

平成 30 年 5 月 3 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26285160

研究課題名(和文) 異種感覚情報統合の学習メカニズムとその神経基盤の解明

研究課題名(英文) Learning mechanisms for multisensory integration and its neural basis

研究代表者

寺本 渉 (Teramoto, Wataru)

熊本大学・大学院人文社会科学部(文)・教授

研究者番号：30509089

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：我々は複数の感覚情報を適切に統合しながら外界を認識している。しかし、こうした異種感覚間統合を実現するためには、脳は各感覚器が受け取る刻一刻と変化する複数の信号の中から、同一事象を発生源とするものを見つけ出すことが必要になる。信号の時空間一貫性に加えて、あらかじめ結びつける信号を決めておくこと(異種感覚間対応学習)が手がかりとなっていると考えられる。本研究では、心理物理学的手法と生理心理学的手法を使って、主に視覚運動情報と音高情報の異種感覚間対応学習の神経基盤と、成立プロセスおよび学習メカニズムの一般性について明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The brain has to know which sensory signals originate from the same external event in order to appropriately integrate information from different sensory modalities and obtain the stable representations of the surrounding environment. While spatiotemporal consistency is one cue to do this task, a prior knowledge acquired from everyday sensory experience (i.e. associative learning) could be another important cue. Using techniques from psychophysics and neuroscience, this study demonstrated the brain mechanisms related to associative learning between visual motion and auditory tone sequence and also showed that the brain generally uses associative learning between attributes of different sensory modalities to realize efficient multisensory binding.

研究分野：知覚心理学

キーワード：実験心理学 異種感覚統合 異種感覚間対応学習 運動知覚 神経基盤

### 1. 研究開始当初の背景

ヒトは、外界を認識する際、視覚情報(顔、車の形)だけでなく、聴覚情報(音声、エンジン音)など、複数の感覚情報を無自覚に利用している。例えば、音源が実際の提示位置ではなく、映像の位置から聞こえる腹話術効果や、唇の動きによって音声の聞こえが大きく変化するマガーク効果はよく知られている。また、音の動きによって静止した光に動きを感じる(Hidaka et al., 2009; Teramoto et al., 2010)。近年の研究では、視聴覚を含む多くの感覚において密接に相互作用が行われ、信頼性のある頑健な外界の知覚が得られることが示されている。こうした異種感覚間統合を実現するためには、脳は各感覚器が受け取る刻一刻と変化する複数の信号の中から、同一事象を発生源とするものを見つけ出すことが必要になる。時間(いつ)と空間(どこで)の一致性という基本的な手がかりに加え、効率的な方略として考えられるのが、過去の経験に基づき、あらかじめ結びつける信号を決めておくこと(異種感覚間対応学習)である。従来、時空間一致性による異種感覚間統合に関する知見は数多くあるものの、異種感覚間対応学習に着目した知見は少ない。特に、無関係な感覚刺激間でも新たな対応づけが学習できるのか、成人でも可能なかという学習の成立可能性や、その学習期間や学習が生じる脳内機序などについては、ほとんど解明されていない。

### 2. 研究の目的

本研究では、多感覚間の相互作用がよく観察される対象が運動する場面を主に用い、心理物理学的方法と生理心理学的方法を併用して、異種感覚間対応学習のメカニズムを明らかにすることを目的とした。特に、【A】異種感覚間対応学習の成立プロセスに関与する要因、【B】その神経基盤および【C】異種感覚間対応学習の一般性について、詳細な分析を行うこととした。以上によって、異種感覚情報の脳内統合メカニズムそのものに関する包括的理解を促進できるものと考えた。

