

[招待講演] 身体知覚の時空間的適応性

宮崎 真¹ 竹内 成生² 松崎 梢³ 関口 浩文²

¹ 山口大学時間学研究所 〒753-8511 山口市吉田 1677-1

² 上武大学ビジネス情報学部 〒372-8588 群馬県伊勢崎市戸谷塚町 634-1

^{1,3} 高知工科大学総合研究所 〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185

E-mail: ¹myzkmkt@yamaguchi-u.ac.jp, ²{tshigeki, hirosgk}@ic.jobu.ac.jp, ³matsuzaki.kozue@kochi-tech.ac.jp

あらまし 我々は、事前の経験や身の周りの事物を利用することにより身体行為を向上・拡張することができる。表出する身体運動の背景では、身体知覚も適応的变化を起こしている。本稿は、(1) 経験に基づく身体時間知覚の最適化 (触覚刺激の時間順序判断におけるベイズ推定)、(2) 手にした物体への身体知覚の拡張 (身体外に跳びだす皮膚ウサギ錯覚) に関する心理物理学的報告を解説し、人間の身体知覚の時空間的適応性を論じる。また、その神経機序の探求にむけて進めている神経生理学的測定についても紹介する。

キーワード 体性感覚、時間順序判断、ベイズ推定、皮膚ウサギ錯覚、道具の身体化

[Invited Talk] Temporospacial Adaptability of Somatosensory Perception

Makoto MIYAZAKI¹ Shigeki TAKEUCHI² Kozue S. MATSUZAKI³ and Hirofumi SEKIGUCHI²

¹Research Institute for Time Studies, Yamaguchi University 1677-1 Yoshida, Yamaguchi 753-8511, Japan

²Faculty of Business and Information Sciences, Jobu University 634-1, Toyatsukamachi, Isesaki, Gunma 372-8588, Japan

^{1,3}Research Institute of Kochi University of Technology, Tosayamada, Kami-city, Kochi 782-8502, Japan

E-mail: ¹myzkmkt@yamaguchi-u.ac.jp, ²{tshigeki, hirosgk}@ic.jobu.ac.jp, ³matsuzaki.kozue@kochi-tech.ac.jp

Abstract Motor behavior can be made more precise and can be extended by utilizing prior experience and objects in the environment. Somatosensory perception, which underlies apparent motor behaviors, also undergoes adaptive changes. In this study, we argued that somatosensory perception is temporospacially adaptable by reporting on two psychophysical phenomena: (1) the optimization of somatosensory time perception based on prior experience (e.g., Bayesian estimation in the temporal order judgment of tactile stimuli); and (2) the extension of somatosensory perception to external objects held by the hands (e.g., experiencing the cutaneous rabbit illusion external to one's body). Furthermore, we introduce our ongoing neurophysiological experiments aimed at elucidating the neural mechanisms underlying such psychophysical phenomena.

Keyword Somatosensory, Temporal Order Judgment, Bayesian Estimation, Cutaneous Rabbit Illusion, Tool-Body Assimilation

1. 経験に基づく身体時間知覚の最適化

1.1. ベイズ推定

我々の身体は変動に満ちた環境にありながら、精緻で安定した知覚-運動行為を実現している。中枢神経系は、それを如何に実現しているのだろうか？理論上、課題標的に関する事前分布を獲得し、それをベイズ則に基づき感覚情報と統合することにより、その変動の影響を最小化できる [1]。この方略により得られる標的変数の最適推定、 $X_{\text{estimated}}$ は次のように表される：

$$X_{\text{estimated}} = kX_{\text{sensed}} + (1-k)\mu_{\text{prior}} \quad (1),$$

$$k = \frac{\sigma_{\text{prior}}^2}{\sigma_{\text{prior}}^2 + \sigma_{\text{sensed}}^2} \quad (2).$$

式 (1) の右辺、 X_{sensed} は感覚情報によって検知された標的変数、 μ_{prior} は事前に経験した標的変数の平均値 (i.e., 最も出現頻度の高い標的変数)、式 (2) の σ_{sensed}^2 は感覚ノイズの大きさ、 σ_{prior}^2 は事前に経験した標的変数の分散の大きさを表わす。式 (1), (2) に示されるように、最適推定 $X_{\text{estimated}}$ は、感覚情報から得られた標的変数 X_{sensed} と、事前に経験してきた標的変数の平均値 μ_{prior} との重み付けの和として算出される。標的変数の変動が小さい場合には、事前経験に基づく情報 μ_{prior} に頼る比率が高まり、逆に、標的変数の変動が大

