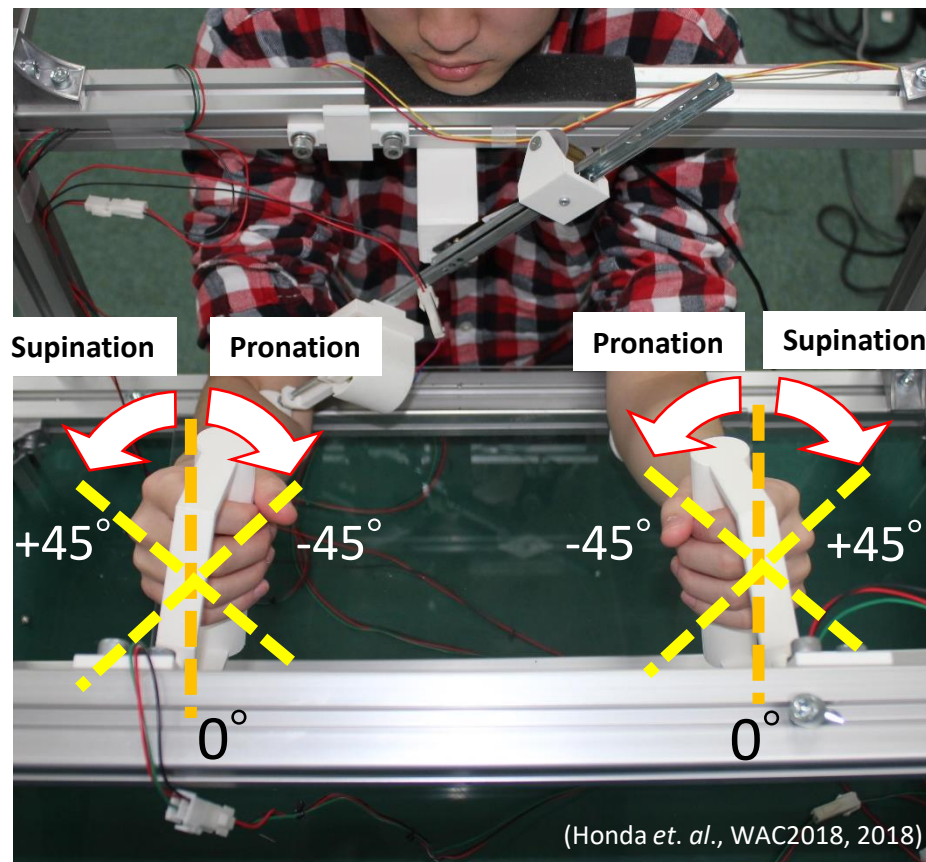
意図する動作が危険動作であるとき，
危険動作を“気づかないうちに”安全な動作へ変更する

