

令和元年5月28日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03749

研究課題名(和文) ベイズ理論を用いた視聴覚統合の脳ネットワーク機序の解明

研究課題名(英文) Research on brain network underlying multisensory integration using Bayesian theory

研究代表者

四本 裕子 (Yotsumoto, Yuko)

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：80580927

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：知覚における視聴覚情報の統合において、統合される視覚情報と聴覚情報の割合は環境に応じて柔軟に変化する。本研究では、学習によって視聴覚統合における重み付けを変化させ、この変化をベイズ理論に基づいて数値化することを目的とした。研究では特に視聴覚情報の時間特性の知覚に着目し、中心化傾向は情報の不確実性に伴って増加し、視聴覚の多感覚刺激は時間感度を向上させることを見出した。この結果に基づいて、時間情報の視聴覚情報の統合をベイズ理論を用いて説明するモデルを提案した。このモデルによって、事前分布の統合よりも先に視聴覚情報の統合が行われることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一連の研究により、ヒトの脳は、さまざまなモダリティの感覚情報を統計的に最適化された方法で統合することが示された。また、その結果に基づいて感覚情報の統合モデルを提案した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study was to investigate how our brain compensates sensory uncertainty by combining multisensory information derived from an event, and by integrating the current sensory signal with the prior knowledge about the statistical structure of previous events. We measured the timing sensitivity and the central tendency for unisensory and multisensory stimuli with sensory uncertainty systematically manipulated by adding noise, and proposed computational models that indicate that the optimal multisensory integration precedes the Bayesian time estimation causing the central tendency. Our study suggested that the brain exploits the prior information stored at different processing stages adaptively in accordance with incoming sensory evidences.

研究分野：知覚、認知神経科学

キーワード：ベイズ理論 知覚

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

知覚における視聴覚情報の統合において、統合される視覚情報と聴覚情報の割合は環境に応じて柔軟に変化する。視聴覚情報統合は、視覚や聴覚の情報が時空間で重なり合いながら存在している中で、対応する視聴覚情報を選択的に分離し、そして時には視覚を優先したり時には聴覚を優先したりという重み付けをおこなない、時空間の知覚に利用する。ヒトの脳はこの複雑な計算を瞬時におこなうことができる。一般に、物体の情報が視聴覚情報の両方で定義されている場合、物体の空間位置の知覚は視覚情報の信頼性が高いため視覚優位、物体の時間特性（タイミング）の知覚は聴覚情報の信頼性が高いため聴覚優位であることが知られている。しかしながら、実際の知覚では、環境に依存して、視聴覚間の重み付けは適応的に変化する。この視聴覚間の重み付けを定量的に表現する試みを続ける中で、視聴覚情報間の重み付けは信頼性という1つの次元では決められない。

2. 研究の目的

本研究では、学習によって視聴覚統合における重み付けを変化させ、この変化をベイズ理論に基づいて数値化することを目指した。また、複数の測定手法を用いて脳の機能と構造のネットワークとしてのはたらきに着目し、行動実験に基づいて数値化した視聴覚統合の重み付け変化に対応する神経機構の可塑性を検証し、環境に適応した視聴覚統合の変化にともなう神経可塑性のメカニズムを元に、触覚などの他の感覚や意思決定などの高次認知を包括的に説明可能な理論を構築することを目的とした。

3. 研究の方法

視覚情報と聴覚情報を用いて空間と時間に関する知覚を測定した。課題では、視覚刺激と聴覚刺激がある時間間隔を持って呈示される。観察者は、この視覚情報に時間ずれがあったか（視覚判断条件）または聴覚情報に時間ずれがあったか（聴覚判断条件）や、それぞれの時間長の長さを回答した。回答の正誤をフィードバックすることにより、観察者は時間課題達成に最適な視聴覚情報の重みづけを獲得した。

