

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11910

研究課題名(和文) 音声想起脳波からの言語表象抽出と音素識別の実証研究

研究課題名(英文) Study on linguistic representation and identification of phones from speech imagery EEG.

研究代表者

新田 恒雄 (Nitta, Tsuneo)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・シニア研究員

研究者番号：70314101

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：脳波からの音声想起識別は、実現するとBCI (Brain Computer Interface) 研究に大きな貢献をもたらす。我々はブローカ領域で多くの脳波を分析することで、音素に関する線スペクトラムの違いが音声言語情報を担うことを見出した。また母音言語表象を顕在化するため、線スペクトラムの固有空間を抽出する主成分分析(PCA)と、21電極×6フレーム中の最尤スペクトラムを選択する部分空間法(SM)の二つを繰り返すことにより、母音言語表象としての線スペクトラムを特定した。被検者5名の5母音{a, e, i, o, u}を用いた、CNNによる認識実験では72.6%の正解率を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

BCI研究は運動制御等の分野に限られてきたが、今回、音声言語を利用することが初めて可能になった。今回は5母音に限られているが、子音の言語表象が見出されると、脳波によるタイプライターを実現できる。この技術は、近い将来、ALS患者ほかの方達にとって、生活の質(QoL)を格段に向上するものと期待している。

研究成果の概要(英文)：Speech imagery recognition from electroencephalograms (EEGs) could potentially become a strong contender among non-invasive brain-computer interfaces (BCIs). We extract language representations as the difference of line-spectra of phones by analyzing many EEG signals from the Broca area. Then we extract vowels by using iterative search from hand-labelled short-syllable data. The iterative search process consists of principal component analysis (PCA) that visualizes linguistic representation of vowels through eigen-vectors (m), and subspace method (SM) that searches an optimum line-spectrum for redesigning (m). The extracted linguistic representation of Japanese vowels /i/ /e/ /a/ /o/ /u/ shows 2 distinguished spectral peaks (P1, P2) in the upper frequency range. The 5 vowels are aligned on the P1-P2 chart. The experiment of 5-vowel recognition is conducted using a data set of 5 subjects and the classifier based on convolutional neural network (CNN) shows 72.6% in average.

研究分野：デジタル信号処理，機械学習，音声言語処理

キーワード：脳波 音声想起 線形予測分析 音節ラベリング 音素認識

1. 研究開始当初の背景

近年、fMRI、PET などを用いた脳観察から、概念→言語表現プランニング→音節・単語・文表現→発話運動神経系への伝達に至る、音声言語活動に関与する部位について多くの知見が得られている。これらの知見を受け、脳波観測から言語活動を推定する研究が欧米を中心に活発である。音声言語に関する脳波研究では、脳皮質上のセンサーから発話時の脳波 (electrocorticogram: ECoG) を検出する研究が先行しているが、頭皮上で観測した脳波 (electroencephalogram: EEG) 信号を用いる研究は、実現されると格段に応用が広がるため意欲的に進められている。一方で発話時脳波が、発話器官を動作させる信号 (motor commands) を観測できるのに対して、音声想起時脳波では“音声言語情報が EEG 信号の中で具体的にどのように表現されているのか”、すなわち言語表象 (linguistic representation) を解明する必要があるが、言語表象の正体を探求する研究はこれまで未着手であった。

2. 研究の目的

本研究では、これまで解明した「発話時脳波 (EEG) からの音素・単語認識」に続いて、「考えている時 (音声想起している時) の脳波 (EEG) から、音声言語を特定する」ことを目指す。この目標が実現可能なことを実証するため、次の三つのテーマに注力した。

- (1) ブローカ野を中心に複数電極で観測した脳波から、音声想起内容の言語表象を抽出する、
- (2) (1) を支援するため、脳波中の短音節想起に対して目視でラベル付け (labeling) すると共に、ラベリングを支援するツールを開発する、
- (3) 想起音節に対する認識実験から、音声想起 BCI の可能性を示す。

3. 研究の方法

図 1 に母音言語表象を抽出すると共に、認識実験を評価する一連の流れを示した。以下、この流れに沿って研究方法 [A] ~ [E] を説明する。[F] と [G] については 4. 研究成果で述べる。

