

脳活動の相互依存モデルに基づく

言語・非言語想起過程の高時間分解能判別

High-Time-Resolution Classification of Verbal/Non-verbal Recall Process

Based on Interdependence Model for Brain Activity

西尾 啓汰[†] 猪又 啓太郎^{†*} 栗原 陽介[†]
Keita Nishio Keitaro Inomata Yosuke Kurihara

1. 序章

企業が取る広告戦略は非常に多様であるが、各消費者が広告に対して持つ印象は主観的なものであるため、広告戦略の立案においては消費者理解が不可欠である。ニューロマーケティングでは、消費者の脳活動を計測することで消費者心理や行動の仕組みを解明し、広告活動に応用する。McClureらはfMRIによる商品の選好の際の脳活動の評価を行った[1]。消費者の購買活動における商品選好において、記憶は重要な要因の一つである。記憶想起過程は記銘、保持、想起の3つの過程から構成され、さらに言語想起と非言語想起に大別することができる。効果的な広告とは、容易に記銘され、一定期間以上保持され、自然に想起されることで消費者の印象に残り、購買機会の増加につながる。もし各個人の記憶の想起が言語想起しやすいか、非言語想起しやすいかを把握することができれば、企業の広告戦略において、各個人ごとの想起過程の特徴に合わせた想起しやすい効果的な広告を提示することができる。

従来、言語想起と非言語想起に関して独立した研究が行われてきた。言語想起に関しては、想起過程における言語有意半球の同定[2]や、語彙想起率と前頭葉血流内酸化ヘモグロビン濃度との関連の検証[3]が行われている。また、視覚記憶の代表的な検査にRey-Osterrieth Complex Figure (ROCF)検査がある[4]。非言語想起に関しては、ROCF検査を用いて、学齢期の発達が視覚記憶の想起に影響することを示されている[5]。しかし、脳活動を計測することで言語・非言語想起の分類を試みた研究は少ない。

本論では言語想起と非言語想起に着目する。脳活動に伴う酸化ヘモグロビン量と脱酸化ヘモグロビン量の時間的な変化をNear-Infrared Spectroscopy (NIRS)により計測する。脳活動に含まれる想起成分と記銘成分との相互依存性と、想起成分と運動成分との相互依存性に基づき特徴量を算出し、Support Vector Machine (SVM)により言語・非言語想起過程を高い時間分解能で判別する。

2. 提案手法

本章では提案手法について述べる。2.1節では脳活動の相互依存モデルについて、2.2節では想起過程判別のための信号処理について記述する。

2.1 脳活動の相互依存モデル

任意の時刻 t における脳活動 $x(t)$ は想起成分 $s(t)$ 、記銘成分 $r(t)$ 、運動成分 $m(t)$ を含むと仮定する。また、想起過程においては言語想起と非言語想起が排他的関係にあり、任意の時刻 t において、ヒトは言語想起あるいは非言語想起のどちらかを行うものとする。

前頭前野は前頭葉の中で運動野と運動前野を除いた領域で、記憶機能の中核であると考えられている。そこで、前頭前野の脳活動 $x(t)$ が想起成分 $s(t)$ と記銘成分 $r(t)$ との相互依存による影響を受けると仮定する。さらに、前頭前野は運動によっても影響を受けることが示されていることから[6]、脳活動 $x(t)$ は想起成分 $s(t)$ と運動成分 $m(t)$ との相互依存による影響も含むと仮定する。ここで、想起成分 $s(t)$ と記銘成分 $r(t)$ の相互依存による脳活動を $g\{s(t), r(t)\}$ 、想起成分 $s(t)$ と運動成分 $m(t)$ の相互依存による脳活動を $g\{s(t), m(t)\}$ とすると、前頭前野から観測される脳活動 $x(t)$ は、 $g\{s(t), r(t)\}$ と $g\{s(t), m(t)\}$ の影響を受ける非線形関数を f とすると、以下の式(1)で表される。