課題中の脳活動を fMRI や脳波計を用いて測定したり、経頭蓋電気刺激を用いて関連する脳部位を刺激することにより、知覚に関する脳部位の働きを検証した。

4. 研究成果

2016年度は、聴覚、視覚のモダリティそれぞれにおいて、過去の経験が現在の知覚に及ぼす効果を測定した。聴覚では、音声に含まれる音の高さの微妙な違いが、その音声知覚に大きく影響することを定量的に測定し、これまで聞いてきた音声の知覚と、それをフィルタによって変更した音声の知覚を測定した。これまでの経験で聞き慣れた音声からの違いとその結果感じられる違和感をプロットした結果、非常に個人差が大きいことを見出した。これは、個人がそれまでに経験してきた知覚情報が事前分布として現在の知覚に影響することを示唆している。さらに、音刺激に含まれるノイズの量をパラメトリックに変化させ、音刺激の長さの知覚が変容する様子を測定するとともに、ノイズの影響が音重鎮の知覚に長期間にわたって影響することを見出した。視覚では、視覚刺激に重ねたノイズの量をパラメトリックに変化させた場合の知覚を測定し、聴覚ドメインにおけるノイズの効果と比較した。その結果、聴覚と視覚では、ノイズが知覚に及ぼす効果やその効果が影響する時間などが異なることを見出した。さらに、ノイズを重ねた視覚刺激とノイズを重ねた聴覚刺激を同じタイミングで提示した場合、その知覚にはノイズの影響がのらなことを見出した。この結果は、視覚、聴覚という単一のモダリティ内ではベイズ的な知覚が実現されている一方で、その統合には単なる線形加算ではない処理が関連していることを示唆している。さらに、経頭蓋電気刺激を用いて視覚皮質を刺激し、その刺激が脳内ネットワークのコネクティビティに及ぼす効果を測定するとともに、MRIを用いた脳機能計測により、ホルモンが脳内のネットワークに及ぼす効果を検証した。

2017年度は、人間の知覚情報処理における、事前情報の効果を、主に時間的側面に着目して検討した。まず、注意を向けて能動的に書類する視覚情報とそれ以外の干渉する視覚情報の相互作用の特性を検証した。実験では、干渉情報を無視するように教示しながら対象となる視覚情報に関する課題を行い、干渉情報の空間的位置が、課題に及ぼす干渉効果量に影響することを見出した。この研究により、複数の刺激間の相互作用をベイズ理論の枠組みを用いて説明した。さらに、左右脳半球をつなぐ脳梁が欠損している分離脳患者で同様の実験を行い、干渉する情報処理に大脳の皮質下の接続が大きな役割を果たしていることを見出した。また、被験者にある一定時間の課題を行わせる際に、実際よりも長いもしくは短い時間を伝えることで、時間に関する期待と予測を操作し、人間が時間を知覚する際に、期待と予測が事前分布として知覚に貢献することを見出した。期待と予測が時間の知覚に及ぼす効果をモデル化し、論文として発表した。さらに短い時間特性を検証するため、0.1秒単位の注意の揺れが、視覚刺激の検出に影響を及ぼすことを見出した。また、画像統計量が知覚の時間解像度に及ぼす効果を検証

し、先行研究で知覚に影響を及ぼすと発表された要素が、画像統計量で説明できる旨を報告した。2017年度の研究は、いずれも、環境の情報や直前の経験が、視覚情報や時間情報の知覚や認知に影響を及ぼすことを示したものである。

2018年度は、学習によって視聴覚統合における重み付けを変化させ、この変化をベイズ理論に基づいて数値化することを目的とした。特に視覚と聴覚のモダリティとその時間特性に着目した。視覚モダリティにおいては、知覚情報処理が周期的に変動するという性質を用い、視覚情報の時間長の知覚が、その刺激が提示される前の視覚情報からの時間経過に応じて周期的に変動することを見出した。また、複数の時間情報が継時的に提示される場合に、視覚情報の表象に関係するノイズの量が、時間経過に応じて変容することを見出した。さらに、時間に関する視覚情報と聴覚情報の統合に関して、過去の刺激特性が現在の刺激の知覚に影響を及ぼす中心化傾向という現象に着目した。実験では、視覚刺激や聴覚刺激が単独で提示された場合と、同時に提示された場合における時間感度と中心化傾向を測定した。中心化傾向は情報の不確実性に伴って増加し、視聴覚の多感覚刺激は時間感度を向上させることを見出した。この結果に基づいて、時間情報の視聴覚情報の統合をベイズ理論を用いて説明するモデルを提案した。このモデルによって、事前分布の統合よりも先に視聴覚情報の統合が行われることが示唆された。一連の研究により、ヒトの脳は、さまざまなモダリティの感覚情報を統計的に最適化された方法で統合することが示された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 17 件)