後輩による研究の展開

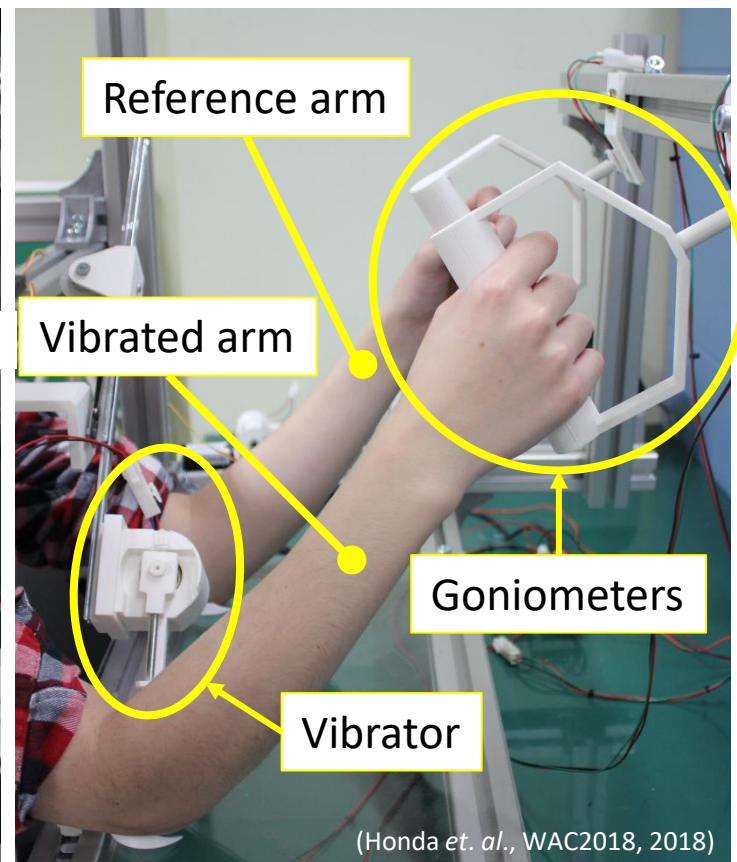
振動刺激の特長

表面以外の筋を刺激可能：振戦抑制へ

着想の背景



Front view

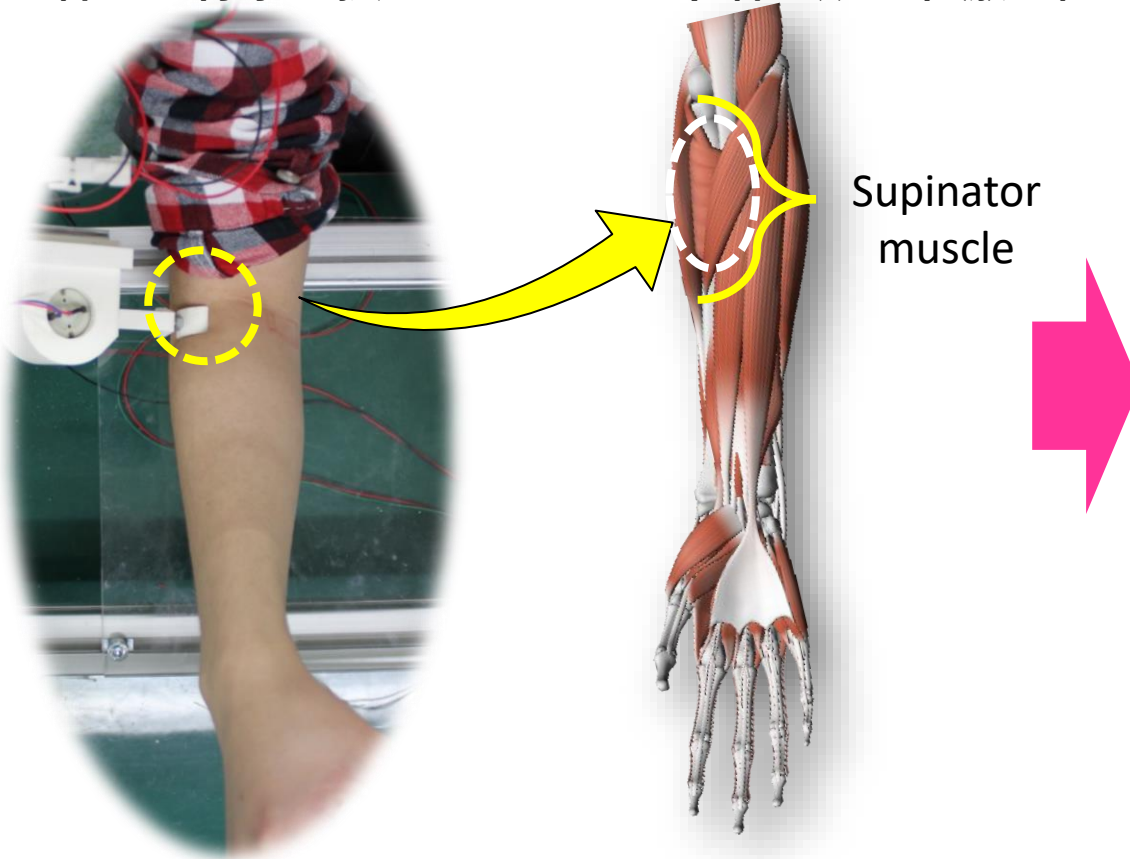


Side view

後輩による研究の展開

表面以外の筋を刺激可能：振戦抑制へ

着想の背景：振動は重なった下層の筋を刺激可能



振動刺激による
振戦抑制
下記論文をご参照
ください

Wenbin Liu, Takeru Kai, Kazuo Kiguchi, "Tremor Suppression with Mechanical Vibration Stimulation", IEEE Access, vol.8, pp. 226199-226212, 2020.

後輩による研究の展開

装着型ロボットの違和感減少へ応用

木口研ホームページ：装着型ロボットの研究紹介をご参照ください
<https://system.mech.kyushu-u.ac.jp/jp/research.html>

本日の発表内容

略歴紹介

錯覚とは何だろうか

振動刺激により生起する運動感覚：運動錯覚

運動錯覚・反射を利用したヒト動作の補正

➤ 運動錯覚をいかに精彩にするか

運動錯覚の利用と技術的課題

バーチャルリアリティ：

アバターの動きと感覚を合わせる．ヒトに不可能な動きを感じさせることも可能

リハビリテーション：

動いていない体が動いているように感じることで脳機能の回復を促す

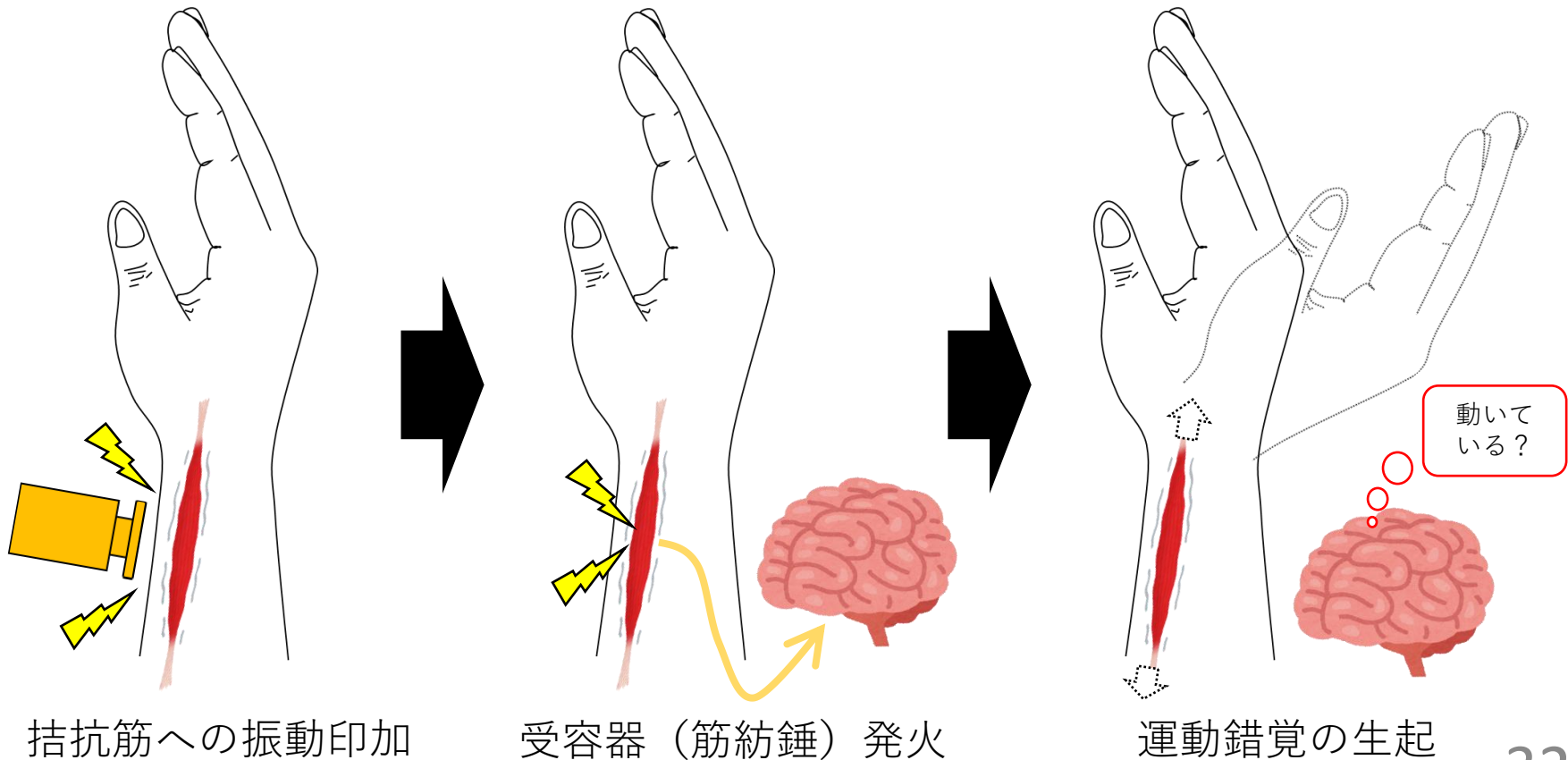
✓錯覚が起きにくい被験者がいる

✓錯覚が生じるまでに時間がかかる被験者がいる

✓錯覚が生じても，錯覚量が小さい被験者がいる

肘，前腕から現在手首に着目して運動錯覚を研究

例：手首背屈動作の運動錯覚の生起



問題点：錯覚の生じる・生じない被験者

錯覚の生起率向上の方策としての多感覚入力

触覚への刺激

下記論文をご参照ください

Collins *et al.*, Cutaneous Receptors Contribute to Kinesthesia at the Index Finger, Elbow, and Knee, 2005

下記論文をご参照ください

Rinderknecht *et al.*, Combined Tendon Vibration and Virtual Reality for Post-Stroke Hand Rehabilitation, 2013

視覚フィードバック

下記論文をご参照ください

Kaneko *et al.*, Physiological mechanisms of visually-induced kinesthetic illusion and its clinical applications in stroke rehabilitation, 2016

