

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26780424

研究課題名(和文) 予測の脳内メカニズム解明：刺激文脈ベースの予測と行為ベースの予測の協調機序の検討

研究課題名(英文) Understanding of the brain mechanisms of prediction: investigations of the mechanisms of cooperation of stimulus context-based prediction and action-based prediction

研究代表者

木村 元洋 (KIMURA, MOTOHIRO)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・自動車ヒューマンファクター研究センター・主任研究員

研究者番号：70612183

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、視覚事象の予測を実現している二つのシステム(刺激文脈ベースの予測と行為ベースの予測)の協調の仕組みを解明することであった。事象関連脳電位(event-related brain potential)を用い、(1)刺激文脈ベースの予測は視覚ミスマッチ陰性電位の惹起とP2の減衰に反映されること、(2)行為ベースの予測は後部陰性電位の惹起とP1の減衰に反映されること、(3)刺激文脈ベースの予測は行為ベースの予測によってトップダウン制御されうること、(4)トップダウン制御のメカニズムは、行為ベースの予測による刺激文脈ベースの予測システムの働きの一時的停止であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the present study was to investigate the mechanism of cooperation of two systems realizing prediction of visual events (i.e., stimulus-context-based prediction and action-based prediction). By using event-related brain potentials (ERPs) that are measured with electroencephalogram (EEG), it was demonstrated that (1) stimulus-context-based prediction is reflected by the elicitation of visual mismatch negativity and the reduction of P2, (2) action-based prediction is reflected by the elicitation of a posterior negativity and the reduction of P1, (3) stimulus-context-based prediction can be controlled by action-based prediction in a top-down manner, and (4) the mechanism of the top-down control is that action-based prediction temporarily freezes the operation of stimulus-context-based prediction.

研究分野：生理心理学・認知心理学・神経科学

キーワード：予測 視覚 刺激文脈 行為 脳波 事象関連脳電位

1. 研究開始当初の背景

“備えあれば憂いなし”という諺があるが、これは脳の情報処理についてもよく当てはまる。生物が環境に適応する上で最も重要な機能の一つが“予測”である。我々を取り巻く環境には数多くの事象が生起しているが、脳の処理資源には限界があり、それらすべてを同時に処理することはできない。我々の脳は、この処理資源の限界を補うべく、環境中に起こりそうな事象を様々な方法で予測する方略をとっている (Bar, 2007; Friston, 2005; Schubotz, 2007)。これにより、予測と一致する事象に対する不必要な処理資源の配分を避けるとともに、予測と一致しない事象に対して優先的に処理資源を割り振ることが可能となる。

視覚事象の予測にも様々なタイプの予測システムが関与している (Bubic et al., 2010)。代表的な予測システムの一つが、“刺激文脈ベースの予測”である (Kimura et al., 2011; Kimura, 2012)。我々を取り巻く環境には、常時膨大な数のオブジェクトが存在し、その多くはその見えを時々刻々と変化させている。刺激文脈ベースの予測システムは、そのオブジェクトの現時点までの文脈 (すなわち、そのオブジェクトの現時点までの動きや変化のパターン) からルールを抽出し、それを基に瞬時に予測モデルを形成することで、そのオブジェクトが次にどう変化するかを事前に、観察者の意図に関わらず自動的に予測する。

もう一つの代表的な予測システムが、“行為ベースの予測”である (Blakemore et al., 2000)。行為ベースの予測システムは、我々が自らの行為によって環境に働きかける際、その行為によって環境にどのような変化が生じるかを事前に予測することを可能にしている。例えば、パソコンのキーボードを操作する際、この予測システムは、行為と結果の関係性を符号化した予測モデルを介し、キーボード操作によってディスプレイ上にどのような変化が生じるかを事前に、意図に関わらず自動的に予測する。

これまでの研究で、刺激文脈ベースの予測と行為ベースの予測のメカニズムについて多くの知見が蓄積されてきた (Kimura et al., 2011; Kimura 2012; Stefanics et al., 2014; Waszak et al., 2012)。しかしこれらの先行研究では、それぞれの予測システムが個別に扱われており、視覚事象の予測を行っている複数のシステム間の協調の仕組みはわかっていない。

2. 研究の目的

本研究に目的は、刺激文脈ベースの予測システムと行為ベースの予測システムの協調の仕組みを、脳波の一種である事象関連脳電位 (event-related brain potentials: ERPs)