きい場合には、最新の感覚情報 X_{sensed} に頼る比率が高まる。この法則によって得られた推定値 $X_{\text{estimated}}$ の平均二乗誤差 (MSE) は次式のようになる:

$$MSE = k\sigma_{\text{sensed}}^2 \quad (3).$$

この式 (3) の右辺, σ_{sensed}^2 の係数 k は必ず 1 よりも小さくなる (式 (2) 参照). 即ち, ベイズ推定は, 神経系に内在する変動の影響を必ず減ずることを意味する. 理論上, この推定法が MSE を最小とする.

なお, ベイズ推定には, 上述のような事前分布を獲得するタイプだけでなく, 尤度を更新するタイプのものであるが [2], ここでは前者のみを取り扱う.

1.2. 体性感覚の時間順序判断におけるベイズ推定

以上のベイズ推定モデルの予見と一致する実験結果が, リーチング課題 [1], 力量一致課題 [3], タイミング課題 [4, 5], 時間順序判断 [6-8] を用いた心理物理学実験で相次いで報告されてきた. 本章では, Miyazaki et al. (2006) [6] の体性感覚の時間順序判断に関する報告について解説する.

被験者は両手の人差し指のそれぞれに触覚刺激を受け (図 1A), 左右のどちらが先に刺激されたかを判断した. その刺激時間差について次の 2 条件が設定された. 右手先偏向条件 (図 1B, 実線) では, 右手への刺激が平均 80 ms 先行するようなガウス型の事前分布 (標準偏差 80 ms) から刺激時間差がランダムに選択された. この条件では, 約 84% の試行で右手が左手よりも先に刺激された. もう一方の左手先偏向条件 (図 1B, 破線) では, 逆に左手への刺激が平均 80 ms 先行するような事前分布 (標準偏差 80 ms) を用いた. 被験者 (12 名) のうち半数は, 右手先偏向条件で課題を 1000 試行おこなった後に左手先偏向条件で 1000 試行おこない, もう半数は逆の順番で課題を行った.

ベイズ推定モデルを時間順序判断に当てはめると, 上述のような事前分布を経験した場合の被験者の応答は次式のように予見される:

$$PSS = -\left(\frac{\sigma_{\text{sensed}}}{\sigma_{\text{prior}}}\right)^2 \mu_{\text{prior}} \quad (4).$$

PSS はシグモイド型の心理物理関数が判断確率 0.5 となる刺激時間差, 即ち, 主観的同時点を表す. この式 (4) は, 事前分布の頻度がピークとなる平均刺激時間差 (μ_{prior}) (図 1B) と正負逆の方向へと心理物理関数がシフト (図 1C) することを予見している. これは, 事前に頻繁に経験した順番へと被験者の判断が偏向される陽性残効 (Positive Aftereffect) が生じることを表し

ている. 例えば, 被験者が右手先偏向条件を経験した場合 (図 1B, 実線), 即ち, 右手が先となる触覚刺激組を頻繁に経験した場合, 実際には同時, あるいは, 数十ミリ秒ほど左手が先となる刺激組を与えられても, 右手が先に刺激されたと判断する確率が高くなる (図 1C, 実線). 実験の結果, 被験者の応答は, この予見と一致したものであった (図 1D).