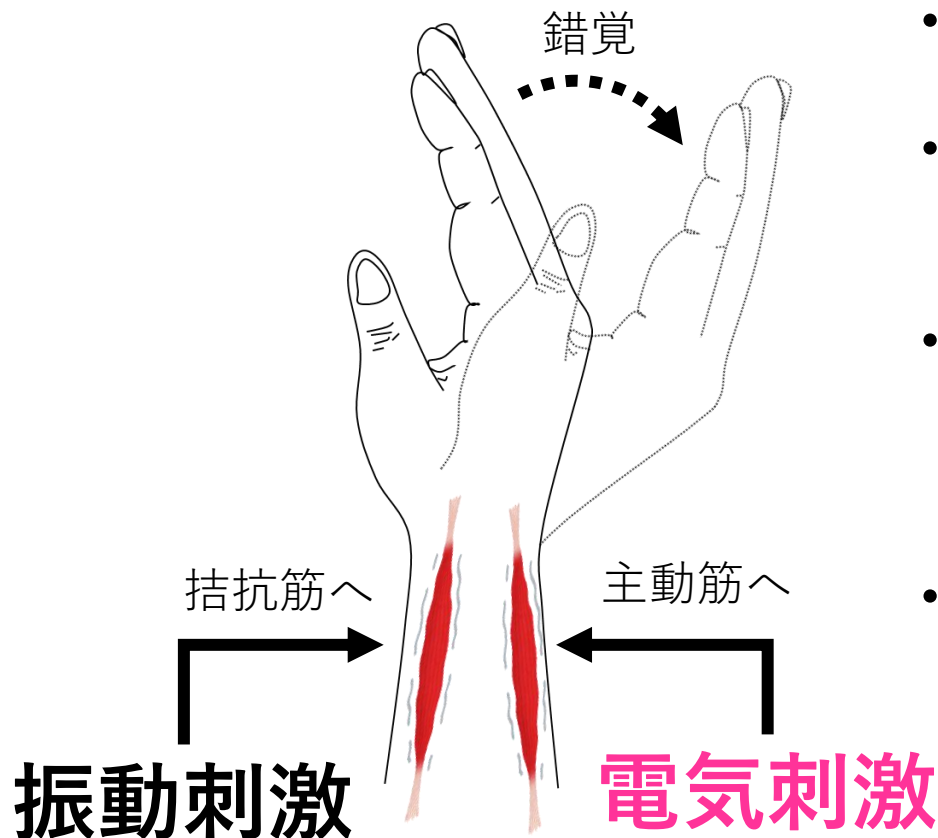
視覚フィードバック

下記論文をご参照ください

Franç *et al.*, Influence of virtual reality visual feedback on the illusion of movement induced by tendon vibration of wrist in healthy participants, 2020

提案手法

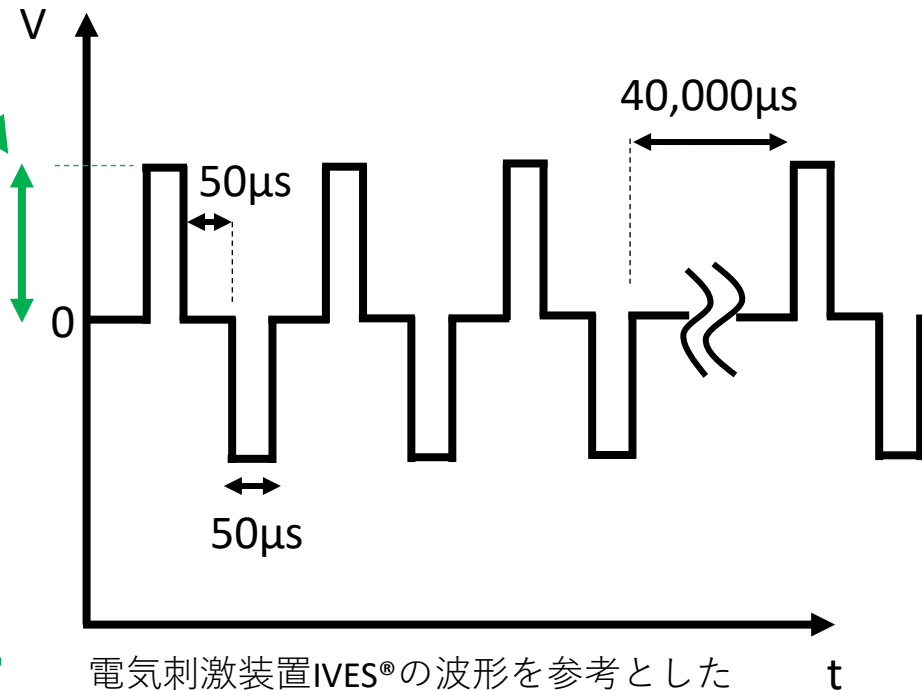
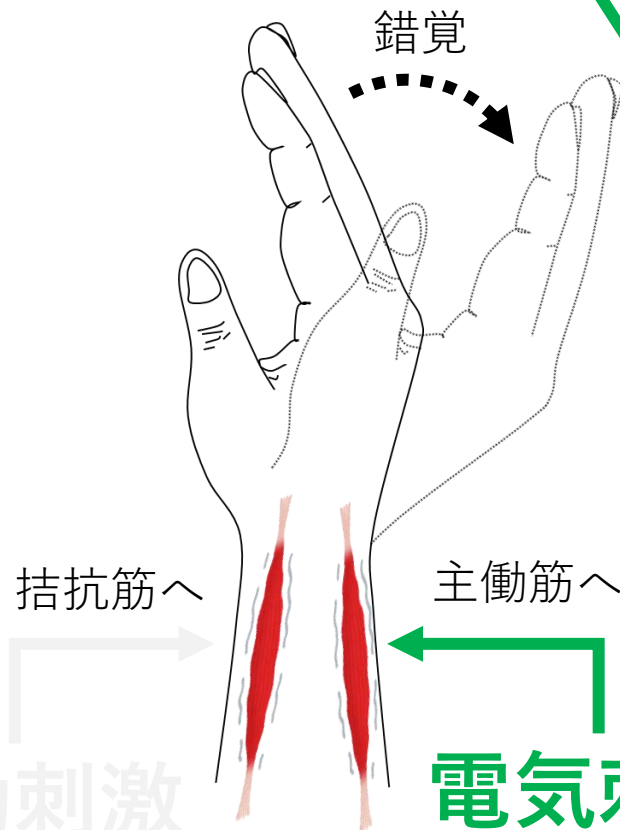
電気刺激と振動刺激を拮抗する筋へ与え筋収縮



- 手首背屈方向の錯覚を生起
- 手首背屈動作の主動筋・拮抗筋へ電気刺激・振動刺激を与えた
- 電気刺激による筋収縮により，筋に張力が生じ，手首が背屈方向に押されているような感覚が生起
- 振動刺激による，筋が伸びる感覚と合わせることで，錯覚生起率の向上が期待できる