を用いて解明することであった。この目的のため、(1) 刺激文脈ベースの予測システムの働きを特異的に反映する ERP 成分の特定 (すなわち、実際の視覚事象が予測と一致した場合に出現する ERP 成分と、不一致の場合に出現する ERP 成分の特定)、(2) 行為ベースの予測システムの働きを特異的に反映する ERP 成分の特定 (実際の視覚事象が予測と一致した場合に出現する ERP 成分と、不一致の場合に出現する ERP 成分の特定)、(3) 二つの予測システムの相互作用の有無の検討、(4) 二つの予測システムの相互作用のメカニズム解明を行った。

3. 研究の方法

(1) 刺激文脈ベースの予測システムの働きを反映する ERP 成分の特定

刺激文脈ベースの予測システムの働きを特異的に反映する ERP 成分の特定を目的として、実際の視覚事象が、刺激文脈ベース予測と一致した場合に惹起する ERP 成分と、不一致だった場合に出現する ERP 成分の特定を行った。成人 22 名を対象に、コンピュータディスプレイ上に呈示されるバーを刺激とした、三種類の刺激系列を用いた実験を行った: オドボール系列、レギュラー系列、およびランダム系列。オドボール系列では、特定のバー刺激を反復的に呈示し (Standard 刺激: 90.9%)、まれに方位の異なるバー刺激を呈示した (Deviant 刺激: 9.1%)。レギュラー系列では、方位の異なる複数のバー刺激を規則的な順序 (回転) で呈示し (Regular 刺激: 90.9%)、まれに逆回転させた (Irregular 刺激: 9.1%)。ランダム系列では、方位の異なる複数のバー刺激をランダムな順序で呈示した (Control 刺激: 100%)。刺激の持続時間は 250 ms、刺激オンセット間隔は 500 ms とした。脳波は鼻尖を基準として頭皮上 26 部位より記録した (サンプリング 1000 Hz、フィルター 1-30 Hz)。刺激呈示前 100 ms から呈示後 500 ms までの 600 ms 区間を、呈示前 100 ms 区間の平均電位を基準として加算平均処理した。上記五種類の刺激に対する ERP 波形を算出した後、視覚事象が予測と一致した際に特異的に出現する ERP 成分を特定するため、Standard 刺激に対する ERP 波形から Control 刺激に対する ERP 波形を引き算した差分波形と、Regular 刺激に対する ERP 波形から Control 刺激に対する ERP 波形を引き算した差分波形を求めた。また、視覚事象が予測と不一致だった際に特異的に出現する ERP 成分を特定するため、Deviant 刺激に対する ERP 波形から Control 刺激に対する ERP 波形を引き算した差分波形と、Irregular 刺激に対する ERP 波形から Control 刺激に対する ERP 波形を引き算した差分波形を求めた。

(2) 行為ベースの予測システムの働きを反映する ERP 成分の特定

行為ベースの予測システムの働きを特異的に反映する ERP 成分の特定を目的として、実際の視覚事象が、行為ベース予測と一致した場合に惹起する ERP 成分と、不一致だった場合に出現する ERP 成分の特定を行った。成人 40 名を対象に、自らの行為（左右のボタン押し）によってコンピュータディスプレイ上にバー刺激を出現させるパラダイムを用いた実験を行った。実験参加者は、二つの実験条件（予測可能条件と予測不可能条件）において、500-800 ms に一回のペースで、左右のボタンを等確率ランダム順に押した。各ボタン押しによってディスプレイ上にバー刺激が出現した。予測可能条件では、右ボタン押しによって垂直のバーが出現したが（Congruent 刺激：45%）、まれに水平のバーが出現した（Incongruent 刺激：5%）。一方、左ボタン押しによって水平のバーが出現したが（Congruent 刺激：45%）、まれに垂直のバーが出現した（Incongruent 刺激：5%）。予測不可能条件では、右ボタン押しと左ボタン押しによって、垂直のバーと水平のバーが等確率ランダム順に出現した（Control 刺激：100%）。刺激の持続時間は 250 ms、ボタン押しから刺激オンセットまでの間隔は 50 ms とした。脳波は鼻尖を基準として頭皮上 26 部位より記録した（サンプリング 1000 Hz、フィルター 1-30 Hz）。刺激呈示前 100 ms から呈示後 500 ms までの 600 ms 区間を、呈示前 100 ms 区間の平均電位を基準として加算平均処理した。上記三種類の刺激に対する ERP 波形を算出した後、視覚事象が予測と一致した際に特異的に出現する ERP 成分を特定するため、Congruent 刺激に対する ERP 波形から Control 刺激に対する ERP 波形を引き算した差分波形を求めた。また、視覚事象が予測と不一致だった際に特異的に出現する ERP 成分を特定するため、Incongruent 刺激に対する ERP 波形から Control 刺激に対する ERP 波形を引き算した差分波形を求めた。