[A] 脳波データ収集

g.tec 社の脳波収集装置を使用し、頭皮上で脳波 (EEG) を収集した。図 2 に 21 電極の配置 (拡張 10-20 システム) を示す。被験者は、男声 4 名、女性 1 名である。想起内容は、57 の日本語短音節で、純音のプロトコル (0.1s) の後、短音節を 0.5s 内に想起している。

[B] 前処理

21 電極毎に、直流バイアスを除去した後、各電極の EEG 信号を高速フーリエ変換 (FFT) し、周波数領域へ変換する。周波数領域では、スペクトルサブトラクション法を適用して、ノイズ除去を行った後、帯域を 80Hz ~ 180Hz に制限する。音声言語情報を含む高次の認知機能は、この帯域に存在する。一方、この帯域制限により多くの Artifact を除くことができる。EEG 信号は、この後、線形予測分析のために、波形信号に戻す。

[C] 線形予測分析

図 3 に言語情報 $L(k)$ k : 周波数, を脳波に畳み込む過程 (言語情報符号化過程) と、脳波から言語情報を取り出す過程 (複合化の過程) を示す。線形予測分析 (Linear predictive analysis; LPA) は、前者の脳波合成過程を分析過程の中に逆フィルタの形で組み込むことで、高精度の分析結果を得ている。図 4 に LPA と DFT (離散フーリエ変換) のスペクトラムの比較を示す。LPA スペクトラムは、脳波スペクトラムを有限個のピークで近似することにより、シャープなスペクトラムを得ている。線スペクトラムは LPA スペクトラム包絡を微分 (1 次微分, 2 次微分) することで得ている。

図 3 脳波に対する線形予測分析 (LPA)

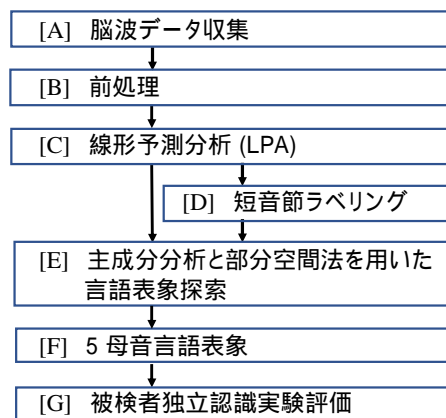


図 1 母音言語表象抽出と評価の流れ

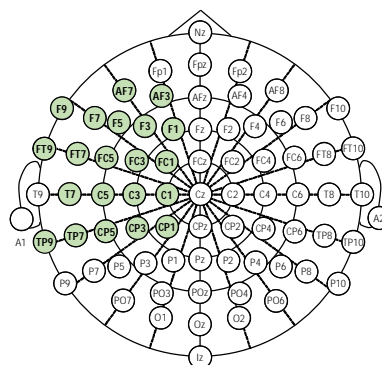
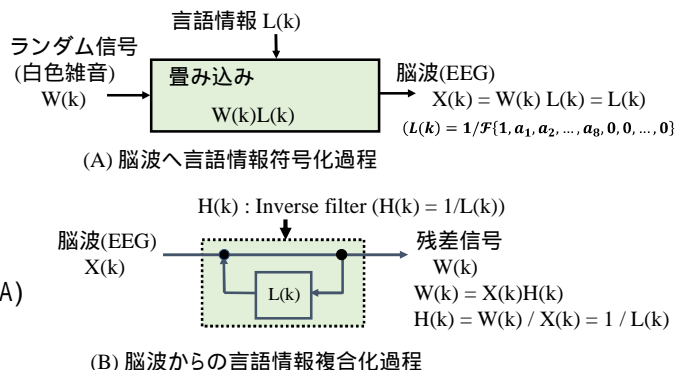


図 2 実験に用いた 21 電極 (緑で示した)



(B) 脳波からの言語情報複合化過程

[D] 短音節ラベリング

音声信号は、発声器官の連続的な動作から生じるため、連続音声の中の音素は調音結合の変形を受ける。これに対して脳波中の音声言語は、図5に文音声想起の例(「今日は」)を示すように、離散的な短音節 CV(C:子音, V: 母音)系列から成る。ここで、図のLPA線スペクトラムは、21電極から最大値プーリング処理により統合した1電極パターンとして得ている。