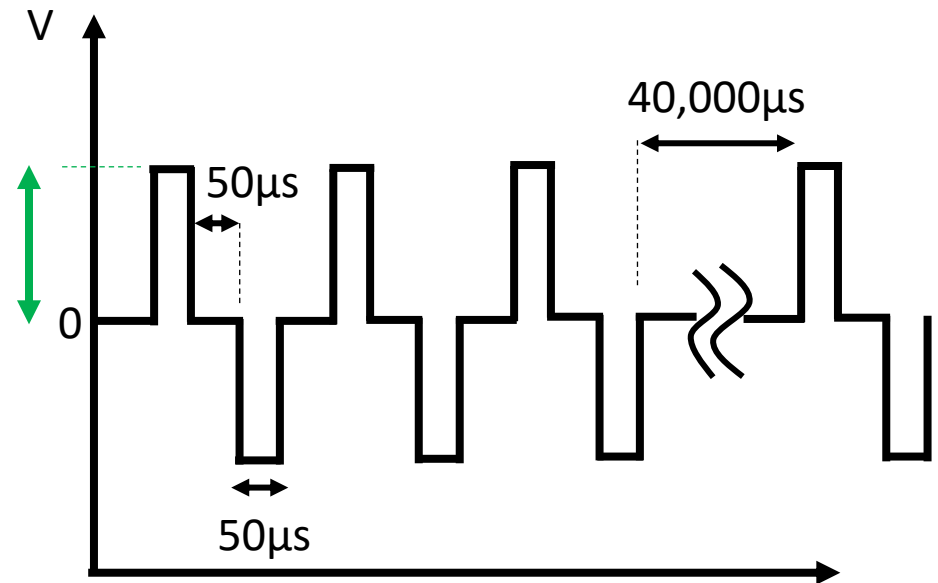
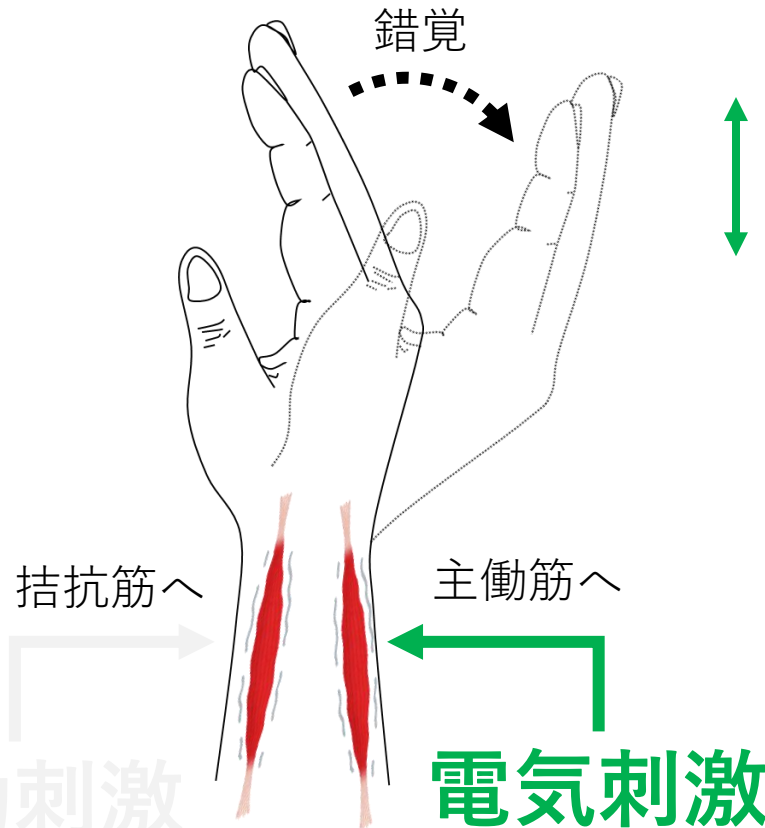
提案手法

電気刺激の電圧を調整し主動筋刺激



提案手法

電気刺激の電圧を調整し主動筋刺激

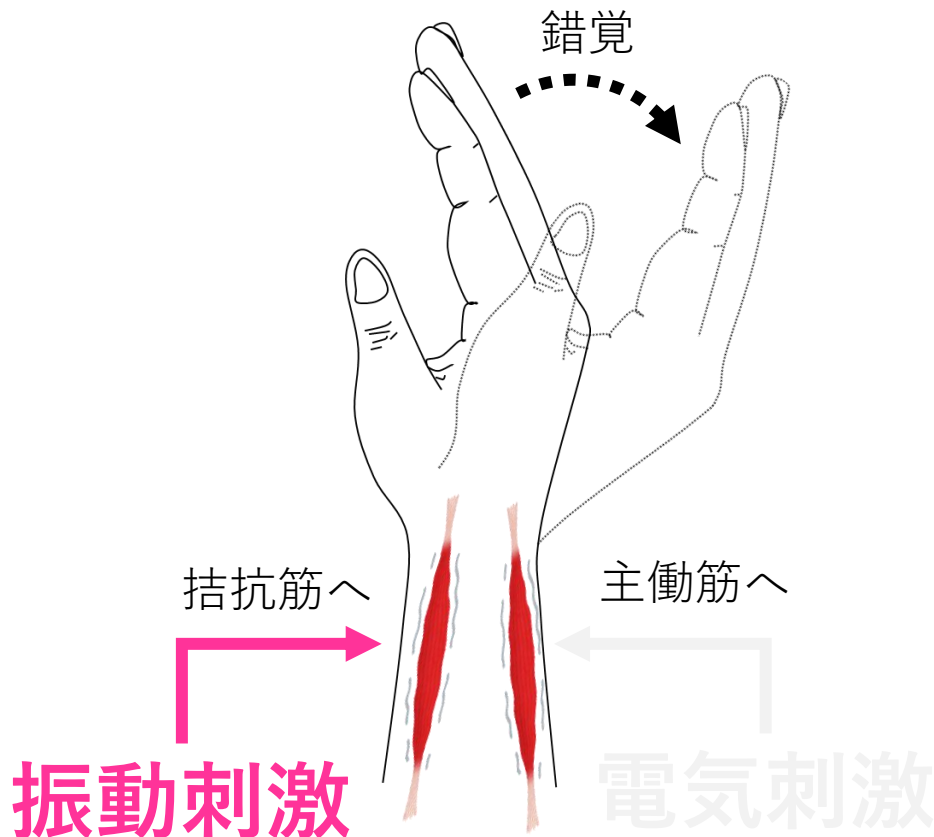


電気刺激装置IVES®の波形を参考とした

- 電圧は3条件. 手首拘束なしで
高電圧 : 背屈動作生じ始め+3V
中電圧 : 背屈動作生じ始め電圧
低電圧 : 背屈動作生じ始め-3V
 を各被験者ごとに決定