$$x(t) = f[g\{s(t), r(t)\}, g\{s(t), m(t)\}] \quad (1)$$

2.2 想起過程判別のための信号処理

図2に、本研究で提案する前頭前野の箇所 $c(=1, 2, \dots, C)$ における脳血流量 $x_c^{Hb}(k)$ から想起過程の推定値 \hat{s} を算出する信号処理を示す。 C チャンネルNIRS機器のチャンネル c で観測される脳血流連続信号 $y_c^{Hb}(t)$ を計測するにあたり、サンプリング周波数 f_s で離散化し、脳血流離散信号 $y_c^{Hb}(k)$ とする。 $k(=1, 2, \dots, K)$ は離散時間ステップ、 $Hb \in \{oxy, deoxy\}$ はNIRSにより計測されるヘモグロビンの種類を示し、 oxy は酸化ヘモグロビン量、 $deoxy$ は脱酸化ヘモグロビン量である。

脳血流離散信号 $y_c^{Hb}(k)$ は式(2)に示すように、脳血流 $x_c^{Hb}(k)$ とノイズ $n_c^{Hb}(k)$ の線形和として表せるとする。

$$y_c^{Hb}(k) = x_c^{Hb}(k) + n_c^{Hb}(k) \quad (2)$$

ここで、ノイズ $n_c^{Hb}(k)$ と想起成分以外の脳活動である運動成分 $m_c^{Hb}(k)$ と記銘成分 $r_c^{Hb}(k)$ をウィナーフィルタにより除去することを考える。事前に運動成分 $m_c^{Hb}(k)$ とノイズ $n_c^{Hb}(k)$ から構成される信号 $N_{1c}^{Hb}(k)$ と、記銘成分 $r_c^{Hb}(k)$ とノイズ $n_c^{Hb}(k)$ から構成される信号 $N_{2c}^{Hb}(k)$ を計測しておく。(式(3), 式(4))

[†] 青山学院大学 Aoyama Gakuin University

^{†*} 富士通株式会社 FUJITSU LIMITED

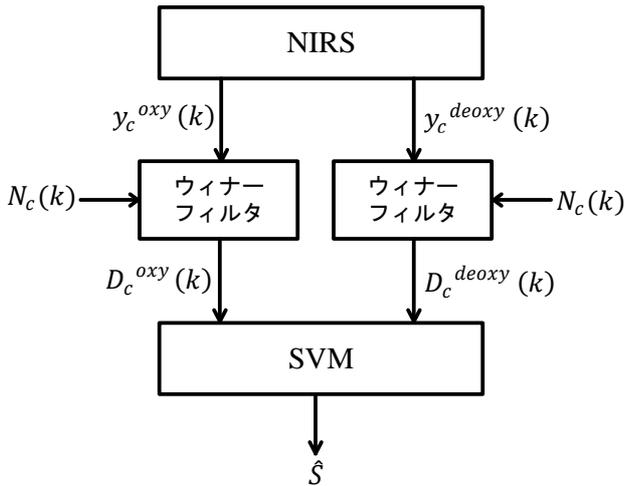


図2 信号処理のブロック図

$$N_{1,c}^{Hb}(k) = m_c^{Hb}(k) + n_c^{Hb}(k) \quad (3)$$

$$N_{2,c}^{Hb}(k) = r_c^{Hb}(k) + n_c^{Hb}(k) \quad (4)$$

脳血流離散信号 $y_c^{Hb}(k)$ に対して、フレーム長 l_f の $N_{1,c}^{Hb}(k)$ と $N_{2,c}^{Hb}(k)$ をノイズ信号とした2つのウィナーフィルタを適用することで、想起成分 $s_c^{Hb}(k)$ と記録成分 $r_c^{Hb}(k)$ 、想起成分 $s_c^{Hb}(k)$ と運動成分 $m_c^{Hb}(k)$ との相互依存関係を表す2つの相互依存信号 $D_{1,c}^{Hb}(k)$ 、 $D_{2,c}^{Hb}(k)$ を得る。これにより、相互依存モデルにおける $g\{s_c^{Hb}(k), r_c^{Hb}(k)\}$ と $g\{s_c^{Hb}(k), m_c^{Hb}(k)\}$ が $D_{1,c}^{Hb}(k)$ 、 $D_{2,c}^{Hb}(k)$ として取得される。(式(5)、式(6))

