

# 足動作による運動準備電位の研究

## Study of readiness potential on foot movement

東海大学

高橋玲音、リーラシリ・プワデ、安藝史崇、山崎清之

1

## はじめに

- **脳波**：ヒトの生命活動に伴う脳神経細胞の電氣的活動  
時間的・空間的にランダムに発生
- **運動準備電位** (RP: Readiness Potential)  
→運動の1.0~1.5s前に生じる**陰性電位**
- **BMI: Brain Machine Interface** = 脳と機器をつなぐ  
→脳波などの生体信号により、使用者の**意図に応じて機器を制御**
- AIの**深層学習 (Deep Learning)** による生体信号の**分類・予測**  
→脳波のような**時系列データ**には**LSTM**が用いられる

2

## 目的

RPを左右足それぞれ3条件下で測定



測定条件間の有意差の検討

+

LSTMによる条件分類



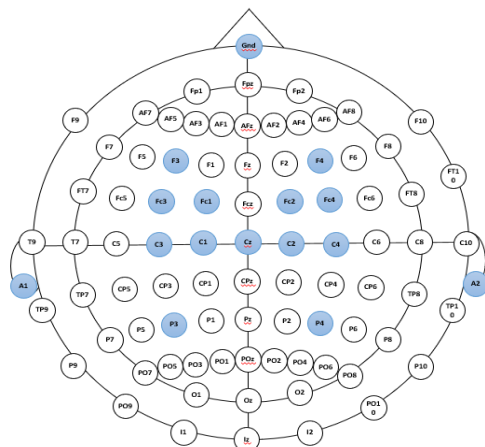
BMIの適切な制御

3

## 測定方法

- 被験者：健常男子大学生6名
- 場所：静電シールドルーム
- 国際10-10法に基づき電極を装着（図1）

{ F3, F4  
 Fc1, Fc2, Fc3, Fc4  
 C1, C2, C3, C4  
 P3, P4  
 A1, A2（基準電極：耳朶）  
 Cz（システムレファレンス）  
 Gnd（前額部）