### 3. 研究の方法

我々はすでに高い音と低い音に合わせて左右に動く視覚刺激を3分間観察すると、その

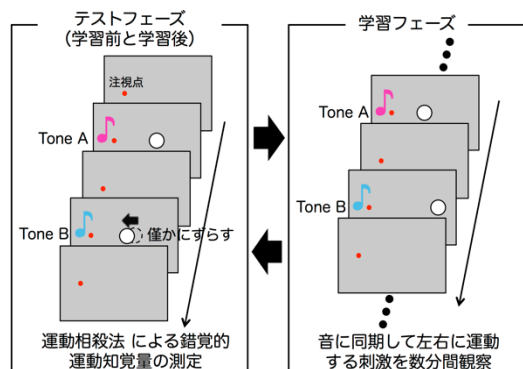


図1. 基本となる実験パラダイム

後に高い音と低い音を聞いただけで、事前に聴いた音色と動きのパターンの組み合わせを再現する形で、静止した視覚刺激があたかも動いて見えるようになることを発見している(sound-contingent visual motion: SCVM, Teramoto et al., 2010)。これは視聴覚間の異種感覚間対応学習によるものであり、同様の実験パラダイムを基本に据えた(図1)。学習フェーズ(図1右)では2つの視覚刺激を交互に呈示して動きの知覚を生じさせる。これに同期して異なる周波数の2つの音を呈示する。実験参加者は固視点を凝視し、数分間刺激を観察する。テストフェーズ(図1左)では同じ位置で点滅する視覚刺激を提示し、音によって引き起こされる錯覚的な動き量を運動相殺法等により測定する。学習前後での錯覚的動き量の違いこそが、視聴覚間の運動知覚に関する異種感覚対応学習によるものと考えられる。これは視覚的運動と音の高さを扱ったものであるが、多様な刺激の組み合わせが可能である。

【A】異種感覚間対応学習の成立プロセスの解明に関する検討では、異種感覚刺激間の時空間一致性の影響、統計的性質の影響、注意の影響等について調べた。【B】異種感覚間対応学習成立時の神経基盤の解明課題では、刺激選択性を指標とした心理物理実験による処理レベルの推定を行ったほか、誘発電位計測(VEP)および機能的脳機能画像法(fMRI)による計測を行った。【C】他の感覚特徴や感覚モダリティへの一般化に関しては、視聴覚間のみならず、視触覚間で計測を実施するほか、運動や音の高さといった特徴以外でも異種感覚間対応学習が成立するかを調べた。

### 4. 研究成果

#### 【神経基盤に関する知見】

従来、各受容器官から送られる感覚情報は、感覚間で独立した神経経路で細分化され(視覚の場合には輝度、色、方位など)、並列的に処理された後、高次の感覚連合野ではじめて統合されると考えられてきた。一方、SCVMは学習した視野位置、学習した眼(右/左眼)、学習した音の周波数帯域(音高)や学習した耳(右/左耳)(Kobayashi et al., 2012a, 2012b)にのみ生じるなど、鋭い選択性がある。これらの知見は、これまで固有の感覚情報のみを扱うと考えられてきた低次の感覚野において、既に異種感覚間統合が生じる可能性を示唆している。そこで本研究では、低次感覚領域に焦点を当て、実際にSCVMに関わる脳領域を特定するためのfMRI実験を行った。

SCVM実験に先立ち、錯覚的な視覚運動に関連して活動する脳領域を特定するため、視覚的仮現運動によって活動する脳領域と聴覚運動が誘導する錯覚的視覚運動知覚(Sound induced visual motion: SIVM, Hidaka et al., 2009)に関連して活動する脳領域を特定した(Hidaka, Higuchi, Teramoto, & Sugita, 2017)。具体的には、視覚的仮現運動条件

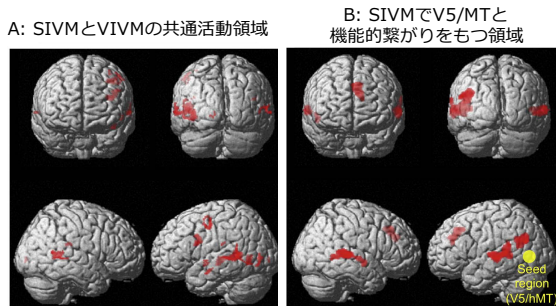


図 2. SIVM 関連脳領域(Hidaka et al., 2017)