目視による短音節ラベリングでは、図に観られる短音節の塊(chunks)を目途にラベルを付している。我々は、多くの想起音声データを観測する中で、21電極の線スペクトラムを計算する際に、比較的長い窓(48msのraised cosine窓)を使用することで、短音節を5母音の線スペクトラムから見分けられることを習得した。図5では、/ni/と/chi/が同じ/i/の線スペクトラムを持つことが分かる。なお、個々の母音、子音は21電極の線スペクトラムパターンに戻って探索する([E])。

一方、図には実想起音声と偽想起音声の混在する。偽想起は文音声想起/koNnichiwa/の場合、先頭の/ko/と/N/について起きている。

このことは、1個の短音節を想起する際には、同じ短音節が複数の偽音節想起を伴うことを意味している。経験では、平均3回程度偽想起が生じる。ラベリング等により実想起区間を特定できる場合は問題が少ないが、ラベリング結果を使用せずに短音節の想起実験を行う場合は、偽想起パターンを含む全区間に対して統計的処理をしていることになり、注意が必要である。

[E] PCAとSMの繰返しによる言語表象探索

図6は、固有ベクトルセット(v,m)を通して言語情報をビジュアルに示す主成分分析(PCA)と、適切な{X(k)}の選択を通して(v,m)を再設計することを可能にする部分空間法(SM)の二つを繰返し適用することで、最終的に望ましい母音線スペクトラムを得る方策を示している。探索過程は、全9フレーム中の後半6フレームを対象に:

- 1) 母音毎に、初期固有ベクトル (m)を全電極とフレームから設計する、
- 2) (m)と21電極、6フレームの間で類似度Sを計算する、
- 3) max{S}の線スペクトラムX(k)を選択する、
- 4) 全学習データから{X(k)}を再構築し、(m)を再設計する、
- 5) 2)-4)のstepを4回繰り返す、
- 6) 全母音について全stepを繰り返す。

最終的に、全母音の固有空間 (v,m); v = i, e, a, o, u; m = 1, 2, ..., M,

を得る。

4. 研究成果

[F] 5母音の言語表象

上記[E]で得た5母音の固有空間は言語表象を内包すると考えられるが、次式に示す母音v毎の参照ベクトルG(v):

$G(v) = [m ((m) / (1)) (v,m)^2]^{1/2}$ を採用することで、母音特徴を明確に把握できることを見出した。G(v)は、固有値重みで固有ベクトルを累積したもので、図7に示すように母音間の線スペクトラムの違いを顕著に示す。また、各母音線スペクトラムパターンの高周波

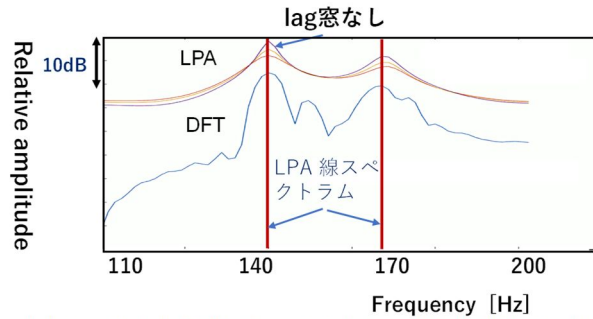


図4 LPAとDFTのスペクトラム比較(母音[a])

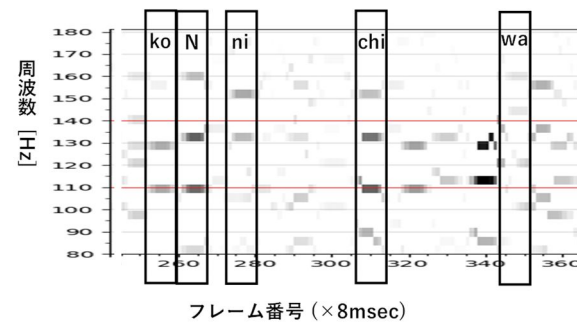


図5 短音節ラベリングの例(今日は)