$$g\{s_c^{Hb}(k), r_c^{Hb}(k)\} = D_{1,c}^{Hb}(k) \quad (5)$$

$$g\{s_c^{Hb}(k), m_c^{Hb}(k)\} = D_{2,c}^{Hb}(k) \quad (6)$$

Cチャンネル分の相互依存信号 $D_{1,c}^{Hb}(k)$ 、 $D_{2,c}^{Hb}(k)$ をベクトルとしてまとめたもの $D_1^{Hb}(k)$ 、 $D_2^{Hb}(k)$ を式(7)、式(8)に示す。

$$D_1^{Hb}(k) = [D_{1,1}^{Hb}(k), D_{1,2}^{Hb}(k), \dots, D_{1,c}^{Hb}(k)] \quad (7)$$

$$D_2^{Hb}(k) = [D_{2,1}^{Hb}(k), D_{2,2}^{Hb}(k), \dots, D_{2,c}^{Hb}(k)] \quad (8)$$

酸化ヘモグロビンと脱酸化ヘモグロビンから得られる $D_1^{oxy}(k)$ 、 $D_2^{oxy}(k)$ 、 $D_1^{deoxy}(k)$ 、 $D_2^{deoxy}(k)$ を特徴量として事前に学習されたSVMによって想起過程を \hat{S} として推定する。

3. 検証実験

本章では提案手法の検証実験について述べる。3.1節では実験システムについて、3.2節では実験手順について、3.3節では提案手法の評価方法について記述する。

3.1 実験システム

図3に実験システムの概要を示す。本実験ではHITACHI製のウェアラブル光トポグラフィ WOT-100(チャンネル数C=10)を用いて、国際10-20法に基づき前頭前野における酸化ヘモグロビン量と脱酸化ヘモグロビン量の計測を行った。防音設備の整った教室を実験室とし、空調設備により室温を21°Cに保った。また、ブラインドにより外光を遮断した。サンプリング周波数は $f_s=5\text{Hz}$ である。

3.2 実験手順

被験者は19歳から22歳の男女10名であり、実験開始前にインフォームドコンセントを得た。また、脳活動への影響を考え、被験者に対して実験中の私語や携帯電話の使用を禁じた。言語想起下と非言語想起下のデータを取得するため、各被験者に音韻連想課題とROCF課題に取り組んでもらい、ヘモグロビン量を計測した。実験手順の詳細を(i)-(vi)の順に示す。

(i) 60秒間白紙に「あいうえお」を繰り返し筆記し、このときのヘモグロビン量を計測する。これをウィナーフィルタにおけるノイズ信号 $N_{1,c}^{Hb}(k)$ とする。

(ii) その後60秒間、20秒ごとに平仮名1字がモニターに表示される。その平仮名1字を頭文字とする日本語の単語を想起し、白紙に書き出す。この60秒間のヘモグロビン量を計測し、言語想起下の脳血流離散信号 $y_c^{Hb}(k)$ とする。