（3）二つの予測システムの相互作用の有無の検討

刺激文脈ベースの予測システムの働きが、行為ベースの予測によって変動するかどうかを調べるため、成人 21 名を対象に、自らの行為（左右のボタン押し）によって、バー刺激からなる刺激系列をコンピュータディスプレイ上に生成するパラダイムを用いた実験を行った。実験参加者は 500-800 ms に一回のペースで、右（左）ボタンを高頻度、左（右）のボタンを低頻度で、ランダム順に押した。各ボタン押しによってディスプレイ上にバー刺激が出現した。高頻度ボタン押しによって、刺激文脈ベースと一致した刺激（順方向へ回転）が呈示されたが（Regular stimuli after frequently-performed button presses、R[F]刺激：81%）、まれに刺激文脈ベースの予測と一致しない刺激（逆方向へ回転）も呈示された（Irregular stimuli after

frequently-performed button presses、IR[F]刺激：9%：この刺激は、行為ベースの予測とも一致しない）。一方、低頻度ボタン押しによって、刺激文脈ベースの予測と一致しない刺激（逆方向へ回転）が呈示されたが（Irregular stimuli after infrequently-performed button presses、IR[IF]刺激：9%：この刺激は、行為ベースの予測とは一致）、まれに刺激文脈ベースの予測と一致する刺激（順方向へ回転）も呈示された（Regular stimuli after infrequently-performed button presses、R[IF]刺激：1%）。刺激の持続時間は 250 ms、ボタン押しから刺激オンセットまでの間隔は 50 ms とした。脳波は鼻尖を基準として頭皮上 26 部位より記録した（サンプリング 1000 Hz、フィルター 1.5-30 Hz）。刺激呈示前 100 ms から呈示後 500 ms までの 600 ms 区間を、呈示前 100 ms 区間の平均電位を基準として加算平均処理した。R[F]刺激、IR[F]刺激、IR[IF]刺激に対する ERP 波形を算出した後、刺激文脈ベースの予測システムの働きが、行為ベースの予測との整合性によってどのように変動するかを調べるため、（1）IR[F]刺激に対する ERP 波形から R[F]刺激に対する ERP 波形を引き算した差分波形、および（2）IR[IF]刺激に対する ERP 波形から R[IF]刺激に対する ERP 波形を引き算した差分波形を算出した。先に行った研究から、視覚事象が刺激文脈ベースの予測と一致しない場合には、VMMN が惹起することがわかっている。したがって、もし刺激文脈ベースの予測システムの働きが、行為ベースの予測との整合性の影響を受けるのであれば、上記二種の差分波形における VMMN の惹起様相は異なるはずである。一方、もし刺激文脈ベースの予測システムの働きが、行為ベースの予測との整合性の影響を受けないのであれば、上記二種の差分波形において同等の VMMN が観察されるはずである。

（4）二つの予測システムの相互作用のメカニズム解明

行為ベースの予測システムによる、刺激文脈ベースの予測システムのトップダウン制御のメカニズムを明らかにするため、以下の二つの仮説を比較した。第一の仮説は、このトップダウン制御が、行為ベースの予測システムが刺激文脈ベースの予測システムによって予測される視覚事象を修正することで生じている、というものである（修正仮説）。第二の仮説は、このトップダウン制御が、行為ベースの予測システムが刺激文脈ベースの予測システムの働き自体を一時的にフリーズさせることで生じている、いうものである（停止仮説）。これら二つの仮説を比較するため、成人 33 名を対象に、自らの行為（左右のボタン押し）によってコンピュータディスプレイ上にバー刺激からなる刺激系列を生成するパラダイムを用いた実験を行った。実験参加者は 500-800 ms に一回のペースで、