提案手法

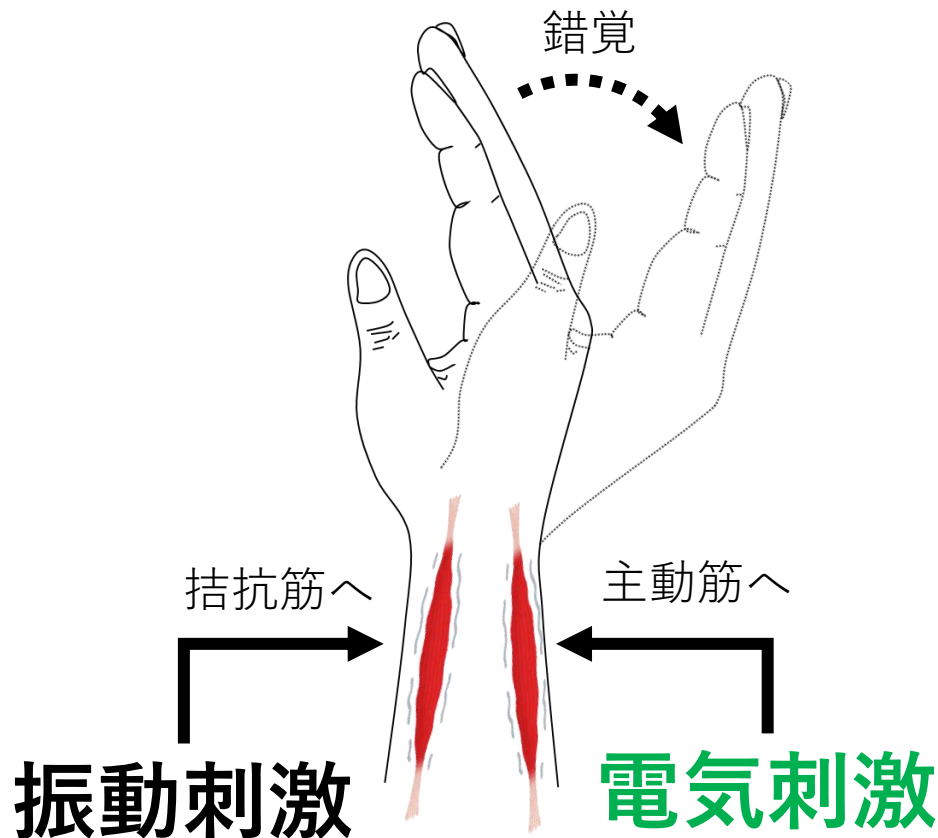
振動刺激の周波数は20 Hzで提示



- 手首背屈動作の主働筋・拮抗筋へ電気刺激・振動刺激を与えた
- 振動刺激周波数は，錯覚が生起する被験者とししない被験者とに分かれやすい**20 Hz**（通常より低い値）で提示
- 振幅：1 mm_{p-p} 接触力：1-2 N