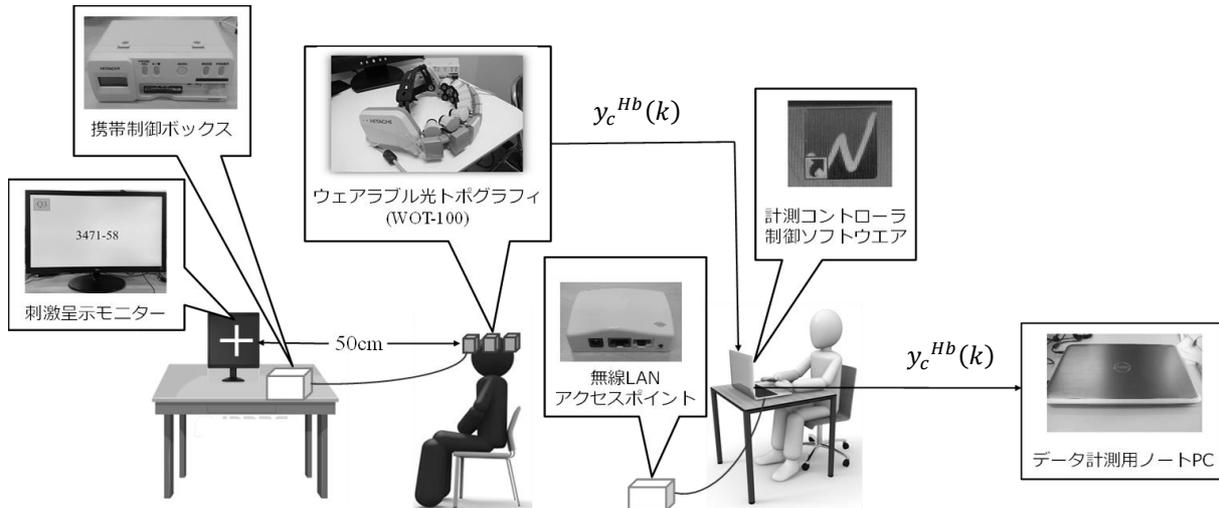


図3 実験システム

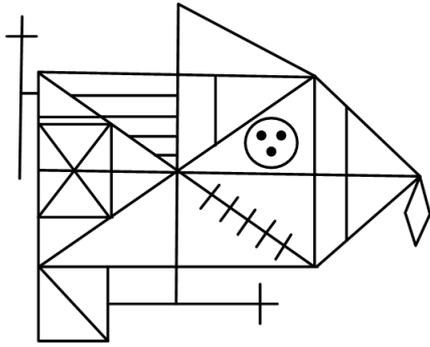


図 4 Rey-Osterrieth 複雑図形

なお、表示する平仮名は日常生活での使用頻度を考慮し、1文字目は「あ」「と」「な」、2文字目は「き」「せ」「い」、3文字目は「は」「お」「た」からそれぞれ1字を無作為に選択した。

(iii) 実験者により説明される ROCF 課題の概要を記録する。このときのヘモグロビン量を計測し、ウィナーフィルタにおけるノイズ信号 $N_{2,c}^{Hb}(k)$ とする。

(iv) 実験者により 60 秒間提示される Rey-Osterrieth 複雑図形(図 4)を白紙に模写し、記録する。

(v) Rey-Osterrieth 複雑図形を取り去り、実験とは全く関係のない質問群であるアンケートに 180 秒の時間を取り、記入してもらう。これは Rey-Osterrieth 複雑図形に関する記憶を近時記憶とするためである。

(vi) Rey-Osterrieth 複雑図形を想起し、60 秒間で可能な限り正確に白紙に描写する。このときのヘモグロビン量を計測し、非言語想起下の脳血流離散信号 $y_c^{Hb}(k)$ とする。

なお、相互依存信号を取得するためのウィナーフィルタのフレーム長 l_f は 30 サンプル(6 秒)とし、オーバーラップは行わない。また、SVM のカーネルは rbf カーネルを用いた。

サンプリング周波数 $f_s=5\text{Hz}$ で 60 秒間計測を行い、1 データのサンプリング点数は $K=300$ となった。

3.3 評価方法

Leave-one-subject-out 交差検定により提案手法の精度を評価する。10 名の被験者から 1 名をテスト被験者とする。残り 9 名の言語想起下と非言語想起下の脳血流離散信号 $y_c^{Hb}(k)$ から $D_{1,xy}(k)$, $D_{2,xy}(k)$, $D_{1,deoxy}(k)$, $D_{2,deoxy}(k)$ を算出し、実験条件より既知である想起過程の真値 S とともに SVM の学習を行う。テスト被験者の脳血流離散信号 $y_c^{Hb}(k)$ から算出された 300 点分の $D_{1,xy}(k)$, $D_{2,xy}(k)$, $D_{1,deoxy}(k)$, $D_{2,deoxy}(k)$ を学習された SVM に入力し、想起過程の推定値 \hat{S} を 300 点得る。真値 S と推定値 \hat{S} をそれぞれ比較し、判別結果を表 1 に示すように True Positive (TP), False Positive (FP), True Negative (TN), False Negative (FN) に分類する。以上の操作を、10 名の被験者を 1 回ずつテスト被験者として取り出すことで 10 回繰り返す。