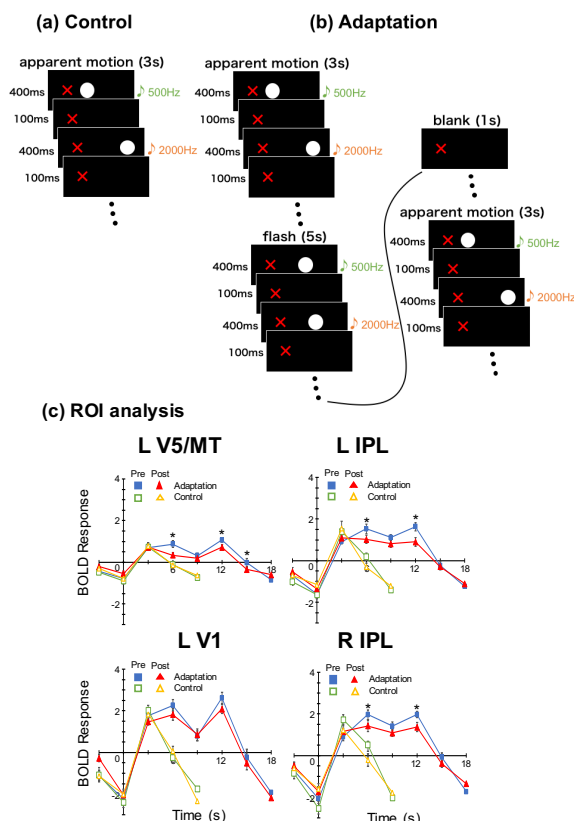


図 3. SCVM の fMRI 実験と関連脳領域 (Teramoto et al., in prep.)

(VIVM; 視覚: 仮現運動, 聴覚: 視覚仮現運動に同期してノイズを両耳提示), SIVM 条件 (視覚: 同じ位置で点滅, 聴覚: 視覚刺激の点滅に同期して左右耳間で仮現運動) およびベースライン条件 (視覚: 同じ位置で点滅, 聴覚: 視覚刺激の点滅に同期してノイズを両耳提示) を比較した。視覚刺激および聴覚刺激の持続時間はそれぞれ 400ms および 100ms であり, SOA (stimulus onset asynchrony) は 500ms であった。その結果, 運動知覚にとって重要な V5/MT と STG は VIVM と SIVM 両方に共通して活動すること, STG の活動は特に SIVM で強く, さらに, SIVM 条件では V5/MT と聴覚領域や異種感覚統合に関わる領域との機能的繋がりが強いことが示された (図 2)。

そこで, SCVM 実験ではこれらの領域に焦点を当て, fMRI-adaptation 法を使って検討を行った (Teramoto, Higuchi, Hidaka, & Sugita, 2016; in prep.)。この方法で重要なのは, 学習前後のテストフェーズで提示する刺激系列

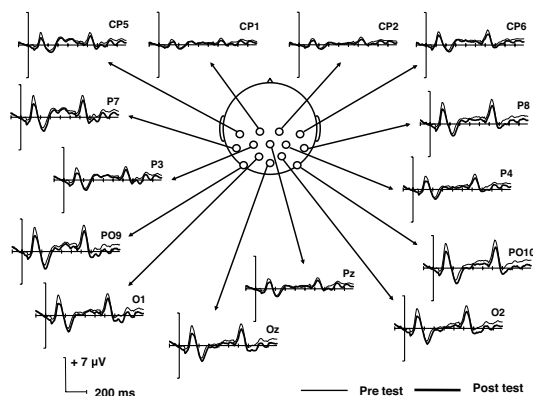


図 4. SCVM に伴う誘発電位変化 (Teraoka et al. 2017)