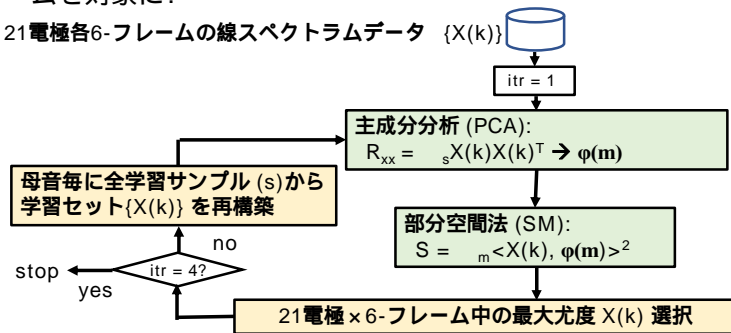


図6 PCAとSMの繰返しによる母音線スペクトラム探索

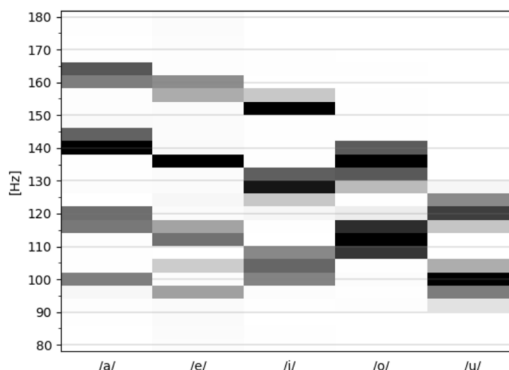


図7 5母音の参照ベクトル G(v)

領域における二つのスペクトラムピーク(P1,P2)を P1-P2 チャートとしてプロットしたものを図 8 に示す. この図から 5 母音の P1-P2 が直線上に配置されることが分かる. 音声では声道の共鳴周波数がホルマント周波数として知られており, この場合 F1-F2 は五角形を形成すると共に, 男女で大きく異なる.

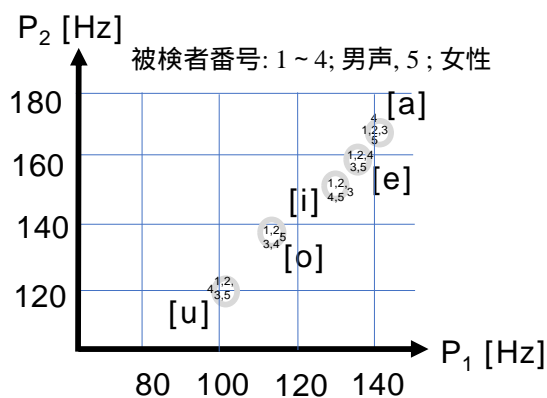


図 8 5 母音の P1-P2 チャート

[G] 被検者独立母音認識

図 9 に被検者独立の母音認識システムを示す. 実験では評価被検者 1 名に対して, 残りの 4 名を学習に使用している. 特徴量は, 母音区間 6 フレームの線スペクトラム (26×6) である. 認識実験結果を表 1 に示した. 畳込みニューラルネットワーク (CNN) を学習器とした場合, 5 名の平均で 72.6% を得た.

今後は, 今回の研究成果を活かし:

- 子音の言語表象の解明と子音・母音データベースの構築,
 - 認識精度のさらなる向上と音声想起信号認識エンジンの開発 (応用開発者への提供),
 - 脳波に対する音素ラベリングツール開発 (ラベリング講習会の開催)
- を順次進めていきたい.

最後に, 脳における言語表象が線スペクトラム群として表現されていたことは, これが物質界の元素の光学 spectra と同じ形態を示すことになり, 興味深く感じている.

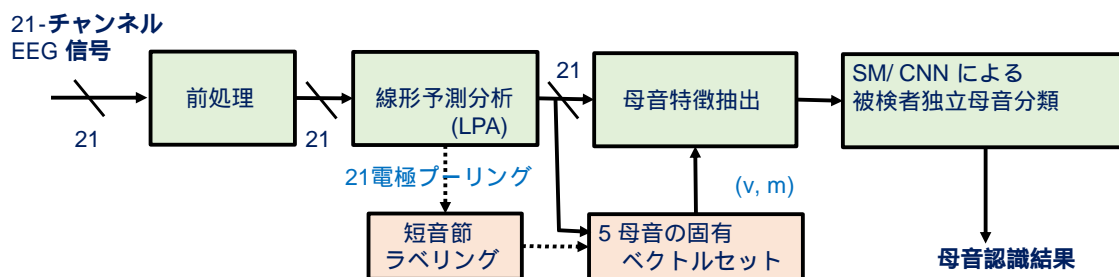


図 9 被検者独立母音認識システム

表 1 想起 5 母音に対する認識結果

被検者 → 分類器 ↓	M1	M2	M3	M4	F1	Average
部分空間法 (SM)	63.5 %	64.2 %	68.4 %	52.6 %	63.5 %	62.7 %
畳込みニューラル ネットワーク (CNN)	73.4	72.3	76.1	64.6	70.9	72.6