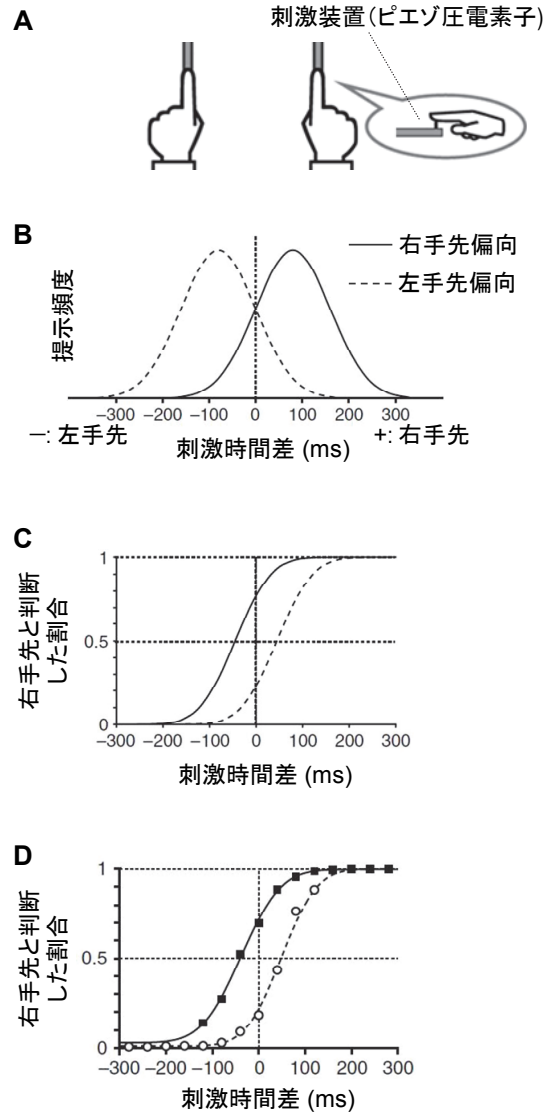


図 1. 体性感覚の時間順序判断におけるベイズ推定. **A:** 刺激セット. **B:** 左右の手に提示された触覚刺激の時間差の確率分布. **C:** ベイズ推定モデルによる理論値. **D:** 実験結果 (被験者 12 名の平均). Miyazaki et al. (2006) [6] より改変.

視-聴覚刺激の時間判断では, 一定の時差をもった音-光刺激組を繰り返し経験すると, その時差が短縮して感じられるようになる時差順応 (Lag adaptation) と呼ばれる陰性残効 (Negative Aftereffect) が報告されていたが [9], 触覚刺激の時間順序判断ではそれとは逆の振舞となった. 光と音は距離に応じて伝達時間が変

化し (物理的時差), 視覚と聴覚では感覚受容器から中枢に神経信号が到達するまでの潜時も異なる (生理的時差). 時差順応は, 視-聴覚刺激組の時差に一貫性がある場合は, 脳がその時差を埋め合わせようとしていることの表れであり, その時差の埋め合わせは, 単一の事象由来の視-聴覚刺激をバイディングする機能と関連しているものと考えられている. 一方, 触覚刺激は, 対象との直接接触により生じるため物理的時差はそもそも存在しない. また, 左右の手の長さや, その後の神経過程にも大きな差はなく, 生理的時差もおおよそ無視できる. 即ち, この研究で用いた触覚刺激の時間順序判断では埋め合わせるべき時差が生じない. 埋め合わせるべき時差が存在しない触覚刺激の時間順序判断では, 時差順応はむやみに機能せず, その時差順応という拮抗作用の不在により, ベイズ推定の作用が表出したものと考えられる.

以上の仮説は, ベイズ推定は, 視-聴覚刺激の時間順序判断では, 時差順応に隠れて観測されないものの, 潜在的には作用している可能性も示唆する. Yamamoto et al. (2012) [8] は, 時差順応を相殺する刺激提示法を考案し, 視-聴覚の時間順序判断でもベイズ推定が作用していることを観測することに成功した.

1.3. ベイズ推定の関連脳活動: EEG による検討

以上のように, 脳がベイズ推定を行っていることを示す心理物理学のエビデンスが蓄積されてきた. それでは, 実際, ベイズ推定はどのような神経作用によって実現されているのであろうか? 我々は, その解明に向けた取り組みの一つとして, 脳波 (EEG) 測定を実施した [10].

被験者 (14 名) は, 1.2.と同様の触覚刺激の時間順序判断を行った (試行数は $600 \times 2 = 1200$). EEG は 31 チャンネルの頭皮上電極から導出した. この研究では, 刺激時間差が図 2A のグレーで記した区間内 ($-20 \sim +20$ ms) にある試行のデータを解析の対象とした. この区間では刺激時間差は両条件ともに平均がおおよそ 0 ms (i.e., 同時) となるが, 左手先偏向条件 (破線) では同時の刺激を左手先と判断する確率が高くなり, 右手先偏向条件 (実線) では同時の刺激を右手先と判断する確率が高くなる. この刺激時間差区間内の試行の EEG データについて, 先に提示された方の触覚刺激をオンセットとして事象関連電位 (ERP) を算出した.