(adaptation 条件; 図 3b) である。この条件では, 高い音と低い音に合わせて左右に動く視覚刺激を 3 秒間提示した後 (AM1), 高い音と低い音に合わせてその場で点滅する視覚刺激を 5 秒間提示し (FL), 1 秒間ブランクを設けた後, AM1 と同じ刺激をさらに 3 秒間提示した (AM2)。学習フェーズで視覚運動と音高変化の異種感覚間対応学習が成立していれば, 学習後の FL では SCVM が生起する。同じ脳領域が繰り返し刺激されるとその領域における BOLD (Blood Oxygenation Level Dependent) 信号は低下するので, AM1 と SCVM で共通して活動する領域 (視覚運動領域や多感覚領域) では, AM2 提示時に活動低下が見られるはずである。一方, 学習前は AM1 と AM2 の間にある FL は他とは質的に異なるので (AM1 で活動する領域は刺激がない状態), AM1 や FL は AM2 に対する脳活動にはほとんど影響を与えないと考えられる。その他, コントロール条件として AM1 のみを提示する条件も混ぜて提示した (図 3a)。その結果, 視覚運動処理に関わる左 V5/MT 領域および多感覚処理に関わる両側 IPL (inferior parietal lobule) 領域でのみ, 学習後に BOLD 信号の低下が見られることがわかった (図 3c)。このことから, これらの領域は少なくとも SCVM 生起と深く関わっていると考えられた。

fMRI では関連する脳領域を見つけ出すことは可能であるが, 時間的変化を調べるのは難しい。そこで, 32ch 脳波計を用いて学習に関連する誘発電位成分を特定し, その成分の時系列変化を観察した (Teraoka, Watanabe, & Teramoto, 2017)。学習前後で図 1 にある刺激を 1 ペアだけ (視覚: 右 (S1) → 左 (S2); 聴覚: 高音 → 低音), 100 試行提示し, 加算平均を行った。学習前後で全く同じ刺激を提示しているため, 脳処理に違いがなければ全く同じ波形が観察されるはずである。その結果, 行動データでは有意な SCVM が観察された。誘発電位では後頭葉から頭頂葉にかけての広範な電極で学習前後の変化があり, S1 に伴う P100, N200 および P300, S2 に伴う N75 と P100 および P300 に有意な振幅の変化が観察された。特に S1 提示時にすでに差異が見られてい

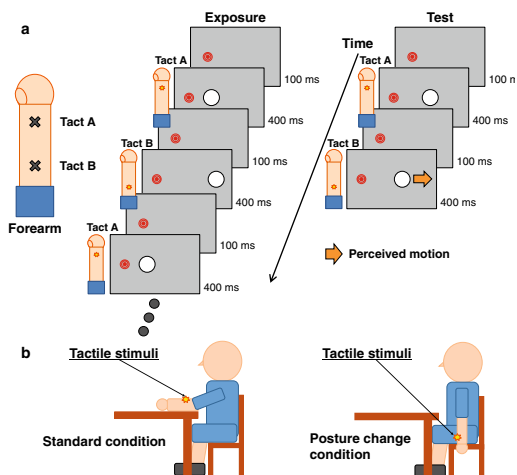


図 5. 視触覚間の異種感覚間対応学習で用いた実験条件 (Teraoka & Teramoto, 2017)

る点に興味深い。視覚的仮現運動知覚は S2 が提示されてはじめて成立する。したがって、S1 に伴う振幅変化は運動知覚と直接関連したものではない。本実験のテストフェーズでは学習が成立していれば、常に右または左の運動が見えるように設定していたため、S1 が提示された時点で運動知覚準備のための処理が働いている可能性があるが、これについてはさらに調べる必要がある。