分類された判別結果から、評価指標として正答率、感度、特異度、陽性的中率、陰性的中率、F 値を算出する。算出式を(9)式から(14)式に示す。これら 6 つの評価指標により提案手法を評価する。

表 1 評価指標の結果

		推定値 \hat{S}	
		言語 想起過程	非言語 想起過程
真値 S	言語 想起過程	TP	FP
	非言語 想起過程	FN	TN

$$(\text{正答率}) = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (9)$$

$$(\text{感度}) = \frac{TP}{TP + FN} \quad (10)$$

$$(\text{特異度}) = \frac{TN}{TN + FP} \quad (11)$$

$$(\text{陽性的中率}) = \frac{TP}{TP + FP} \quad (12)$$

$$(\text{陰性的中率}) = \frac{TN}{TN + FN} \quad (13)$$

$$(F \text{ 値}) = \frac{2 \times TP}{2 \times TP + TN + FP} \quad (14)$$

4. 実験結果

4.1 フィルタリングの一例

被験者 6 のデータに対するフィルタリングの結果を確認する。図 6 と図 7 はそれぞれ言語想起下と非言語想起下の脳血流信号 $y_c^{Hb}(k)$ である。黒線は酸化ヘモグロビン量の変化、灰線は脱酸化ヘモグロビン量の変化を示す。言語想起下においては酸化ヘモグロビン量が緩やかに上昇していることがわかる。非言語想起下においては、ch7 と ch8 の酸化ヘモグロビン量に大きな変動が認められる。

また、図 6 と図 7 に対応した想起成分と記録成分の相互依存信号 $D_{1,c}^{Hb}(k)$ をそれぞれ図 8 と図 9 に示す。図 8 においては、特に ch1 から ch3 において 20 秒から 60 秒に高周波な成分がみられる。図 9 に関しては、ch7, ch8, ch9 にみられるように、脱酸化ヘモグロビンよりも酸化ヘモグロビンの方が時間に伴うヘモグロビン量の変化が大きい傾向がある。

さらに、図 6 と図 7 に対応した想起成分と運動成分の相互依存信号 $D_{2,c}^{Hb}(k)$ をそれぞれ図 10 と図 11 に示す。図 10 をみると、特に ch6 から ch9 において 50 秒から 60 秒に高周波な成分が強調されている。図 11 においては、酸化ヘモグロビンよりも脱酸化ヘモグロビンの方が時間に伴うヘモグロビン量の変化が大きいことがわかる。

2 つの相互依存信号 $D_{1,c}^{Hb}(k)$ と $D_{2,c}^{Hb}(k)$ を比較すると、 $D_{1,c}^{Hb}(k)$ は高周波な変化がみられるのに対して、 $D_{2,c}^{Hb}(k)$ はステップ状の不連続な変化が認められた。