- ① 四本裕子 (2018) 分離脳患者の時間知覚 BRAIN and NERVE, 70(11): 1165-1172.
- ② Murai Y., & Yotsumoto Y. (2018) “Optimal Multisensory Integration Leads to Optimal Time Estimation”, Scientific Reports, 査読無, 8, 13068, doi:10.1038/s41598-018-31468-5
- ③ Fan Z. & Yotsumoto Y. (2018) “Multiple Time Intervals of Visual Events Are Represented as Discrete Items in Working Memory”, Frontiers in Psychology, 査読あり, 9, 1340, doi:10.3389/fpsyg.2016.01340
- ④ Niwano Y., Akao A., Yotsumoto Y., Jimbo Y. & Kotani K. (2018) “A Quantitative Comparison of Hemoglobin Concentration and BOLD Signal using Time-Resolved Near-Infrared Spectroscopy” IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering 138(7), 査読あり, doi:10.1541/ieejjeiss.138.790
- ⑤ Kimura M. & Yotsumoto Y. (2018) “Auditory traits of “own voice””, PLoS ONE, 査読あり, 13(6): e0199443
- ⑥ Hashimoto Y. & Yotsumoto Y. (2018) “The amount of time dilation for visual flickers corresponds to the amount of neural entrainments measured by EEG”, Frontiers in Computational Neuroscience, 査読あり, 12, 30, doi:10.3389/fncom.2018.00030
- ⑦ Shima, S., Murai, Y., Yuasa, K., Hashimoto, Y. & Yotsumoto, Y. (2018) “Periodic Fluctuation of Perceived Duration”, i-Perception, 査読あり, 9(2), doi:10.1177/2041669518760625
- ⑧ Nomura, K. & Yotsumoto, Y. (2018) “Failure to Replicate the Increased Temporal Resolution Induced by Images That Give Impression of Danger” Japanese Psychological Research 60(3), 査読あり, 179-187, doi:10.1111/jpr.12187
- ⑧ Okajima, M., Futamura, A., Honma, M., Kawamura, M., & Yotsumoto, Y. (2017) “Interhemispheric cortical connections and time perception: A case study with agencies of the corpus callosum”, Brain and Cognition, 査読あり, 117(12-16)
- ⑨ Honma, M., Murai, Y., Shima, S., Yotsumoto, Y., Kuroda, T., Futamura, A., Shiromaru, A., Murakami, I. & Kawamura, M. (2017) “Spatial distortion related to time compression during spatiotemporal production in Parkinson’s disease”, Neuropsychologia, 査読あり, 102(61)
- ⑩ Tanaka, R. & Yotsumoto, Y. (2017) “Passage of Time Judgments Is Relative to Temporal Expectation”, Frontiers in Psychology, 査読あり, 8(187)
- ⑫ Okajima, M. & Yotsumoto, Y. (2016) “Flickering task-irrelevant distractors induce dilation of target duration depending upon cortical distance”, Scientific Reports, 査読あり, 6, Article number: 32432, doi:10.1038/srep32432
- ⑬ Murai, Y. & Yotsumoto, Y. (2016) “Timescale- and Sensory Modality-Dependency of the Central Tendency of Time Perception”, PLOS ONE, 査読あり, 11(7): e0158921.

- ⑭ Tanaka, R. & Yotsumoto, Y. (2016) “Networks extending across dorsal and ventral visual pathways correlate with trajectory perception”, *Journal of Vision*, 査読あり, 16(6):21, 1-14
- ⑮ Murai, Y., Whitaker, D. & Yotsumoto, Y. (2016) “The centralized and distributed nature of adaptation-induced misjudgments of time”, *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 査読あり, 8: 117-123
- ⑯ Murai, Y. & Yotsumoto, Y. (2016) “Context-Dependent Neural Modulations in the Perception of Duration”, *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 査読あり, 10(12)
- ⑰ Shima, S., Murai, Y., Hashimoto, Y. & Yotsumoto, Y. (2016) “Duration adaptation occurs across the sub- and supra-second systems”, *Frontiers in Psychology*, 査読あり, 7(114)

[学会発表] (計 37 件)