## 測定条件

### 第1・2条件

ランダムに計50回ずつ画像を提示（図2）

↓  
 [ **実動作** : ボタンを踏ませた  
**動作想起** : 踏むイメージをさせた

### 第3条件

任意動作 : 被験者の任意のタイミングで  
ボタンを踏ませた

→ 右足と左足それぞれで行わせた

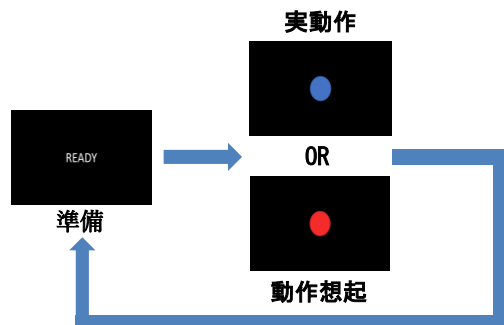


図2. 画像提示の流れ

5

## 解析方法

### ①加算平均

測定条件ごとに50回加算平均 → グラフを作成

### ②2因子ANOVA+多重比較（MATLAB R2023b使用）

RPのピークを用いた

- ・ ANOVA → 運動条件と運動部位の2因子に関して有意差を検討
- ・ 多重比較 → 具体的に、どの条件間に有意差があるか検討

6

## 解析方法

### ③LSTM (MATLAB R2023b使用)

RPの生データを入力 → 運動条件・運動側の判別



図3. LSTMの学習モデル

7

## 結果①-1: 加算平均波形(指示動作)

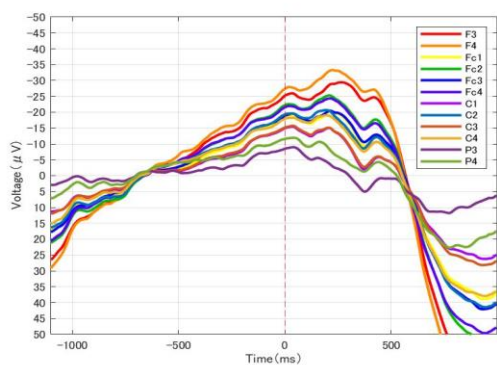


図4. 動作想起時のRP加算平均波形

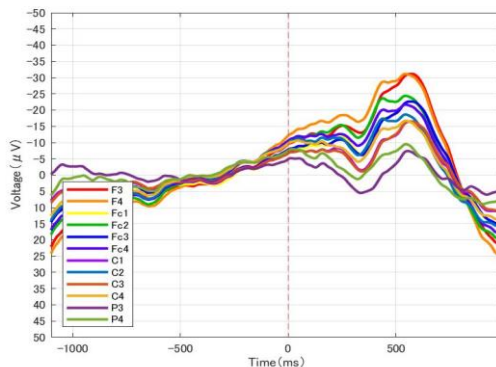


図5. 実動作時のRP加算平均波形

8

## 結果①-2: 加算平均波形(任意動作)

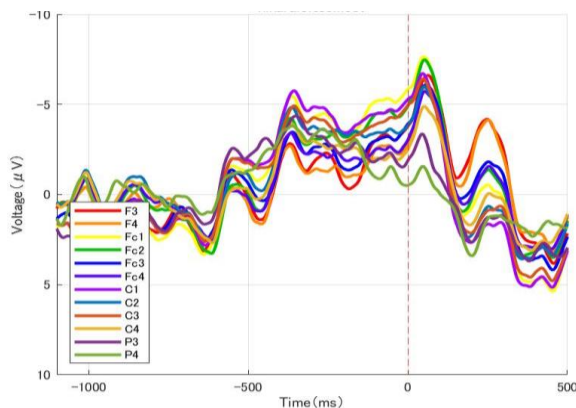


図6. 任意動作時におけるRP加算平均波形

9

## 結果②-1: 2因子ANOVA

表1. 2因子ANOVA表 (F3)

因子	SS	df	MS	F	P
運動条件	9235.54	2	4617.77	5.60	0.00
運動側	425.84	1	425.84	0.52	0.47
交互作用	301.92	2	150.96	0.18	0.83

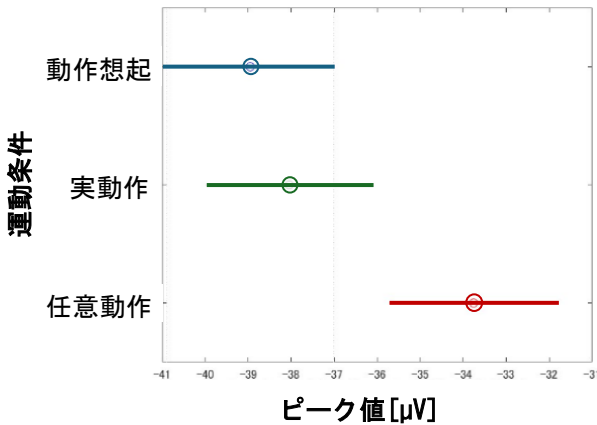
表2. 2因子ANOVA表 (F4)

因子	SS	df	MS	F	P
運動条件	17755.19	2	8877.59	9.05	0.00
運動側	160.55	1	160.55	0.16	0.69
交互作用	2020.96	2	1010.48	1.03	0.36

- **F3** (F=5.60, P=0.00<0.05) と **F4** (F=9.05, P=0.00<0.05) の **運動条件間** に有意差
- 運動側と交互作用・・・有意差なし