図 2B は, 右半球の一次体性感覚野 (S1) の上に位置する電極 CP4 から計測された ERP の全被験者総加算波形である. 図 2B 中の矢印で記した箇所にみられるように, 刺激提示から 140~160 ms 付近で両条件ともに陰

性電位のピークが生じている. ここで, 左手先偏向条件 (破線) のピークは, 右手先偏向条件 (実線) のピークよりも先行している. それら陰性電位の頂点潜時の被験者間平均 \pm 標準誤差は, 左手先偏向条件では 141.8 ± 5.4 ms, 右手先偏向条件では 159.7 ± 8.0 ms であった ($P = 0.02$; ともに補正值. 詳細は Takeuchi et al. (2013) [10]). それに加えて, 図 2B の総加算波形では, 左手先偏向条件の方がより大きな陰性振幅を示しているが, その被験者間平均には有意な差はなかった. このように, 左手先 (右手先, i.e., 左手後) の刺激組を頻繁に経験して同時の刺激を左手先 (右手先, i.e., 左手後) と感じるようになる背景では, その順序判断の変化と対応した神経応答のタイミング変化が CP4 から計測された ERP で生じていた. 先行研究では, 時間順序知覚の変化に伴う ERP の変調として振幅説 [11] とタイミング説 [12] が報告されているが, 本結果は後者と一致するものであった. CP4 は, 右半球の S1 の上に位置することから, その神経応答のタイミング変化は S1 由来であることが予想されるが, EEG は他の脳部位の活動も混入しうるため, その可能性の検討は慎重に進める必要がある.

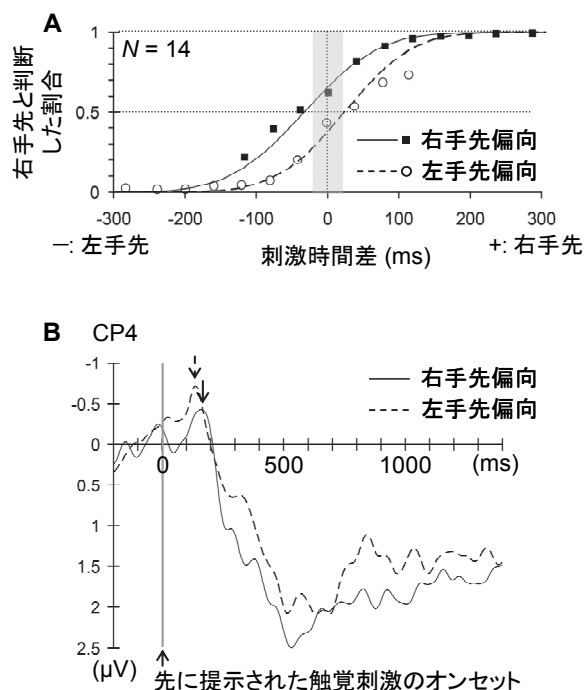


図 2. 体性感覚の時間順序判断でベイズ推定が生じているときの ERP. **A**: 心理物理関数 (被験者 14 名の平均). PSS の被験者間平均は, 34.3 ± 14.7 ms (左手先偏向条件), -40.6 ± 13.2 ms (右手先偏向条件) ($P = 0.004$). **B**: CP4 の総加算 ERP 波形. CP4 は右 S1 の指先に対応する部位の直上付近に位置する. ERP は, 刺激時間差が **A** のグレーの区間にある試行の EEG データについて, 先に提示された触覚刺激をオンセットとして加算平均. Takeuchi et al. (2013) [10] より改変.

その一方で、左半球の S1 の上に位置する電極 CP3 から計測した ERP については、CP4 のような条件間の差は認められなかった。上述の神経応答のタイミング変化は、右半球/左手に限られた作用なのかもしれない。

また、陰性 ERP 成分の頂点潜時の条件間の差は約 20 ms であり、心理物理関数の PSS の条件間の差が約 80 ms であるのに比べて小さい。Miyazaki et al (2006) [6] では、判断/応答バイアスが生じないように設定した実験で PSS のシフト量が大きく減少した。つまり、条件間の PSS 差 80 ms には、認知や運動応答の処理段階でのベイズ推定の作用も含まれており、知覚段階での作用は、その値の一部を構成するに留まるものと考えられる。刺激時点から 140~160 ms という早期の ERP 活動には知覚処理が反映されているものと考えられ、その潜時差が PSS 差よりも小さい値であることは、認知や運動の要素を除くことで PSS 差が減じるという観測と一致したものといえる。