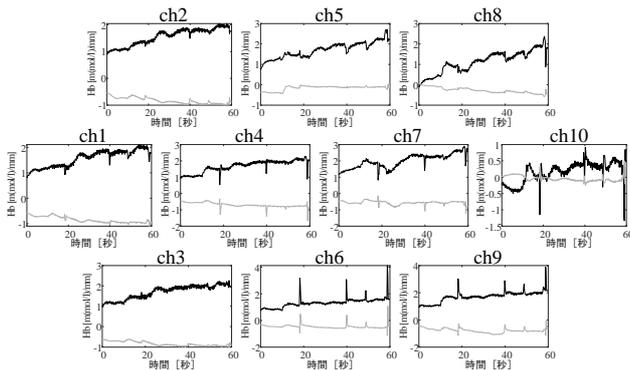


図 6 言語想起下の脳血流信号 $y_c^{Hb}(k)$

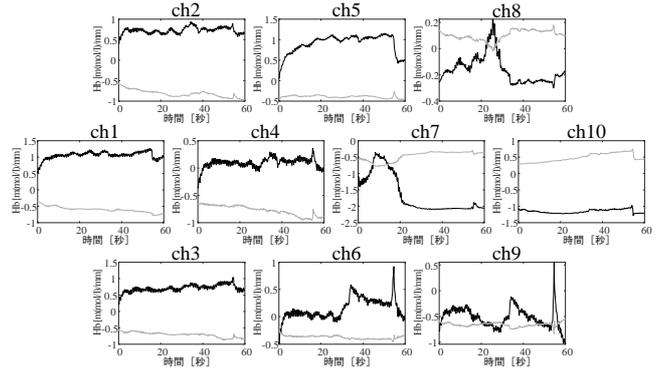


図 7 非言語想起下の脳血流信号 $y_c^{Hb}(k)$

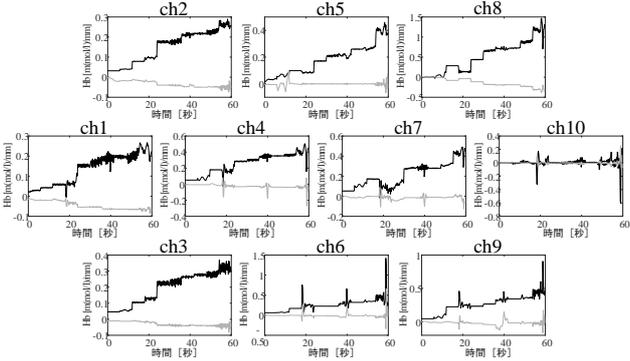


図 8 言語想起下の想起成分と記録成分の相互依存信号 $D_{1,c}^{Hb}(k)$

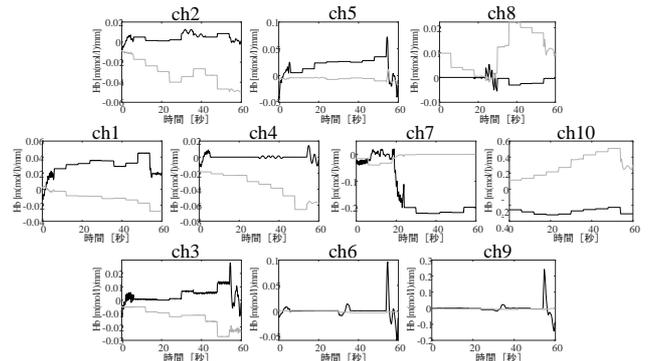


図 9 非言語想起下の想起成分と記録成分の相互依存信号 $D_{1,c}^{Hb}(k)$

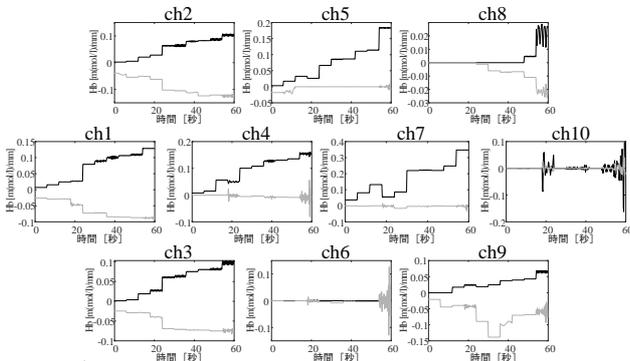


図 10 言語想起下の想起成分と運動成分の相互依存信号 $D_{2,c}^{Hb}(k)$

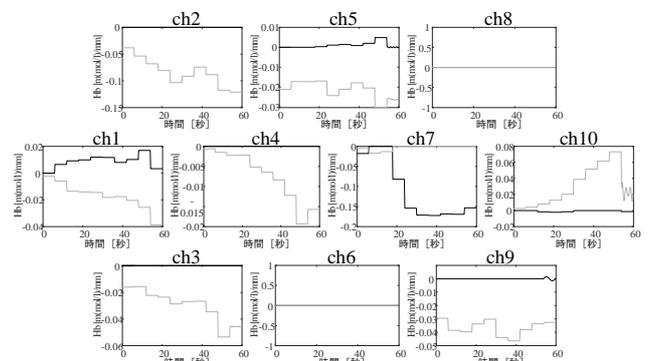


図 11 非言語想起下の想起成分と運動成分の相互依存信号 $D_{2,c}^{Hb}(k)$

表 2 評価指標の結果

正答率	感度	特異度	陽性的中率	陰性的中率	F 値
0.93	0.87	0.99	0.99	0.89	0.93

4.2 評価指標

表 2 に評価指標の結果を示す。最も高い結果となったのは特異度と陽性的中率で 0.99 となった。また、最も低い結果となったのは感度で 0.87 となった。総合的な評価指標である正答率と F 値はそれぞれ 0.93 となった。

5. 考察

本論では正答率 0.93 の精度で言語・非言語想起過程を判別した。相互依存モデルに基づき、記録信号と運動信号をノイズとしたウィナーフィルタを適用することで、2 つの異なる相互依存信号を抽出した。実験条件より記録成分と運動成分は異なっており、信号処理の一例を見ても、たしかに特性の異なる 2 信号が抽出されている。これらのことから、相互依存モデルが正しく動作したことがわかった。

特異度と陽性的中率が 0.99 であるのに対し、感度が 0.87 となり、言語想起過程を非言語想起過程と誤判別する FN が多かった。特徴量を工夫することにより、言語想起過程と非言語想起過程の差異をよりよく取り込める可能性がある。

NIRS の特性上、計測される脳血流量は計測区間における相対的な時間変化であり、計測値によって個人間での脳血流量の比較を行うことはできない。このことが誤判別につながった可能性がある。

6. 結論