10

## 結果②-2: 多重比較



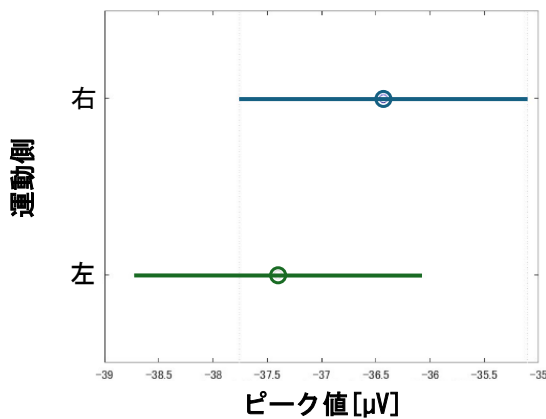
[F3における運動条件]

- ①ピークの平均値 (“○” 部分)  
動作想起 > 実動作 > 任意動作
- ②信頼区間 (“—” 部分)
  - ・動作想起と実動作で一部重複
  - ・任意動作のみ独立

図7. 運動条件における多重比較 (F3)

11

## 結果②-2: 多重比較



[F3における運動側]

- ①ピークの平均値 (“○” 部分)  
左 > 右
- ②信頼区間 (“—” 部分)  
右と左で一部重複

図8. 運動側における多重比較 (F3)

12

## 結果②-2: 多重比較

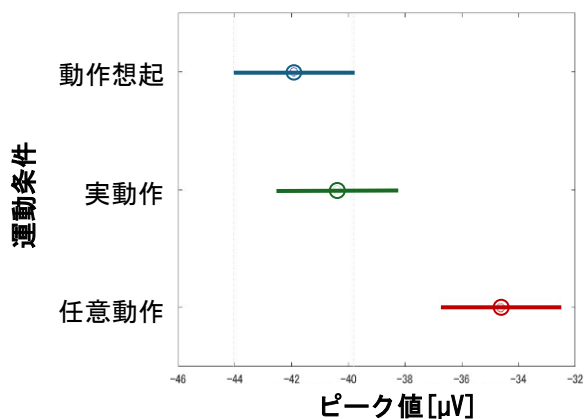


図9. 運動条件における多重比較 (F4)

[F4における運動条件]

- ① ピークの平均値 (“○” 部分)  
動作想起 > 実動作 > 任意動作
- ② 信頼区間 (“—” 部分)
  - ・ 動作想起と実動作で一部重複
  - ・ 任意動作のみ独立

13

## 結果②-2: 多重比較

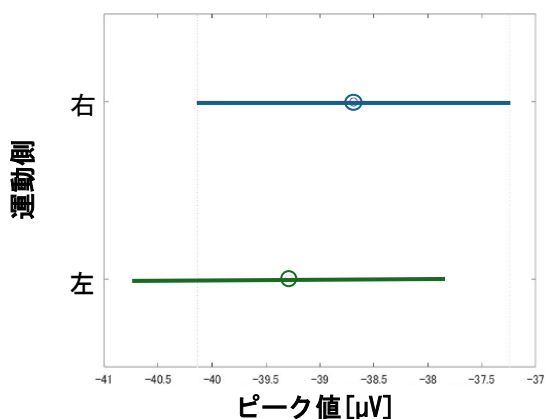


図10. 運動側における多重比較 (F4)

[F4における運動側]