#### 【学習プロセスおよび異種感覚間対応学習の一般性に関する知見】

Teramoto et al. (2010) では、学習時と学習前後のテストで視覚刺激のもつ表面特徴は全く変わっていない。一方、実環境では照明光や視点によって色や形などの表面特徴は容易に変化する。そこで、SCVM に見られる異種感覚間対応学習に対する視覚的表面特徴の影響について検討を行った (Teramoto, Takebe, & Hidaka, 2014)。学習時には高い音と低い音に合わせて左右に動く視覚刺激を 6 分間提示した。一方、学習前後のテストでは、学習時と形や色と同じまたは異なる視覚表面特徴を用いた。その結果、色や形が学習時と異なっても同じ場合と同様の効果が得られることが示された。このことは、SCVM にとって重要なのは、音高変化と結びついているのは視覚運動情報であり、表面特徴の変化に対してはロバストであること、言い換えれば、視覚物体に表面特徴を統合する前の段階で学習が成立していることを示している。

SCVM は視覚と聴覚間の異種感覚間対応学習であるが、同様の学習は他の感覚どうしても成立するのであろうか? Ernst (2007) は任意の視触覚特徴 (明るさと硬さ) を使い 1 時間程度フィードバック学習させることによって最終的には多感覚のベイズ統合理論に沿った形で多感覚統合が行われることを示している。しかし、Teramoto et al. (2010) のように受動的観察のみで学習が成立するかは不明である。そこで、触覚的位置変化と視覚的運動の間に受動的観察のみによって学習が成立するか否

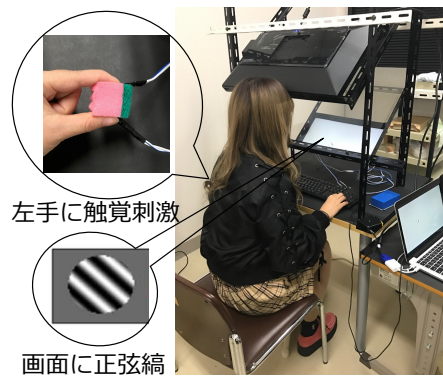


図 6. 触刺激と正弦縞による異種感覚間対応学習実験 (Teramoto & Teraoka, *in prep.*)

かについて検討をおこなった (Teraoka & Teramoto, 2017)。実験では、参加者の右または左腕をコンピュータ画面に向かって突き出す形で置かせ、手首付近と肘付近に振動子を装着した (図 5)。学習フェーズ (9 分間) では、画面中央で左右に仮現運動する視覚刺激に合わせて、肘と手首に設置した振動子を交互に駆動した。その結果、学習時の振動子の位置変化と視覚運動方向の関係を再現する形で、静止した視覚刺激が運動して見えるようになることが示された。すなわち、学習時に、右方向に仮現運動する視覚刺激に合わせて、肘→手首の順に刺激すると、学習後のテスト時には肘→手首と刺激された場合には、右方向への仮現運動が観察されやすくなったのである。また、SCVM と同様に視野位置依存性も確認された。一方で、学習後に画面に向かって突き出した腕を床に向かって下ろした状態でテストを行うと (図 5b)、学習の効果が現れなくなった。視覚系では網膜中心座標系上で学習が形成される一方、触覚系では外部中心座標系で学習が形成される可能性を示している。触覚系は、刺激入力後直ちに外部中心座標系表現に変換されることが示されており (Yamamoto & Kitazawa, 2001)、そうした知見に一致する結果といえる。

別の実験では、視覚的方位知覚と触刺激位置間でも受動的観察のみによって学習が成立することも示した (Teramoto & Teraoka, *in prep.*)。実験では、鏡を用いて視覚刺激位置と触覚刺激位置がほぼ重なるようにした (図 6)。学習時には視覚刺激として、右 45 度正弦縞と左 45 度正弦縞を交互に提示した。それと同期して、左 45 度正弦縞が出現したときのみ左手人指し指に振動刺激を与えた。テストフェーズでは 2 区間強制選択法を用いて、正弦縞の方位と触刺激位置を様々に組み合わせ、コントラストを十分に下げた正弦縞の検出率を測定した。その結果、正弦縞の傾きと刺激指が学習時と一致している場合に、正弦縞の検出率が最も高いことが示された。さらにこの効果は刺激腕を変えても、外部中心座標系の位置が学習時と同じであれば、学習効果は現れることがわかった。このことは Teraoka & Teramoto (2017) と一致して、触覚系では外部

