

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：31302

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25285202

研究課題名(和文) 自己運動知覚における視覚と前庭覚の統合過程の解明

研究課題名(英文) Multisensory integration of visual and vestibular inputs in self-motion perception

研究代表者

櫻井 研三 (Sakurai, Kenzo)

東北学院大学・教養学部・教授

研究者番号：40183818

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：振り子型可動椅子を用いて自己運動知覚における多感覚統合の心理物理学実験を行い、重みづけ(ベイズ推定)モデルの適合性を検証した。視覚と前庭覚からの方向知覚については、各感覚から得られる自己運動の方向差が60度から165度の範囲は統合されるものの、その範囲外では重みづけモデルでは説明できない排他的反応が出現することを明らかにした。また、視覚と前庭覚と触覚による自己運動の多感覚統合において重みづけモデルが適合するかどうかを検証した結果、触覚の信号が加わると重みづけによる多感覚統合が「緊急解除」あるいは無効化されることを発見した。

研究成果の概要(英文)：We tested Bayesian model of weighted combination in multisensory integration by conducting psychophysical experiments on self-motion perception using a parallel swing motion platform. In the perception of self-motion direction, the weighted combination was the case when the inconsistency between visual and vestibular motion directions was between 60 and 165 degrees though either-or responses were observed beyond the range. We also investigated whether the Bayesian model fits in the self-motion perception from integration of visual, vestibular, and tactile inputs. We discovered that tactile flow triggers “emergency override” of weighted combination in the multisensory integration.

研究分野：知覚心理学

キーワード：実験系心理学 感覚・知覚・感性 多感覚統合 国際研究者交流

### 1. 研究開始当初の背景

知覚や認知の心理物理学研究では単一モダリティの事象が研究対象とされてきたが、聴覚刺激が視覚に影響することを明らかにした Sekuler, Sekuler, and Lau (1997) の Nature 論文が契機となり、腹話術師効果や McGurk 効果に代表される視聴覚間の不一致事態における視覚優位の考えや情報統合の原理そのものが見直されつつある。そしてそのような多感覚統合の研究では、対象となる感覚モダリティが、触覚、自己受容感覚、前庭覚、味覚へと広がっている。

多感覚統合の中でも、視覚と前庭覚の相互作用が生み出す錯覚のよく知られた応用例が、haunted swing と呼ばれる遊園地のアトラクションである。大きな部屋の中のブランコに乗って揺られる観客は、部屋全体が回転するにつれてブランコそのものが 360 度回転したように感じてしまう。

視覚と前庭覚の統合に関する先行研究では、直進あるいは回転運動の自己運動の場合に前庭系と視覚系に反対方向の運動情報が与えられると両者は統合されず、一方の情報に従った運動方向が知覚されることと、前庭系への情報が優位になるには一定以上の加速度が必要であることが報告されている (Carpenter-Smith, Futamura, & Parker, 1995; 矢野, 1997)。これに対し、我々は振り子型可動椅子を利用し、図 1 のように拡大パタンの視覚情報による身体運動方向 (白矢印: 前方向) と前庭覚 (加速度) 情報による身体運動方向 (黒矢印: 右方向) が直交する場合、両者の中間の斜め方向の自己運動 (点線矢印: 右前方向) を感じることを明らかにした (Sakurai et al., 2003)。その後、それらの統合が他の方向成分の組合せでも生じることを、心理物理学的手法で明らかにしてきた (Sakurai, 2009; Sakurai et al., 2010; Sakurai et al., 2011)。

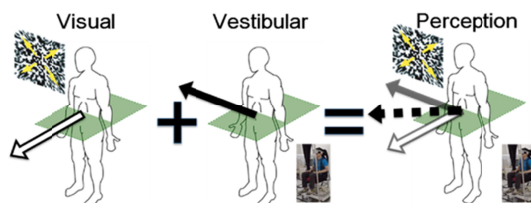


図 1 自己運動方向の多感覚統合の模式図

複数の一致しない感覚情報の統合原理としては、これまで重みづけ (ベイズ推定) モデル (Ernst & Banks, 2002) が提案されているが、2つの情報が統合されることを前提とした理論であり、どちらか一方の情報だけが優位となる排他的知覚を十分に説明できないことが、問題として残されている。