男声被検者: M1, M2, M3, M4 女性被検者: F1

** 分類器は被検者 4 名で学習, 非学習の 1 名で評価

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tsuneo Nitta, Junsei Horikawa, Yurie Iribe, Ryo Taguchi, Kouichi Katsurada, Shuji Shinohara, and Goh Kawai	4. 巻 17
2. 論文標題 Linguistic representation of vowels in speech imagery EEG.	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Human Neuroscience	6. 最初と最後の頁 01-08
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fnhum.2023.1163578	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山尾 元陽, 入部 百合絵, 桂田 浩一, 田口 亮, 新田 恒雄
2. 発表標題 単音節音声想起時脳波からの不特定被検者母音認識
3. 学会等名 日本音響学会2022年春季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 新田 恒雄, 桂田 浩一, 入部 百合絵, 田口 亮, 篠原 修二, 河合 剛
2. 発表標題 脳波(EEG)信号を言語空間へ写像する- ロゼッタストーンを読み解く
3. 学会等名 人工知能学会第36回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田口 亮, 新田 恒雄
2. 発表標題 脳波データ用音節ラベリングツールの改良
3. 学会等名 人工知能学会第36回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山尾 元陽, 入部 百合絵, 田口 亮, 桂田 浩一, 新田 恒雄
2. 発表標題 音声想起時脳波(EEG)の音素認識に関する検討
3. 学会等名 人工知能学会第36回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 大祐, 山尾 元陽, 入部 百合絵, 田口 亮, 桂田 浩一, 新田 恒雄
2. 発表標題 脳波(EEG)における音声想起区間と無想起区間の分類
3. 学会等名 人工知能学会第36回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福田 拓朗, 澤田 隼, 木村 英史, 桂田 浩一, 山尾 元陽, 入部 百合絵, 田口 亮, 新田 恒雄
2. 発表標題 音節列想起時EEGを用いた音節の高低アクセント識別
3. 学会等名 人工知能学会第36回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 深井 健太郎, 大村 英史, 桂田 浩一, 平田 里佳, 入部 百合絵, 新田 恒雄
2. 発表標題 音声想起時脳波からの音節情報の抽出
3. 学会等名 人工知能学会第34回全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山尾 元陽, 平田 里佳, 入部 百合絵, 深井 健太郎, 桂田 浩一, 新田 恒雄
2. 発表標題 脳波信号を用いた音声想起時単語の認識
3. 学会等名 人工知能学会第34回全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田口 亮, 付 明川, 新田 恒雄
2. 発表標題 音声想起脳波データラベリング効率化のための半自動音節アライメント
3. 学会等名 人工知能学会第34回全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 細川 晃樹, 山尾 元陽, 入部 百合絵, 田口 亮, 新田 恒雄
2. 発表標題 共通空間パターンを用いた音声想起時EEGの識別
3. 学会等名 情報処理学会第83回全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 新田 恒雄, 堀川 順正, 福田 拓朗, 桂田 浩一, 鈴木 大裕, 入部 百合絵, 田口 亮, 篠原 修二, 河合 剛
2. 発表標題 音声想起時EEG信号から言語表象を抽出する
3. 学会等名 人工知能学会第37回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福田 拓朗, 澤田 隼, 木村 英史, 桂田 浩一, 入部 百合絵, 田口 亮, 新田 恒雄
2. 発表標題 日本語音声想起時EEG信号を用いた音節のアクセント識別
3. 学会等名 人工知能学会第37回全国大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	入部 百合絵 (Iribe Yurie) (40397500)	愛知県立大学・情報科学部・准教授 (23901)	
研究分担者	田口 亮 (Taguchi Ryo) (70508415)	名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授 (13903)	
研究分担者	桂田 浩一 (Katsurada Kouichi) (80324490)	東京理科大学・理工学部情報科学科・教授 (32660)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------