提案手法

提案手法と従来手法で電圧を変えつつ実験



各被験者，各電圧条件での実験

	20 Hz		
提案手法 3条件	1 st	2 nd	3 rd
従来手法	1 st	2 nd	3 rd

- 4電圧条件（電圧なし含む）で各3トライアル実施
- 被験者は健常成人9名（男性6名，女性3名，利き手右）

電極

振動子

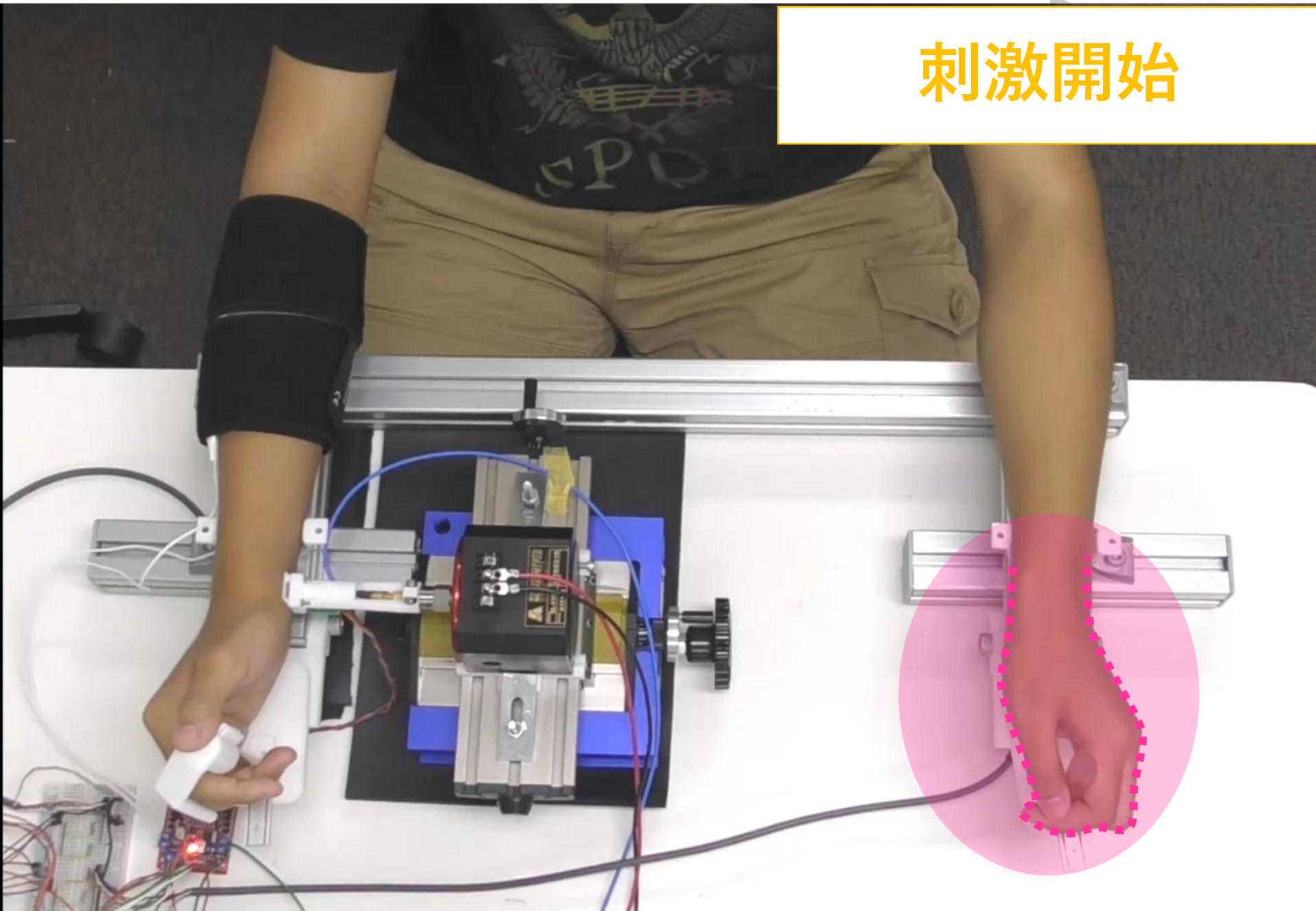
右手

錯覚生起
静止状態

左手

錯覚再現
動作生成

刺激開始

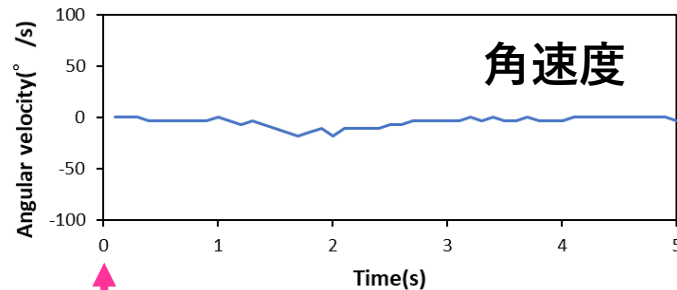
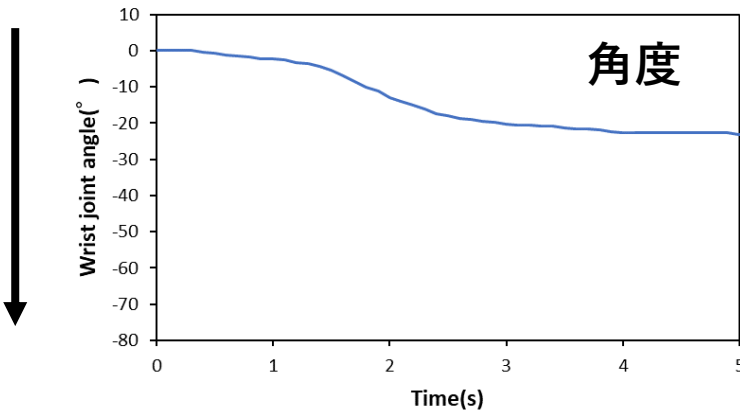


実験結果

提案手法でも運動錯覚を確認

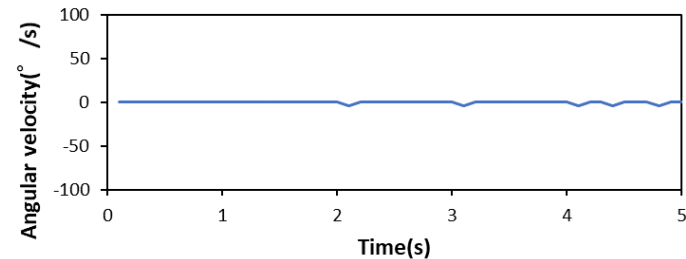
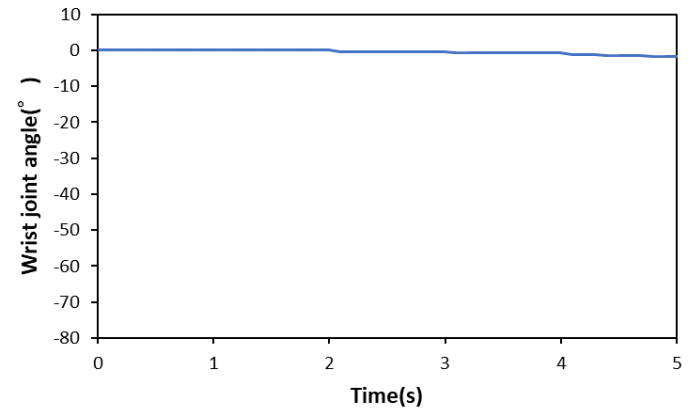
提案手法（振動＋電気）

手首
背屈



↑ T=0 刺激開始

従来手法（振動）

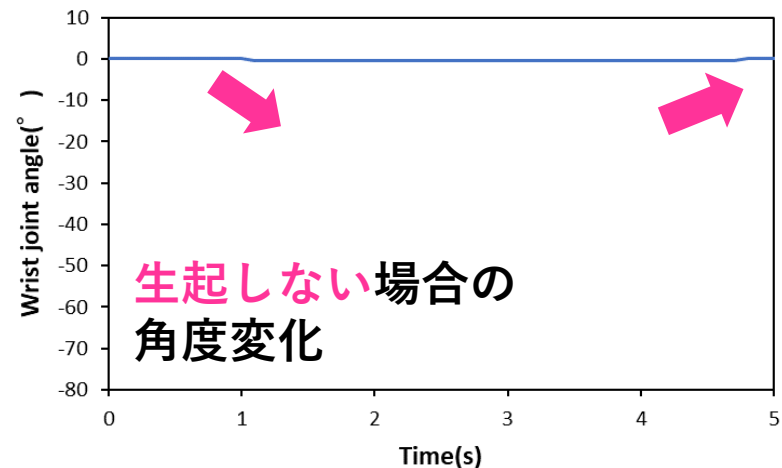
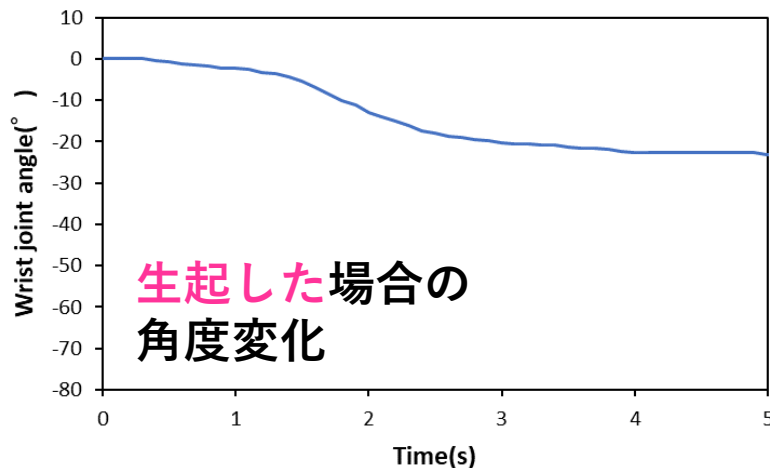