右(左)ボタンを高頻度、左(右)のボタンを低頻度で、ランダム順に押した。各ボタン押しによってディスプレイ上にバー刺激が出現した。高頻度ボタン押しによって、刺激文脈ベースと一致した刺激(一定の方向へ回転)が呈示されるとともに(Regular stimuli after frequently-performed button presses、R[F]刺激:80%)まれに刺激文脈ベースの予測と一致しない刺激(逆方向へ回転)が呈示された(1st irregular stimuli after frequently-performed button presses、IR-1[F]刺激:9%)。さらに、刺激文脈ベースの予測と一致しない刺激(反復)も呈示された(2nd irregular stimuli after frequently-performed button presses、IR-2[F]刺激:1%)。一方、低頻度ボタン押しによって、刺激文脈ベースの予測と一致しない刺激(逆方向へ回転)が呈示され(1st irregular stimuli after infrequently-performed button presses、IR-1[IF]刺激:9%:この刺激は、行為ベースの予測とは一致)さらに、刺激文脈ベースの予測と一致しない刺激(反復)が呈示された(2nd irregular stimuli after infrequently-performed button presses、IR-2[IF]刺激:1%:この刺激は、行為ベースの予測とも一致しない)。刺激の持続時間は250ms、ボタン押しから刺激オンセットまでの間隔は50msとした。脳波は鼻尖を基準として頭皮上54部位より記録した(サンプリング1000Hz、フィルター1.5-30Hz)。刺激呈示前100msから呈示後500msまでの600ms区間を、呈示前100ms区間の平均電位を基準として加算平均処理した。R[F]刺激、IR-1[F]刺激、IR-2[F]刺激、IR-1[IF]刺激、IR-2[IF]刺激に対するERP波形を算出した後、(1)IR-1[F]刺激に対するERP波形からR[F]刺激に対するERP波形を引き算した差分波形、(2)IR-2[F]刺激に対するERP波形からR[F]刺激に対するERP波形を引き算した差分波形、(3)IR-1[IF]刺激に対するERP波形からR[F]刺激に対するERP波形を引き算した差分波形、および(4)IR-2[IF]刺激に対するERP波形からR[F]刺激に対するERP波形を引き算した差分波形を算出した。先に行った研究から、IR-1[F]刺激ひくR[F]刺激の差分波形、およびIR-2[F]刺激ひくR[F]刺激の差分波形においてはVMMNの惹起が観察される一方、IR-1[IF]刺激ひくR[F]刺激の差分波形ではVMMNの惹起は観察されないと予想できる。重要なのは、IR-2[IF]刺激ひくR[F]刺激の差分波形におけるVMMNの惹起様相である。修正仮説に従えば、刺激文脈ベースの予測システムは、行為ベースの予測による修正を受け、視覚事象(IR-1刺激)を予測する。しかし、その予測と実際の刺激(IR-2刺激)は一致しない。それゆえ、IR-2[IF]刺激ひくR[F]刺激の差分波形において、VMMNの惹起が観察されるはずである。一方、停止仮説に従えば、刺激文脈ベースの予測システムは、行為ベースの予測システム

によってその働き自体がフリーズしているため、予測自体が行われない。したがって、IR-2[IF]刺激との比較照合が行われることはない。それゆえ、IR-2[IF]刺激ひくR[F]刺激の差分波形においてVMMNの惹起は観察されないはずである。

4. 研究成果

(1) 刺激文脈ベースの予測システムの働きを反映するERP成分の特定

Standard刺激ひくControl刺激の差分波形、およびRegular刺激ひくControl刺激の差分波形において、刺激呈示後190-230ms付近で、中心部(Cz部位)を優位とする陰性シフト(P2成分の減衰)が観察された。一方、Deviant刺激ひくControl刺激の差分波形、およびIrregular刺激ひくControl刺激の差分波形において、刺激呈示後200-275ms付近で、右後側頭部(P08・P8部位)を優位とする陰性シフト(VMMNの惹起)が観察された。これらの結果は、実際の視覚事象が刺激文脈ベースの予測と一致した場合にはP2成分の減衰が、不一致だった場合にはVMMNの惹起が特異的に生じることを示している。

(2) 行為ベースの予測システムの働きを反映するERP成分の特定

Congruent刺激ひくControl刺激の差分波形において、刺激呈示後110-160ms付近で、後頭部(Oz部位)を優位とする陰性シフト(P1成分の減衰)が観察された。一方、Incongruent刺激ひくControl刺激の差分波形において、刺激呈示後160-320ms付近で、右後頭部~右後側頭部(O2・P08・P8部位)を優位とする陰性シフトが観察された。これらの結果は、実際の視覚事象が行為ベースの予測と一致した場合にはP1成分の減衰が、不一致だった場合には右後部優位の陰性電位の惹起が特異的に生じることを示している。

(3) 二つの予測システムの相互作用の有無の検討

IR[F]刺激ひくR[F]刺激の差分波形において、刺激呈示後240-290ms付近で、右後側頭部(P08・P8部位)を優位とする陰性シフト(VMMN)が観察された。一方、IR[IF]刺激ひくR[F]刺激の差分波形においてVMMNは観察されなかった。この結果は、視覚事象が刺激文脈ベースの予測と一致しない場合であっても、視覚事象が行為ベースの予測と一致するものである場合、刺激文脈ベースの予測システムはその視覚事象を逸脱事象として処理しないことを意味する。この結果は、刺激文脈ベースの予測システムの働きが、行為ベースの予測システムによって、トップダウン的に制御されうることが示している。