### 2. 研究の目的

自己運動知覚における多感覚統合過程の解明を目的とし、本研究では下記の 3 点につ

いて実験的研究を行なった。

#### (1) 視覚と前庭覚の統合限界の測定と重みづけ (ベイズ推定) モデルの検証

方向の異なる身体運動情報が統合される角度差の限界はどこまでかを調べた。これまで申請者が行ってきた実験では、それぞれの身体運動情報の方向差は 90 度に固定されていたが、この方向差を多段階に制御することで、両者が重みづけにより統合される範囲と、統合されずに排他的反応となる範囲を心理物理学的手法で測定した。

#### (2) 視覚と前庭覚と触覚の統合における重みづけ (ベイズ推定) モデルの検証

自己運動知覚の多感覚統合において、視覚と触覚の感覚統合に関して提案された重みづけ (ベイズ推定) モデル (Ernst & Banks, 2002) が、自己運動知覚の多感覚統合においても適合するかどうかを、視覚と前庭覚に触覚を組み合わせた心理物理学実験で検証した。

#### (3) 多義的視覚事象に与える前庭覚刺激の影響の検討

視覚と前庭覚が等価に統合されるのであれば、Sekuler らの報告した通過・反発事象のような多義的視覚事象の知覚に対する聴覚刺激の影響と同様の影響を前庭覚刺激でも与えられると考えられる。そこで、振り子型可動椅子による参加者自身の身体運動を通過・反発事象のターゲットの動きに同期させ、通過と反発の知覚生起率が視覚に連動した身体運動の前庭覚の影響を受けるか否かを検討した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 視覚と前庭覚の統合限界の測定

参加者: 裸眼あるいは矯正による正常視力を有する大学生 11 名。

装置: 図 2 に示すように、台上で向きを変えられる振り子型可動椅子が前庭系への刺激呈示に、また画面サイズ 44 × 35 degree のヘッドマウントディスプレイ (HMD) が視覚系への刺激呈示に用いられた。

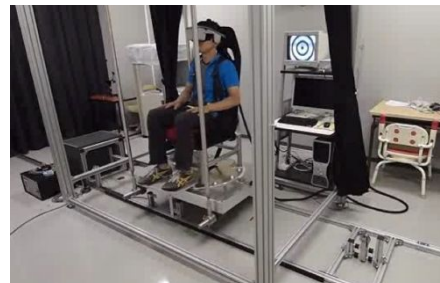


図 2 前庭覚刺激呈示に用いた振り子型可動椅子

刺激: 前庭覚の刺激は可動椅子による振幅 5cm の正弦波状往復運動 (移動距離 10 cm) で、周期は 0.33 cycle/sec。運動の方向は可動椅子の向きを 0° (左右方向) から 180° まで 15° ステップで 13 段階に変化させた。視覚刺激には、可動椅子の動きに連動して左

右方向に往復運動する空間周波数 0.1 cpd の正弦波縦縞を用いた。往復運動の振幅は 1 cycle に固定された。

手続き：参加者は実験者の誘導により黒幕で周囲を被われた可動椅子に着席した後、HMD を装着した。各試行では振り子型可動椅子による前庭覚刺激と HMD による視覚刺激の呈示がなされる間、参加者は与えられた聴覚キューのタイミングで知覚された自己運動の方向を手元の棒状のポインターを回転・調整して (rod-pointing task) 指し示した。また、この調整結果の確信度を 5 ポイントスケールで報告した。聴覚刺激による方向の手がかりを消すために、実験中はピンクノイズが HMD のイヤホンから流されていた。測定は 13 方向の各条件で 3 回ずつランダムに行われた。

(2) 視覚と前庭覚と触覚の統合における重みづけ (ベイズ推定) モデルの検証

参加者：成人 10 名。

装置：前庭覚刺激呈示には(1)と同じ振り子型可動椅子が、視覚刺激呈示には 27 インチ液晶ディスプレイ、触覚刺激呈示には 2cm 幅の角材が用いられた。

刺激：前庭覚の刺激は可動椅子による振幅 10cm の正弦波状左右往復運動 (移動距離 20cm) で、周期は 0.33 cycle/sec。視覚刺激は、観察距離 25cm に置かれた 27 インチ液晶ディスプレイ上に呈示された左右方向に往復運動をする空間周波数 0.1 cpd の正弦波縦縞。触覚刺激として表面に布を貼り付けた角材が参加者の前に水平に設置された。