- ① ピークの平均値 (“○” 部分)  
左 > 右
- ② 信頼区間 (“—” 部分)  
右と左で一部重複

14

## 結果②-2: 多重比較(まとめ)

### [運動条件]

- F3, F4ともに

#### ①ピークの平均値

動作想起 > 実動作 > 任意動作

#### ②信頼区間

- 動作想起と実動作で一部重複
- 任意動作のみ独立

### [運動側]

- F3, F4ともに

#### ①ピークの平均値

左 > 右

#### ②信頼区間

右と左で一部重複

15

## 結果③: LSTM

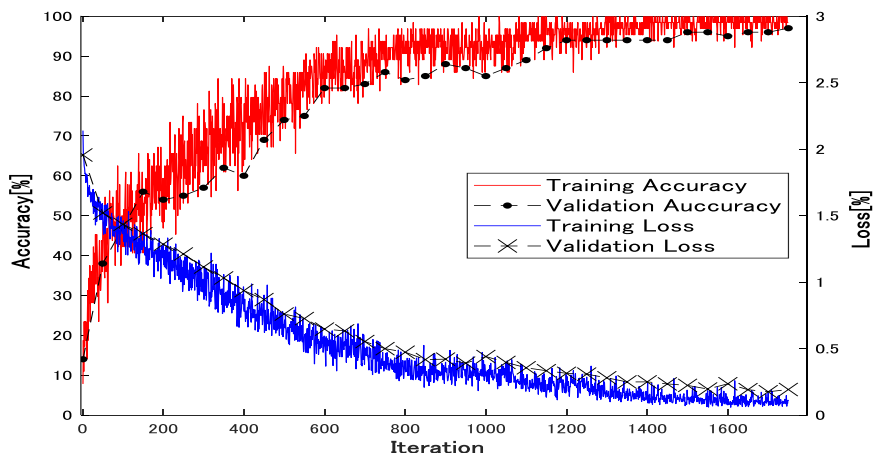


図11. LSTMの精度 (赤) と損失 (青)

16



## 考察:ANOVA+多重比較

[ANOVA]

F3, F4は前頭葉前部に位置



前頭前野 (判断や思考を行う)



はたらきを測定

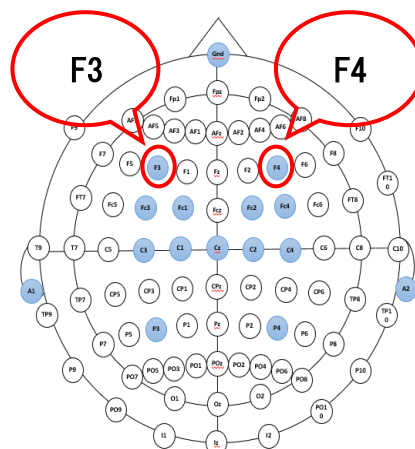


図1. 電極配置図 (再掲)