更に sLORETA 法 [13] を用いて EEG の活動源推定を行った。その結果 (図 3)、背側運動前野 (PMd) → S1 → 後頭頂野 (PPC) という順での脳活動の遷移が示された。このように、ベイズ推定にともなった陰性 ERP 成分の頂点潜時変化が生じていた時間帯 (140~160 ms) に先立ち、PMd の活動が見られる。皮膚ウサギ錯覚に関する fMRI 研究 [14] で、本研究の観測よりも腹側寄りではあるものの、運動前野の活動が観測され、その論文の著者の Blankenburg et al. は、運動前野が S1 をトップダウン変調し、皮膚ウサギ錯覚と相関する神経活動変化を引き起こしているのではないかと推測した。運動前野が S1 の活動を変調する機能を有するならば、ベイズ推定にあたっては S1 の活動タイミングの変化に関与している可能性が考えられる。

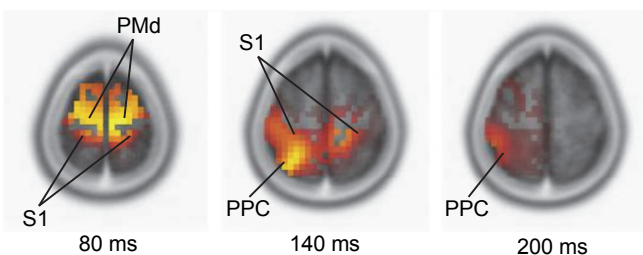


図 3. sLORETA 法による活動源推定の結果。S1: 一次体性感覚野, PMd: 背側運動前野, PPC: 後頭頂野。

1.4. ベイズ推定の関連脳活動:TMS による検討

以上の EEG の活動源推定の結果から、運動前野がベイズ推定に関与しているという作業仮説を立て、経頭蓋磁気刺激 (TMS) による一過性の機能阻害を用いた検証を試みた。被験者は、1.2. と同様の触覚刺激の時

間順序判断を行い (試行数は $500 \times 2 = 1000$)、その課題遂行中の被験者の左右の PMd に TMS を行った。現在のところ、2 名を対象とした実験を行っており、その結果、2 名ともに、左の PMd へ TMS した場合に比べて (図 4A, C)、右の PMd へ TMS した場合にはベイズ推定による PSS のシフト量が小さかった (図 4B, D)。左 PMd への TMS が PSS のシフト量を増大させた可能性も考えられるが、図 4C, D のグレーのラインは TMS を施さない状態での応答であり、その PSS のシフト量は左 PMd へ TMS した場合と近かった。この比較からは、右 PMd への TMS がベイズ推定の効果を弱めたことが示唆される。今後の更なるデータの拡充と検討が必要であるが、最近、サルのリーチングにおけるベイズ推定に PMd が関与していることを示す報告が発表されており [15]、PMd がベイズ推定の神経基盤の一つである可能性が高まっている。