手続き：参加者はこの装置の椅子に座って左右に揺られながら (または止まった状態で)、固定されて動かない (または左右に動く) 水平な棒の表面を指先で触れる条件と触れない条件で、自己運動の速度やタイミングを調べる判断課題に答えた。

(3) 多義的視覚事象に与える前庭覚刺激の影響の検討

参加者：成人 10 名。

装置：前庭覚刺激呈示には(1)と同じ振り子型可動椅子が、視覚刺激呈示には 27 インチ液晶ディスプレイ用いられた。

刺激：前庭覚の刺激は可動椅子による振幅 10cm の正弦波状左右往復運動 (移動距離 20cm) で、周期は 0.33 cycle/sec。視覚刺激は、観察距離 25cm に置かれた 27 インチ液晶ディスプレイ上に呈示された。視覚刺激は水平方向に 2 つのドットが接近し、重畳した後離れていく通過・反発事象の運動パターンを用いた。聴覚刺激として、ドットの重なりに合わせて反発を促進する破裂音が呈示された。

手続き：参加者は振り子型可動椅子に乗り、一方のドットの動きが自身の身体運動と同期した通過・反発事象を観察して、そのみえを報告した。その際、ディスプレイが椅子と一緒に動く条件と、振り子椅子の前の机に固定された条件で刺激が提示された。通過と反発の知覚生起率が記録された。

#### 4. 研究成果

##### (1) 視覚と前庭覚の統合限界の測定

上記の統合限界の実験について、重みづけ (ベイズ推定) モデルで予測される結果と実際の測定データを比較したところ、重みづけ (ベイズ推定) モデルは視覚と前庭覚によるそれぞれの身体運動方向の情報の角度差が、ある一定の範囲においてのみ成立する事が明らかになった。

前庭覚による身体運動情報の方向と視覚による身体運動情報の方向の差を 15 度刻みで調べた結果、両者の角度差が 0 度から 30 度までの範囲では加算的統合がなされて実際に身体が動いた方向より背後方向への身体運動が報告された。角度差が 60 度からの 165 度の範囲では重みづけ統合がなされたが、180 度では視覚と前庭覚がそれぞれ伝える運動方向のどちらかの反応となった (図 3)。

この統合限界の実験結果は、重みづけ (ベイズ推定) モデルが視覚と前庭覚によるそれぞれの身体運動方向の角度差 90 度を中心とする 60 度からの 165 度の範囲では成立するものの、それ以外の角度差では単純な重みづけでは説明できないことを示している。

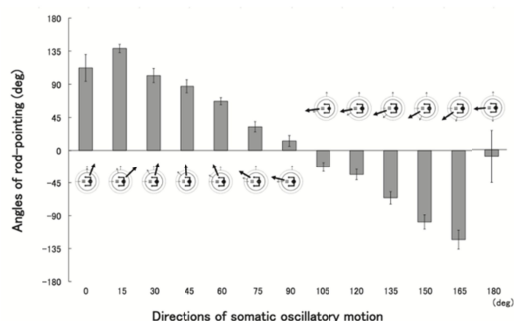


図 3 視覚と前庭覚の統合で知覚された自己運動方向

##### (2) 視覚と前庭覚と触覚の統合における重みづけ (ベイズ推定) モデルの検証

多感覚の統合が成立する範囲に限定された従来の研究では、ベイズ推定モデルが最もよく適合することが主張されている。しかし我々は、脳が複数の感覚情報を取りまとめる多感覚統合の中にはベイズ推定モデルが適用されないケースがあることを、振り子型可動椅子を利用した心理物理学の実験で解明した。

方法のところで述べたように、実験の参加者はこの装置の椅子に座って左右に揺られながら (または止まった状態で)、固定されて動かない (または左右に動く) 水平な角材の表面を指先で触れる条件と触れない条件で、自己運動の速度やタイミングを調べる判断課題に答えた。その結果、身体が動いている時には単に触覚情報が前庭覚情報と足し合わされるのではなく、触覚情報が強調されて実際より速く動いているように感じ、他の感覚情報は生かされなくなるを見出し