- ① 四本裕子・範志偉 (2018) 「神経引き込みを用いた時間長の記憶表象の検証」日本基礎心理学会第37回大会 2018年12月
- ② 飯塚理子・四本裕子 (2018) 「周期的な刺激が時間知覚に及ぼす影響」日本基礎心理学会第37回大会 2018年12月
- ③ Li, L. & Yotsumoto, Y. (2018) “Inducing Time Dilation by the Beat Frequency of Combinative High-Frequency Flickers: An EEG Study”, *Psychonomic Society 59th Annual Meeting*. New Orleans, America. 2018.11
- ④ Gallego-Hiroyasu, E. M. & Yotsumoto, Y. (2018) “Role of the Basal Ganglia in Explicit and Implicit Rhythmic Timing”, *Psychonomic Society 59th Annual Meeting*. New Orleans, America. 2018.11
- ⑤ Ito, S. & Yotsumoto, Y. (2018) “The Effect of Stimulus Positions on Statistical Learning”, *Psychonomic Society 59th Annual Meeting*. New Orleans, America. 2018.11
- ⑥ 飯塚理子・四本裕子 (2018) 「刺激の運動パターンが時間知覚に及ぼす影響」日本視覚学会夏期大会 2018年8月
- ⑦ 高橋久理 四本裕子 (2018) 「内側前頭前皮質(mPFC)への経頭蓋直流電気刺激(tDCS)が与える「美しさ」への感情への効果」日本視覚学会夏期大会 2018年8月
- ⑧ 吉松弘志・橋本侑樹・四本裕子 (2018) 「明滅刺激による周波数引き込みが時間長の知覚と記憶に及ぼす効果」日本視覚学会夏期大会 2018年8月
- ⑨ Yotsumoto, Y. (2018) “How do transcranial Electric Stimulations modulate functional connectivity? Within-subject comparison of four different stimulation protocols” *The Japan Neuroscience Society Meeting*. 2018.7
- ⑩ Murai, Y. & Yotsumoto, Y. (2018) “Optimal multisensory integration precedes optimal time estimation”, *International Multisensory Research Forum 2018*. Toronto, Canada. 2018.6
- ⑪ Yoshimatsu, H., Hashimoto, Y. & Yotsumoto, Y. (2018) “Larger time dilation induced by 10-Hz flicker is associated with larger 10-Hz neural entrainments”, *Vision Science Society, 18th Annual Meeting*. St Pete Beach FL USA 2018.5
- ⑫ Takahashi, K. & Yotsumoto, Y. (2018) “Transcranial direct current stimulation (tDCS) on the left dorsolateral prefrontal cortex (IDLpFC) selectively modulates our sense of beauty”, *Vision Science Society, 18th Annual Meeting*. St Pete Beach FL USA 2018.5
- ⑬ Iizuka, R. & Yotsumoto, Y. (2018) “Saccadic eye movement following a moving object results in a longer perceived duration compared with smooth pursuit”, *Vision Science Society, 18th Annual Meeting*. St Pete Beach FL USA 2018.5
- ⑭ Nomura, K., Shima, S., Visscher, K.M., Seitz, A. & Yotsumoto, Y. (2018) “Effects of Transcranial Electric Stimulation to Early Visual Areas on Regional BOLD fMRI Activity During Visual Task”, *Vision Science Society, 18th Annual Meeting*. St Pete Beach FL USA 2018.5
- ⑮ Fan, Z., & Yotsumoto, Y. (2018) “Effects of tACS on time perception” *The 4th CiNet Conference: Neural oscillation and functional connectivity: from anatomy to perception*. Osaka, Japan. 2018.2
- ⑯ Nomura, K., Shima, S., Visscher, K.M., Seitz, A. & Yotsumoto, Y. (2018) “Comparison of Effects of Different Transcranial Electric Stimulations Applied to Visual Cortex” *The 4th CiNet Conference: Neural oscillation and functional connectivity: from anatomy to perception*. Osaka, Japan. 2018.2
- ⑰ 野村圭史・島周平・Kristina Visscher・Aaron Seitz・四本裕子 (2018) 「視覚野への経頭蓋電気刺激が視覚課題遂行中のBOLD信号に及ぼす効果」日本視覚学会冬期大会 2018年1月