本論では、脳活動の相互依存モデルに基づき、言語・非言語想起過程の高時間分解能判別システムを提案した。相互依存モデルにおいては、想起過程における脳血流量が想起状態、運動信号、記銘信号の影響を相互に受ける。NIRS により計測される脳血流量に対し、相互依存モデルに基づくウィナーフィルタを適用することで、想起信号と運動信号、想起信号と記銘信号の 2 種類の相互依存信号を抽出した。これらの信号を特徴量とした SVM を適用することで言語想起/非言語想起を判別した。20 代男女 10 名を被験者とした検証実験において正答率は 0.93 となり、言語・非言語想起過程を高い精度で判別した。

今回は言語・非言語想起の二値判別を行ったが、それらの中間値を取るような想起過程に対して判別を行うことは今後の課題である。

参考文献

- [1] S. M. McClure, J. Li, D. Tomlin, K. S. Cypert, L. M. Montague, P.R. Montague, "Neural Correlates of Behavioral Preference for Culturally Familiar Drinks", *Neuron*, Vol.44, No. 2 (2004)
- [2] 渡辺英寿, "光トポグラフィーによる脳機能の計測", *The Journal of Japanese College of Angiology*, Vol.49 (2009).
- [3] 成田奈緒子, 保坂良輔, 斎木雅人, 樋口 大樹, 田副 真美, 成田 正明, 平川 真規子, "第二言語彙想起効率に関連する前頭葉脳血流変化", 「教育学部紀要」文教大学教育学部, Vol.46 (2012)
- [4] 田川皓一, "神経心理学評価ハンドブック", 2004
- [5] Maria Chiara Fastame, "Visual and spatial working memory skills implicated in copying and drawing from memory of the Rey-Osterrieth Complex Figure: What relationship in school-aged children?", *Cognitive Development*, Vol.53 (2020)
- [6] S. J. Colcombe, A. F. Kramer, E. McAuley, K. I. Erickson, P. Scalf, "Neurocognitive Aging and Cardiovascular Fitness: Recent Findings and Future Directions", *J Mol Neurosci.*, Vol.23, No.1 (2020)