た(図4)。このことは、自己運動の情報として触覚の信号が加わると多感覚統合の働きを「緊急解除」する機能が存在することを示している。

例えば、こどもが縁に両手を当てながら滑り台を滑り降りる場面では自分の身体の動き(自己運動)を知覚するには、視覚と前庭感覚(内耳の加速度検出機構)を組み合わせた情報が使われるだけでなく、皮膚表面の触覚信号から生み出される「触覚流動」という情報も使われている。実験計画の段階では、視覚と前庭感覚の自己運動情報がうまく足し合わされると同様に、触覚流動による自己運動情報も他の感覚情報と単純に加算されるか、それぞれが情報の信頼度により重み付けされて統合されると予想していたが、実際には触覚流動が自己運動知覚を乗っ取るような結果となった。

階段を踏み外しそうになった時、落ちないように手を伸ばして身体を安定させようとする理由はここにあるのかもしれない。何かを掴むと身体が安定し、何かおきていて自分の身体の状態がどうなっているかを触覚で知ることができるからである。その時、ベイズ推定モデルのように複数の感覚情報を足し合わせる機能は停止あるいは抑制されると考えられる。この特性を利用した人工的な触覚刺激を使えば、バーチャルリアリティの世界で迫真性のある自己運動知覚をユーザーが体験できるようになる可能性がある。

これらの成果は、多感覚研究の国際学会IMRFにおいて2015年6月に発表し、2017年に論文をオープンアクセスのScientific Reports誌に掲載した。

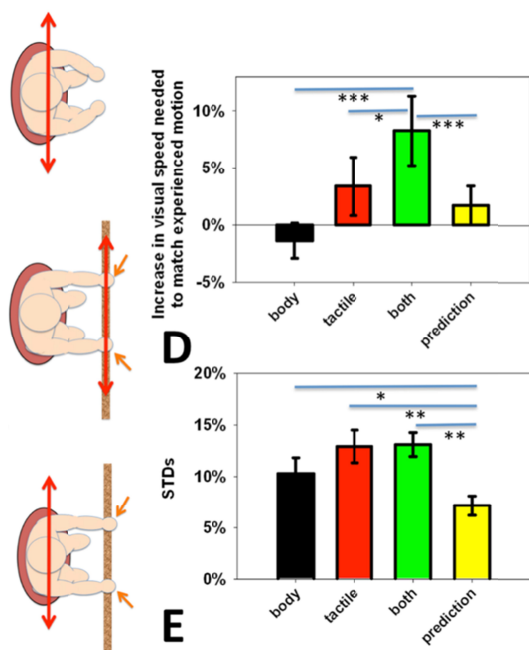


図4 多感覚統合での触覚情報の強調を示す自己運動速度判断実験の結果(グラフD)

### (3) 多義的視覚事象に与える前庭覚刺激の

### 影響の検討

左右方向の身体運動に同期した通過・反発事象の視覚刺激と聴覚刺激を呈示した場合に、通過あるいは反発の知覚確率がどのように変化するかを、心理物理実験で調べた。この通過・反発事象に関する研究は、関連論文を2014年に発表したグループで継続的にデータの解析と論文化の準備を進めている。

本研究では、自然な加速度を前庭覚に呈示できる振り子型可動椅子という簡便なモーションプラットフォームを用いることにより、視覚と前庭覚の統合による自己運動の知覚特性を心理物理学的に測定して、外界からの情報の不一致を脳が統合する一般的原理の解明を目指した。このような自己運動の多感覚統合に関する基礎的知見は、大掛かりな装置を使わなくとも、ほとんど静止状態にある参加者が、あたかも大きく運動しているかのように感じる高臨場感ディスプレイの実現に寄与すると期待できる。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

Harris, L., Sakurai, K., & Beaudot, W.H.A. (2017). Tactile flow overrides other cues to self motion. *Scientific Reports* 査読有, Vol.7, p1059, doi:10.1038/s41598-017-01111-w

Tachibana, R., Beaudot, W.H.A., & Sakurai, K. (2016). The range of discrepant directions indicated by visual and vestibular inputs that can be multimodally integrated in the perception of self-motion. *Tohoku Psychologica Folia*, 査読有, Vol. 75, pp.9-14.