- ⑱ Kimura, M., & Yotsumoto, Y. (2017) “Auditory traits of “own voice” ” Psychonomic Society 58th Annual Meeting. Vancouver, Canada. 2017.11
- ⑲ Fan, Z., & Yotsumoto, Y. (2017) “Multiple Intervals of Events can be Represented in Working Memory as Discrete Items” ,Psychonomic Society 58th Annual Meeting. Vancouver, Canada. 2017.11
- ⑳ Nomura, K., & Yotsumoto, Y. (2017) “Evidence against Increased Temporal Resolution Induced by Images That Give Impression of Danger” , 1st Conference of the Timing Research Forum. Strasbourg, France. 2017.10
- ㉑ Ito, S. & Yotsumoto, Y. (2017) “Effect of Entrainment at Intermodulation Frequency on Perceived Duration” , 1st Conference of the Timing Research Forum. Strasbourg, France. 2017.10
- ㉒ Shima, S., Visscher, K., Griffis, J., Seitz, A. & Yotsumoto, Y. (2017) “Transcranial electric stimulation (tES) to early visual areas alters large-scale functional connectivity” ,Vision Sciences Society, 17th Annual Meeting. St Pete Beach FL USA 2017.5
- ㉓ Yoshimatsu, H., Murai, Y. & Yotsumoto, Y. (2017) “Luminance motion induces larger time compression and larger time dilation than equiluminant motion” , Vision Sciences Society, 17th Annual Meeting. St Pete Beach FL USA 2017.5
- ㉔ 島周平・Kristina Visscher・Aaron Seitz・四本裕子 (2017) 「経頭蓋電気刺激が視覚野－全脳間の機能的結合に与える影響」日本視覚学会冬期大会 2017年1月
- ㉕ Tanaka, R., Horikawa, R., Ogata, T. & Yotsumoto, Y. (2016) “Altered brain networks in congenital adrenal hyperplasia revealed using multimodal MRI” Society for Neuroscience 46th annual meeting, San Diego, CA, USA. 2016.11
- ㉖ Okajima, M., Futamura, A., Honma, M., Kawamura, M. & Yotsumoto, Y. (2016) “Role of interhemispheric cortical connections in time perception: a case study with agenesis of the corpus callosum” , Society for Neuroscience 46th annual meeting, San Diego, CA, USA. 2016.11
- ㉗ 木村真理乃・四本裕子 (2016) 「自分の声」の音響特性, 日本基礎心理学会第35回大会 2016年10月30日
- ㉘ 田中涼介・四本裕子 (2016) 「主観的な時間経過の判断は時間的予期に依存する」日本基礎心理学会第35回大会 2016年10月29日
- ㉙ 村井祐基・島周平・四本裕子 (2016) 「時間長符号化の計算方略：時間長順応および中心化傾向の時間スケール依存性」日本基礎心理学会第35回大会 2016年10月29日
- ㉚ 村井祐基・四本裕子 (2016) “Optimal encoding of event duration: Modality-dependence of the central tendency.” 日本基礎心理学会第35回大会サテライトオーラルセッション 2016年10月28日
- ㉛ 島周平・村井祐基・湯浅健一・橋本侑樹・四本裕子 (2016) 「周期的に変動する知覚時間」日本視覚学会夏期大会 2016年8月
- ㉜ 村井祐基・四本裕子 (2016) 「時間長符号化の最適化－中心化傾向の感覚モダリティ依存性－」日本視覚学会夏期大会 2016年8月
- ㉝ 吉松弘志・村井祐基・四本裕子 (2016) 「フリッカ刺激による知覚時間延長への大細胞系の影響の検討」日本視覚学会夏期大会 2016年8月
- ㉞ 四本裕子・岡島未来・二村明德・本間元康・河村満 (2016) 「時間長知覚における脳梁の役割:脳梁無形成の症例研究からの検討」日本視覚学会夏期大会 2016年8月
- ㉟ Murai, Y., Hashimoto, Y. & Yotsumoto, Y. (2016) “Modality-dependent and modality-independent nature of central tendency in time perception” , Vision Sciences Society, 16th Annual Meeting. St Pete Beach FL USA 2016.5
- ㊱ Okajima, M. & Yotsumoto, Y. (2016) “Flickering task-irrelevant distractors dilate the perceived duration of a target not on the retinotopic coordinate but on the cortical coordinate” , Vision Sciences Society, 16th Annual Meeting. St Pete Beach FL USA 2016.5
- ㊲ Shima, S., Murai, Y., Yuasa, K., Hashimoto, Y. & Yotsumoto, Y. (2016) “Perceived time fluctuates at around theta rhythm” , Vision Sciences Society, 16th Annual Meeting. St Pete Beach FL USA 2016.5

[図書] (計 3 件)

- ① 四本裕子. 日本基礎心理学会 監修/坂上貴之・河原純一郎・木村英司・三浦佳世・行場次朗・石金浩史 責任編集 「基礎心理学実験法ハンドブック 6.7.1 『脳機能イメージング－近年の動向と測定法』, 6.7.3 『fMRI の原理』, 6.7.4 『fMRI デザインと解析』」朝倉書店、全608頁、2018年6月

- ② 四本裕子. 東京大学生命科学教科書編集委員会／編 [分担執筆] 「理系総合のための生命科学 第4版 分子・細胞・個体から知る“生命”のしくみ 28章5節『fMRI』」羊土社、全343頁、2018年3月
- ③ 四本裕子. 東京大学教養学部編 [分担執筆] 「知のフィールドガイド 科学の最前線を歩く III章『ヒトのこころの測定法』」白水社、全291頁、2017年7月

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。