※代表被験者，振動刺激周波数20 Hzを掲載

錯覚生起・生起せずの判断基準について

持続的な手首背屈動作をもって錯覚ありとする

※代表被験者，振動刺激周波数20 Hzを掲載

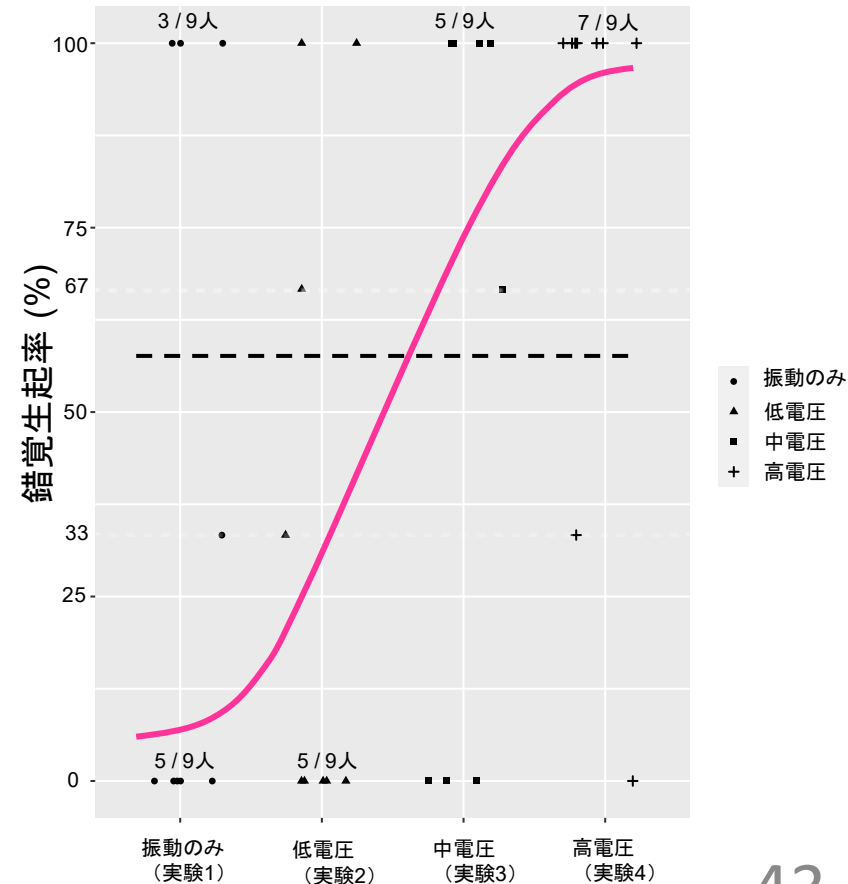


- 持続的な手首背屈動作の確認
- 一時的な掌屈動作がみられても，再度背屈動作へ転じ，背屈動作をし続けた場合は錯覚ありとした
- 全く手首背屈動作がみられない
- 背屈動作が一時的に確認されても，掌屈動作に転じ，その後背屈動作がみられない

振動刺激と電気刺激による錯覚生起率の向上

統計モデリングにより効果を確認

- 錯覚生起率：
各被験者，各条件3回試行での生起回数
- 条件：振動は常に20Hz（生起する・しない 分かれる）
電気刺激なし，低電圧，中電圧，高電圧
- 右図は，各被験者，各電圧条件での生起率を示す．電気刺激の効果があるのか分析
- ロジスティック回帰**（電気刺激効果あり）と**一定モデル**（電気刺激効果なし）とで，当てはまりの良さを比較．電気刺激に有意な効果を確認
- 被験者の個人差などを考慮したヒトの反応の分析に使用できる



データの性質に合わせた統計モデルを選択

- 生態学や音韻論，錯覚研究で近年使用
(久保, 2012)，(粕谷, 2012)，(Moscatelli et. al., 2015)
- 回帰分析の一種，説明変数の効果検定
- データが，「上限ある・なし」や「連続値・離散値」であるかにより当てはめるモデルを下記カテゴリで選択する
- 「リンク関数」と「確率分布」を選択
- リンク関数：ロジット関数
$$q_i = \frac{1}{1 + \exp\{-(\beta_1 + \beta_2 x_i + r_i)\}}$$