17

## 考察:ANOVA+多重比較

### ①運動条件

動作想起+実動作 : 画像指示

任意動作 : 無指示

### ・画像指示

→動作を判断 = 前頭前野が活性

→画像指示の方がピークが大きくなる

・画像指示でもピーク平均は  
動作想起 > 実動作

→動作想起 : 判断+イメージ  
実動作 : 判断

→動作想起

・・・より強く前頭前野が活性

→ピークが大きくなる

18

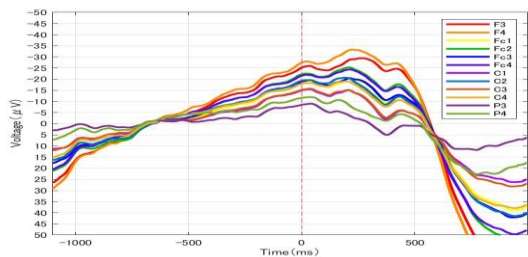


図4. 動作想起時のRP加算平均波形（再掲）

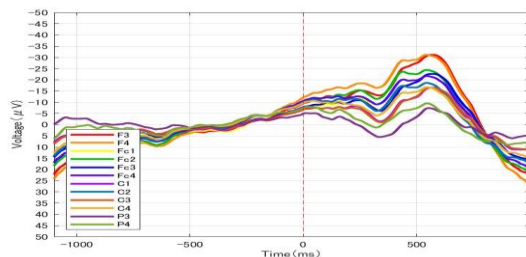


図5. 実動作時のRP加算平均波形（再掲）

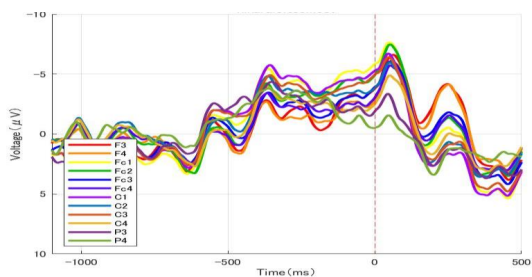


図6. 任意動作におけるRP加算平均波形（再掲）

19

## 考察: ANOVA + 多重比較

### ②運動側

ピーク平均：左 > 右・・・機能分担による

ex. サッカー：蹴る足・軸足

→全被験者の利き足は右足

→左足では運動時に脳が更に活性化

→左足の方がピークが大きくなる

20

## 考察: ANOVA + 多重比較

---

つまり・・・

[運動条件]

画像指示では前頭前野が強く活性

+

[運動側]

機能分担 → 左足は脳がより強く活性

左右の信頼区間は重複

↓

ANOVA : F3, F4の運動条件間に有意差

21

## まとめ

---

- 加算平均より、典型的なRP波形を測定できた
- 条件ごとに、前頭葉において有意差がみられた
  - 運動条件によって、前頭前野の活性度合いが異なる
  - 運動側の機能分担によって、不慣れな足では脳がより強く活性
- LSTMにより、計6種類の条件を高精度で分類できた
  - 脳波を用いたBMIへの応用が期待できる
  - 今後、AIのデータに対する分類基準や、短時間・リアルタイム解析について検討したい

22

## 参考文献

---

1. Eric R. Kandel, James H. Schwartz, Thomas M. Jessell, Steven A. Siegelbaum, A. J. Hudspeth, *Principles of Neural Science*, 21<sup>st</sup> July 2020, pp.1094-1095 (in Japanese)
2. Hans H. Kornhuber, Luder Deecke: *Pflugers Archfur die gesamte Pysiologie des Menschen und der Tiere*, June 1965.
3. Ji-Hoon Jeong, Kyung-Hwan Shim, Dong-Joo Kim, and Seong-Whan Lee: *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 28, no.5, pp. 1226-1238, May 2020.
4. J. W. Choi, J. Park, S. Huh and S. Jo, *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 14, pp. 16252-16263, 15 July15, 2023
5. L. -L. Li, G. -Z. Cao, H. -J. Liang, Y. -P. Zhang and F. Cui, *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no.24, pp.30007-30036, 15 Dec.15, 2023.
6. Rahul Raj, Suman Deb, Paritosh Bhattacharya, *Procedia Computer Science* 133 Pages 161-168, 2018.
7. Ujwal Chaudhary, Niels Birbaumer & Ander Ramos- Murguialday. *Nature Reviews Neurology* volume 12. Pages513-525, 2016.
8. Toshiyuki Fujiwara, Yuko Kasashima, Kaoru Honaga, Yoshihiro Muraoka, Tetsuya Tsuji, Rieko Osu, Kimitaka Hase, Yoshihisa Masakado, and Meigen Liu. *Neurorehabilitation and Neural Repair* Volume 23 Number 2, pp.125-132, February 2009.
9. L. Ferrero, E. Iáñez, V. Quiles, J. M. Azorín and M. Ortiz, 2022 IEEE International Conference on Metrology for Extended Reality, Artificial Intelligence and Neural Engineering (MetroXRINE), Rome, Italy, 2022, pp.399-403
10. Puwadej Leelasiri, Fumitaka Aki, Tatsuhiro Kimura, and Kiyoyuki Yamazaki, *HCI International 2023 - Late Breaking Posters, Communications in Computer and Information Science*, pp.55-61, 2024.
11. Sepp Hochreiter, Jegen Schmidhuber, *Neural Computation*, Volume 9, Issue 8, pp.1735-1780, 1997.
12. American Clinical Neurophysiology Society, *Journal of Clinical Neurophysiology*23(2), pp.107-110, April 2006.

23

# ご清聴ありがとうございました

---

24