中心座標系で学習が進んでいる可能性を示している。

<引用文献>

- Ernst, M. O. (2007). Learning to integrate arbitrary signals from vision and touch. *Journal of Vision*, 7, 7.
- Hidaka, S., Manaka, Y., Teramoto, W., Sugita, Y., Miyauchi, R., Gyoba, J., Suzuki, Y., Iwaya, Y. (2009). Alternation of sound location induces visual motion perception of a static object. *PLoS ONE*, 4, e1888.
- Kobayashi, M., Teramoto, W., Hidaka, S., Sugita, Y. (2012a). Indiscernible sounds determine the direction of visual motion. *Scientific Reports*, 2, 365.
- Kobayashi, M., Teramoto, W., Hidaka, S., Sugita, Y. (2012b). Sound frequency and aural selectivity in sound-contingent visual motion aftereffect. *PLoS ONE*, 7, e36803.
- Teramoto, W., Hidaka, S., Sugita, Y. (2010). Sounds move a static visual object. *PLoS ONE*, 5, e12255.
- Teramoto, W., Manaka, Y., Hidaka, S., Sugita, Y., Sakamoto, S., Miyauchi, R., Gyoba, J., Iwaya, Y., Suzuki, Y. (2010). Visual motion perception induced by sounds in vertical plane. *Neuroscience Letters*, 479(3), 221-225.
- Yamamoto, S., Kitazawa, S. (2001). Sensation at the tips of invisible tools. *Nature Neuroscience*, 4, 979-980.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計12件)

- ① Teramoto, W. (2018). A behavioral approach to shared mapping of peripersonal space between oneself and others. *Scientific Reports*. 8, 5432 (10 pages) . 【査読有】  
doi:10.1038/s41598-018-23815-3
- ② Teraoka, R., Watanabe, O., Teramoto, W. (2017). An ERP study on sound-contingent visual motion perception. *Interdisciplinary Information Science*, 23, 175-178. 【査読有】  
doi:10.4036/iis.2017.S.03
- ③ Hidaka, S., Higuchi, S., Teramoto, W., Sugita, Y. (2017). Neural mechanisms underlying sound-induced visual motion perception: An fMRI study. *Acta Psychologica*, 178, 66-72. 【査読有】  
doi:10.1016/j.actpsy.2017.05.013

- ④ Teramoto, W., Honda, K., Furuta, K., Sekiyama, K. (2017). Visuotactile interaction even in far sagittal space in older adults with decreased gait and balance functions. *Experimental Brain Research*, 235, 2391-2405. 【査読有】  
doi:10.1007/s00221-017-4975-7
- ⑤ Teraoka, R., Teramoto, W. (2017). Touch-contingent visual motion perception: tactile events drive visual motion perception. *Experimental Brain Research*, 235, 903-912. 【査読有】  
doi:10.1007/s00221-016-4850-y
- ⑥ 吉良和真, 寺本渉 (2017). 自己と他者との身体近傍空間の共有. 電子情報通信学会技術報告, 116, HIP2016-78, 21-25. 【査読無】  
<https://ci.nii.ac.jp/naid/40021161662/>
- ⑦ 近藤雄治, 寺本渉, 小林まおり, 大谷真 (2016). 聴触覚相互作用が音像の距離弁別精度に与える影響. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 21, 49-52. 【査読有】  
doi:10.18974/tvrsj.21.1\_49
- ⑧ 鈴木直弥, 浅井暢子, 寺本渉 (2016). バーチャルリアリティ環境における臨(隣)人感の社会的サイモン課題による検討. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 21, 53-62. 【査読有】  
doi:10.18974/tvrsj.21.1\_53
- ⑨ Hidaka, S., Teramoto, W., Sugita, Y. (2015). Spatiotemporal processing in crossmodal interactions for perception of the external world: A Review. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 9, 62 (13 pages) . 【査読有】  
doi:10.3389/fnint.2015.00062
- ⑩ Sakamoto, S., Teramoto, W., Terashima, H., Gyoba, J. (2015). Effect of active self-motion on auditory space perception. *Interdisciplinary Information Science*, 21, 167-172. 【査読有】  
doi:10.4036/iis.2015.A.08
- ⑪ 寺岡諒, 寺本渉, 渡部修 (2015). EEG計測による聴覚随伴性視覚運動知覚の神経基盤の検討. 電子情報通信学会技術報告, 115, 45-50. 【査読無】  
<https://ci.nii.ac.jp/naid/40020557454>
- ⑫ Teramoto, W., Kakuya, T. (2015). Visuotactile peripersonal space in healthy humans: Evidence from crossmodal congruency and redundant target effects. *Interdisciplinary Information Science*, 21, 133-142. 【査読有】  
doi:10.4036/iis.2015.A.04