(

q_i : 生起率期待値

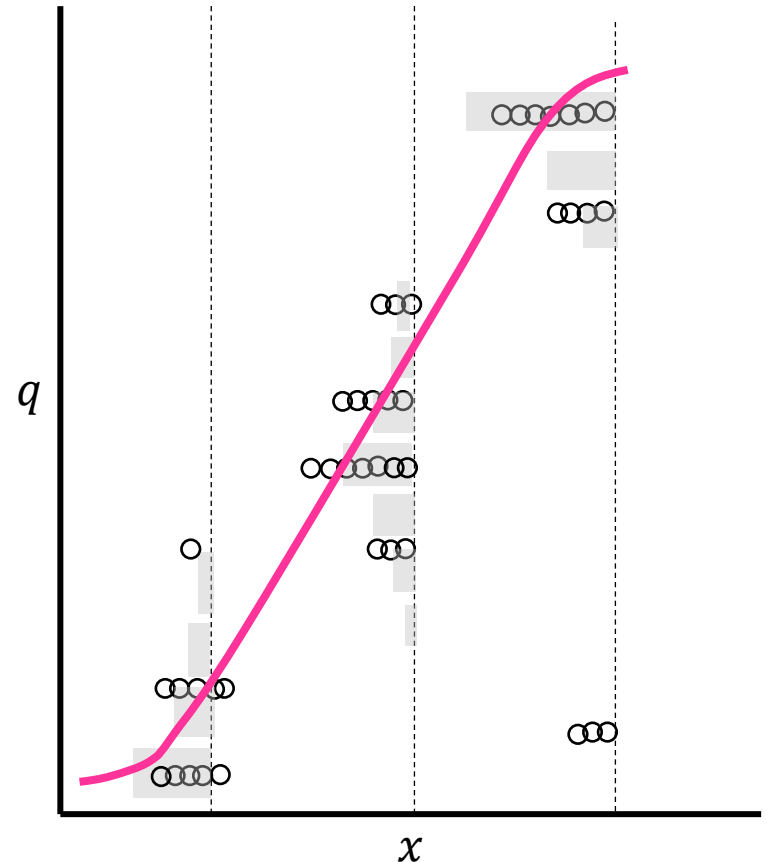
β_1 : 推定する係数

β_2 : 推定する係数

x_i : 電圧値

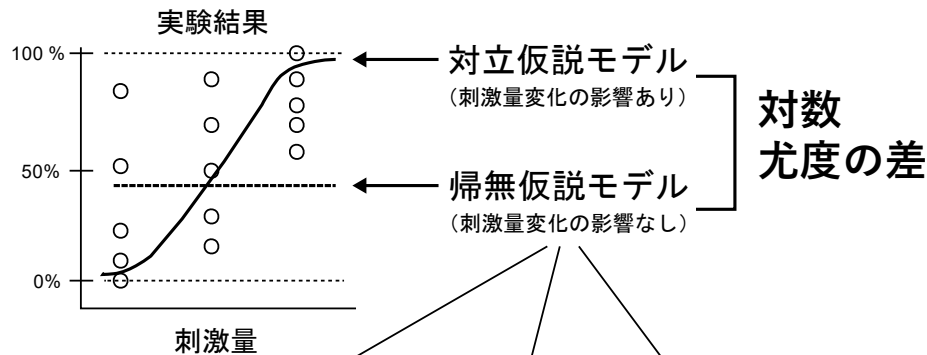
r_i : 個人差項

)
- 確率分布 : 二項分布

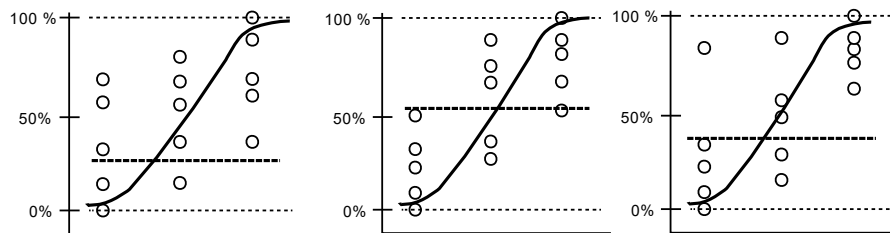


検定について

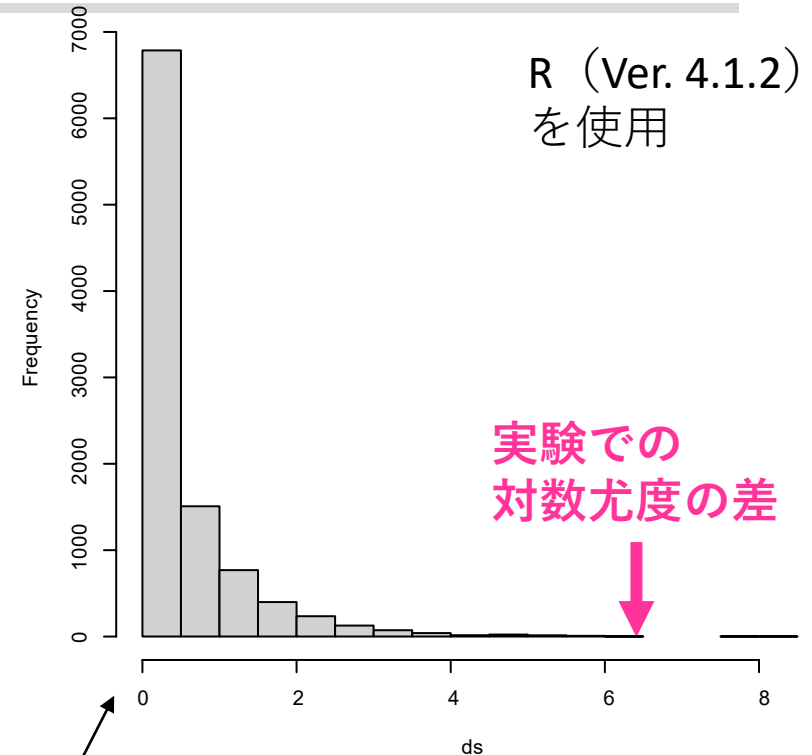
対立仮説（ロジスティック回帰）と 帰無仮説（一定モデル）でパラメトリックブートストラップ法使用



パラメトリックブートストラップによるデータ生成



シミュレーションデータで対数尤度の差を求め、ヒストグラムを作成

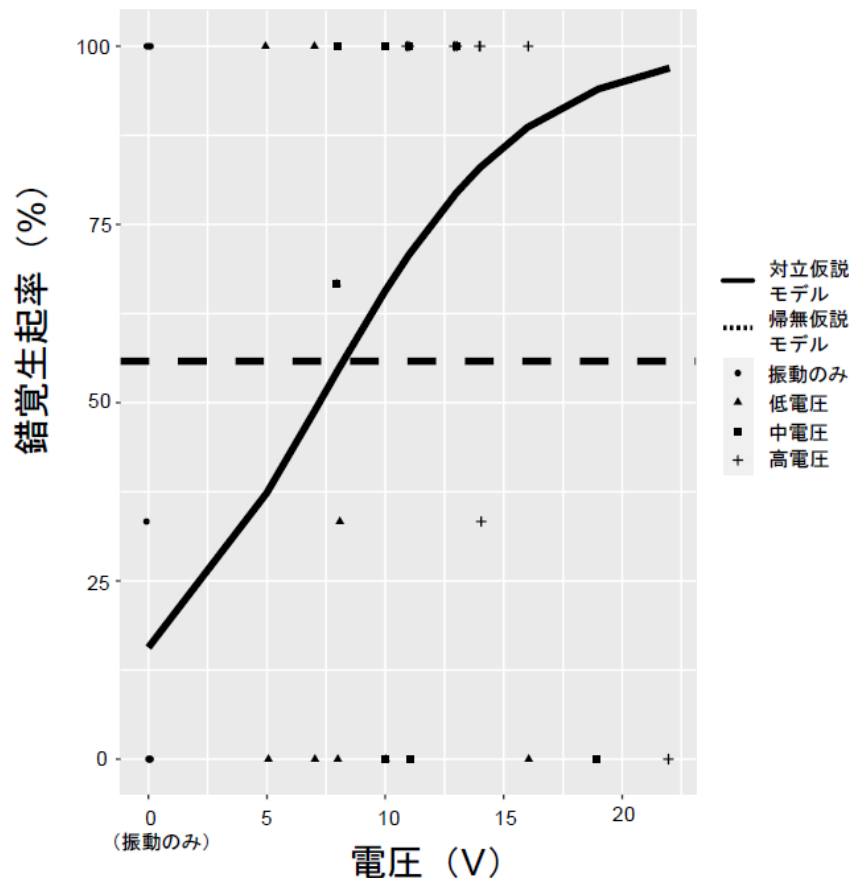


対数尤度の差のヒストグラムを作成

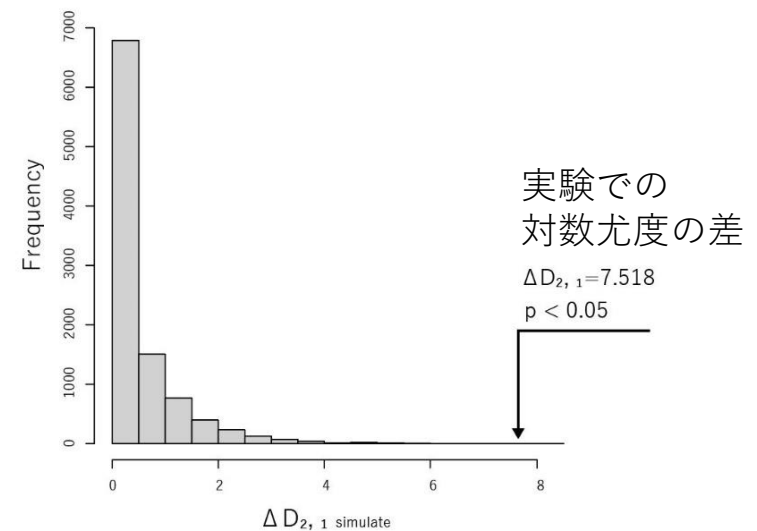
実験で得られた対数尤度は
“たまたま”よかったのか？
5%有意水準で検定

統計モデリングによる分析結果

電圧変化を説明変数に含む対立仮説モデルが有意に当てはまりが良い



(本田 et. al., バイオメカニズム, 2023, in press)



- 実験での対数尤度の差は7.518
- これは10000回のパラメトリックブートストラップ計算により得られたヒストグラムにおいて片側0.002%の確率で起こる値
- 電圧変化は錯覚生起率の向上へ寄与している

まとめ

電圧変化が錯覚生起率向上へ寄与する

(バイオメカニズム, 2023, 出版中)

- 錯覚生起開始時間（潜時）の短縮にも寄与するか？
→ JRM Vol. 35 No. 3にて掲載予定
- 錯覚量の増大にも寄与するか？
→ 検討中
- 回帰の特長の一つである「予測」．同一被験者に対して日が変わっても生起率を予測できるか？