(4) 二つの予測システムの相互作用のメカ

ニズム解明

IR-1[F]刺激ひく R[F]刺激の差分波形、および IR-2[F]刺激ひく R[F]刺激の差分波形において、刺激呈示後 200-350 ms 付近で、右後側頭部 (P08・P8 部位) を優位とする陰性シフト (VMMN) が観察された。また IR-1[IF]刺激ひく R[F]刺激の差分波形において、VMMN の惹起は観察されなかった。これらの先行研究から予想される結果に加え、IR-2[IF]刺激ひく R[IF]刺激の差分波形において、VMMN は惹起しないという結果が得られた。この結果は、行為ベースの予測による刺激文脈ベースの予測システムのトップダウン制御のメカニズムは、修正ではなく停止 (すなわち、行為ベースの予測が、刺激文脈ベースの予測システムの働き自体を一時的にフリーズさせる) であることを示している。複数の予測システムをもつ我々の脳は、状況に応じ、優勢となる予測システムを切り替えることで、視覚事象の効率的な予測を実現していると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件:査読あり)

Kimura, M., & Takeda, Y. (2014). Voluntary action modulates the brain response to rule-violating events indexed by visual mismatch negativity. *Neuropsychologia*, 65, 63-73. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2014.10.017.

Kimura, M., & Takeda, Y. (2015). Automatic prediction regarding the next state of a visual object: Electrophysiological indicators of prediction match and mismatch. *Brain Research*, 1626, 31-44. DOI: 10.1016/j.brainres.2015.01.013.

Kimura, M., & Takeda, Y. (2015). Top-down control over the processing of task-irrelevant rule violation: evidence from visual mismatch negativity. *Japanese Journal of Physiological Psychology and Psychophysiology*, 33, 19-31. DOI: 10.5674/jjppp.1504si

[学会発表](計9件)

木村元洋, 自ら作り出した逸脱事象に対し視覚ミスマッチ陰性電位は出現しない, 第46回日本臨床神経心理学学会, 2016年10月27日, ホテルハマツ(福島県郡山市)
Kimura, M., & Takeda, Y., Event-related potentials to sudden stimulus omissions are affected by the predictability of stimulus identity, The 18th World Congress of

Psychophysiology (IOP2016), 2016年9月1日, Melia Habana Hotel (Cuba, Habana)

木村元洋・武田裕司, 欠落刺激電位は行為結果の予測可能性に感度があるか? 第34回日本生理心理学会大会, 2016年5月15日, 名古屋大学(愛知県名古屋市)
Kimura, M., & Takeda, Y., Voluntary action modulates the processing of unattended rule-violating events indexed by visual mismatch negativity, 7th Mismatch Negativity Conference (MMN2015), 2015年9月11日, University of Leipzig (Germany, Leipzig)

Kimura, M., & Stefanics, G., Visual mismatch negativity, prediction, and its functional roles, 7th Mismatch Negativity Conference (MMN2015), 2015年9月8日, University of Leipzig (Germany, Leipzig)

木村元洋・武田裕司, 自らの行為によって生じた課題非関連の逸脱事象は視覚MMNを惹起しない, 第33回日本生理心理学会大会, 2014年5月24日, グランフロント大阪(大阪府大阪市)

Kimura, M., & Takeda, Y., Action-based knowledge controls over the stimulus-driven visual prediction: An electrophysiological study, The 17th World Congress of Psychophysiology (IOP2014), 2014年9月25日, 広島国際会議場(広島県広島市)

Kimura, M., & Takeda, Y., Stimulus-driven prediction in vision: Its information-filtering function indicated by prediction-mismatch and prediction-match ERP effects, The 17th World Congress of Psychophysiology (IOP2014), 2014年9月25日, 広島国際会議場(広島県広島市)

木村元洋・武田裕司, 自ら作り出した逸脱事象に対して視覚ミスマッチ陰性電位は出現しない, 第32回日本生理心理学会大会, 2014年5月18日, 筑波大学(茨城県つくば市)

[図書](計0件)

[産業財産権](計0件)

[その他]

ホームページ

<http://staff.aist.go.jp/m.kimura/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

木村元洋 (KIMURA MOTOHIRO)

産業技術総合研究所・人間情報研究部門・自動車ヒューマンファクター研究センタ

ー・主任研究員
研究者番号：70612183

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし

(4)研究協力者
武田裕司 (TAKEDA YUJI)
産業技術総合研究所・人間情報研究部門・
自動車ヒューマンファクター研究センター
ー・主任研究員