[学会発表] (計10件)

- ① Teraoka, R., Teramoto, W. (2017). Learning arbitrary associations between visual and tactile features. The 33rd Annual Meeting of the International Society for Psychophysics. Denki Building, Fukuoka, Japan.
- ② Teramoto, W. (2017). Visuotactile sensory experience shared with others. European Conference on Visual Perception, Henry Ford Building, Free University Berlin, Berlin, Germany.
- ③ Teramoto, W. (2017). Behavioral evidence for shared representations of peripersonal space between self and others. International Multisensory Research Forum, Student Life Center, Vanderbilt University, Nashville, USA.
- ④ Teramoto, W., Higuchi, S., Hidaka, S., Sugita, Y. (2016). Sound-contingent visual motion perception: Evidence from functional neuroimaging. Neuroscience2016, San Diego Convention Center, San Diego, USA.
- ⑤ Teramoto, W. (2016). Negative correlation between strength of visually induced self-motion and subsequent motion aftereffects. International Congress of Psychology 2016, Yokohama, Japan
- ⑥ Omi, T., Teramoto, W., Higuchi, S., Hidaka, S., Sugita, Y. (2015). Audio-visual integration for motion perception. Neuroscience2015, McCormick Place, Chicago, USA.
- ⑦ Teramoto, W., Honda, K., Furuta, K., Sekiyama, K. (2015). Enhancements of visuotactile interaction in the older adults with poorer visuomotor functions: Evidence from redundant target effects. International Multisensory Research Forum, Palazzo dei Congressi, Pisa, Italy.
- ⑧ Teramoto, W., Takebe, S., Hidaka, S. (2014). Influence of surface features of visual stimuli on sound-contingent visual motion aftereffects. European Conference on Visual Perception, Belgrade, Serbia.
- ⑨ Teramoto, W., Hoshiga, H. (2014). Anisotropies in apparent displacements of a visual target during large-field visual motion stimulation. Asia-Pacific Conference on Vision, Kagawa International Convention Hall, Takamatsu, Japan.
- ⑩ Teramoto, W., Kakuya, T., Sekiyama, K. (2014). Visual peripersonal space in older adults. International Multisensory Research Forum, Royal Tropical Institute, Amsterdam, The Netherlands.

[図書] (計1件)

- ① Teramoto, W., Hidaka, S., Sugita, Y., Cambridge University Press, Spatial biases in perception and cognition (Chapter 11: Auditory bias in visual motion perception), 2018, pp.167-179

[その他]

ホームページ等

<http://www.let.kumamoto-u.ac.jp/ihs/hum/psychology/custom2.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

寺本 渉 (TERAMOTO, Wataru)

熊本大学・大学院人文社会科学部(文)・教授

研究者番号：30509089

### (2) 研究分担者

杉田 陽一 (SUGITA, Yoichi)

早稲田大学・文学学術院・教授

研究者番号：40221311

### (3) 研究分担者

日高 聡太 (HIDAKA, Souta)

立教大学・現代心理学部・准教授

研究者番号：40581161

### (4) 研究分担者

小林 まおり (KOBAYASHI, Maori)

北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・研究員

研究者番号：90451632