Kawachi, Y., Grove, P.M., & Sakurai, K. (2014). A single auditory tone alters the perception of multiple visual events. *Journal of Vision*, 査読有, Vol. 14, pp.1-13. doi:10.1167/14.8.16

[学会発表](計14件)

Sakurai, K., Furukawa, S., Beaudot, W., & Ono, H. (2016). Extra-retinal information for disambiguating depth from motion parallax. Presented at European Conference on Visual Perception (EVP), Barcelona, (Spain). 2016/8/30

Tachibana, R., Beaudot, W. & Sakurai, K. (2016). Observers have less confidence in perceiving self-motion direction from visual and vestibular information when the multimodal integration is in the optimal range. Presented at Vision Sciences Society (VSS), St. Pete Beach, Florida, (U.S.A.). 2016/5/17

櫻井研三, 古川詩穂里, Ono, H. (2016). 運動視差から一義的奥行を生み出す網膜外信号に関する追跡眼球運動説の検証. 日本視覚学会 2016 年冬季大会 工学院大学 新宿 (東京) 2016/1/22

Harris, L. Sakurai, K., & Beaudot, W. (2015). Tactile flow. Presented at 16<sup>th</sup> International Multisensory Research Forum (IMRF), Pisa, (Italy). 2015/6/14

Tachibana, R, Beaudot, W. & Sakurai, K. (2015). Optimal range of multimodal integration in perceiving direction of self-motion from visual and vestibular stimulation. Presented at 16<sup>th</sup> International Multisensory Research Forum (IMRF), Pisa, (Italy). 2015/6/14

Sakurai, K., & Beaudot, W. (2015). Shape distortion illusion of flashed circles can be induced by dichoptic stimulation. Presented at Vision Sciences Society (VSS), St.Pete Beach, Florida, (U.S.A.). 2015/5/17

Sakurai, K. (2014). Unidirectional shape distortion effect induced by gradation-flash. Presented at European Conference on Visual Perception (ECP), Belgrade, (Serbia). 2014/8/27

Sakurai, K. & Saito, Y. (2014). Factors of inverted vection in depth. Presented at Asia-Pacific Conference on Vision (APCV), Takamatsu, (Japan). 2014/7/20

Sakurai, K., Grove, P.M., Saito, Y., & Beaudot, W. (2014). Translational optic flow induces shifts in direction of forward walking. Presented at 15<sup>th</sup> International Multisensory Research Forum (IMRF), Amsterdam (The Netherlands). 2014/6/13

Sakurai, K. (2014). Shape distortion illusion of circles without prolonged viewing. Presented at Vision Sciences Society (VSS), St.Pete Beach, Florida, (U.S.A.). 2014/5/17

Saito, Y. & Sakurai, K. (2014). Inverted vection as a function of vection strength induced by background motion. Presented at Vision Sciences Society (VSS), St.Pete Beach, Florida, (U.S.A.). 2014/5/21

矢野澄男・櫻井研三・須佐見憲史・松下 戦具・Ono Hiroshi (2013). 水平動き撮像に伴う視点設定時の奥行き感への影響 日本視覚学会 2013 年夏季大会 札幌市立大学桑園キャンパス (札幌市) 2013/7/25

齋藤恭彦・櫻井研三 (2013). 並進運動による OKN を誘発しない刺激による逆転ベクション 日本視覚学会 2013 年夏季大

会 札幌市立大学桑園キャンパス (札幌市) 2013/7/25

Saito, Y. & Sakurai, K. (2013). The inverted vection caused by expanding/contracting random-dot patterns. Presented at Vision Sciences Society (VSS), Naples, Florida, (U.S.A.). 2013/5/14

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

櫻井 研三 (SAKURAI, Kenzo)  
東北学院大学・教養学部・教授  
研究者番号: 40183818

### (4) 研究協力者

ハリス ローレンス (HARRIS, Laurence R.)  
ヨーク大学・視覚研究センター・教授  
(York University, CVR)  
カナダ

オーノ ヒロシ (ONO, Hiroshi)  
ヨーク大学・視覚研究センター・教授  
(York University, CVR)  
カナダ

グローブ フィリップ (GROVE, Philip M.)  
クイーンズランド大学・心理学部・上級講師  
(University of Queensland, Psychology)  
オーストラリア