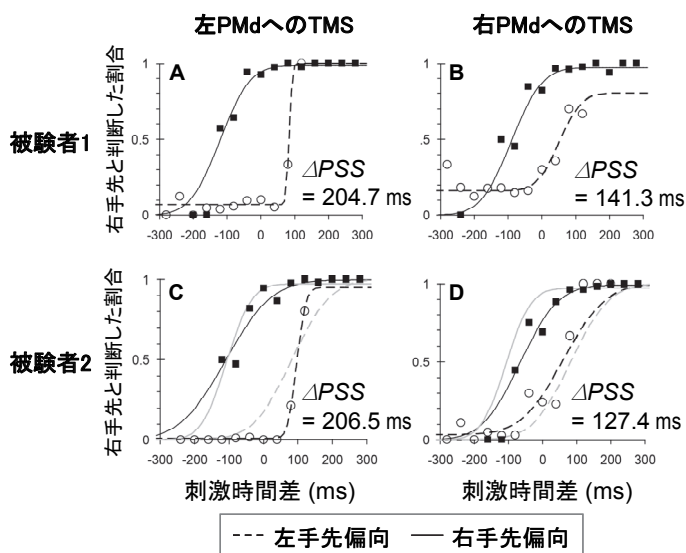


図 4. 左右の PMd への TMS が、体性感覚の時間順序判断におけるベイズ推定に与える影響。TMS は二連発刺激法 (刺激間隔 10ms) を用い、刺激強度は第 1 背側骨間筋に運動誘発電位 (MEP) が生じる閾値の 110% とした。TMS を施す位置は、van den Berg et al. (2010) [16] に基づき、MEP を誘発するのに最適な位置の 3cm 前方とした。刺激時間差が $-60 \sim +60$ ms の区間にある試行の約 37% について TMS を行った (全試行の約 13%)。被験者 1 については、各試行で先に提示した触覚刺激の 80 ms 後、被験者 2 については、200 ms 前に TMS を行った。 ΔPSS は、左手先偏向条件での PSS の値から右手先偏向条件での PSS の値を引いた値。 ΔPSS が大きいほどベイズ推定の作用が強い。C, D のグレーのラインは TMS を与えない状態での応答にフィッティングした心理物理関数 ($\Delta PSS = 190.2$ ms)。本文中で考察した PSS の変化に加えて、それが反映する機序は現在のところ定かではないが、2 名の被験者ともに、左 PMd への TMS (A, C) によって左手先偏向条件 (破線) の心理物理関数の傾きが大きくなっていった。

2. 手にした物体への身体知覚の拡張

2.1. 皮膚ウサギ錯覚

1972年に報告された皮膚ウサギ (cutaneous rabbit) [17] と名付けられた体性錯覚は、その名前だけでなく、現象としても奇妙なものであった。ここでは、その後報告された短縮版 [18] について解説する。被験者は、前腕等に図 5A のような触覚刺激系列を受ける。最初の被刺激位置に第一刺激 (①) を受け、800 ms の時間間隔をおいて同じ位置に第二刺激 (②) を受け、その後、50 ms 等の短い時間間隔で、次なる別の被刺激位置に第三刺激 (③) を受ける。すると、①は、刺激されたとおりの位置に感じられるが、②と③は相互に引き寄せられた位置で感じられる (図 5B)。不思議なことに、②の知覚が、それよりも後に生じた③から、あたかも時間を遡って影響を受けたようにみえる。

このような知覚の遡及効果は、のちに Postdiction [19] と呼ばれるようになり、心理学者、神経科学者、更には哲学者も巻き込んで、この現象の解釈や生成機序が議論されてきた。近年、Blankenburg et al. (2006) [14] は、機能的磁気共鳴画像 (fMRI) を用いて、皮膚ウサギ錯覚が生じているときの脳活動を調べた。その結果、体部位再現地図を構成している S1 に関連活動が観測され、しかも、その "錯覚" を感じた皮膚位置に対応する脳部位が活動していた。つまり、皮膚ウサギ錯覚は、脳に表象された身体地図における神経作用に伴って生じていることが示された。

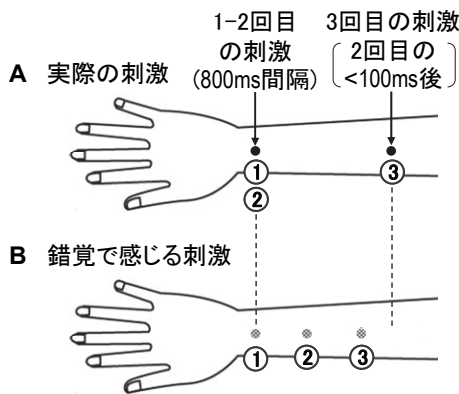


図 5. 皮膚ウサギ錯覚 [18]. **A**: 実際に被験者に与えた触覚刺激の位置とタイミング. **B**: 被験者が触覚刺激を感じた位置. この錯覚は、②と③の時間間隔が 100 ms 以下では安定して起こり、200 ms を超えると消失する. 1972 年の最初の報告 [17] では、5 発→5 発といった多数の刺激が用いられ、それがあたかも小さなウサギが皮膚の上を最初の被刺激位置から次の被刺激位置に向かって跳ねていくように感じられたため、皮膚 "ウサギ" と名付けられた。

2.2. 身体を飛び出す皮膚ウサギ

Miyazaki et al. (2010) [20] は、その皮膚ウサギ錯覚

が身体表面だけでなく、手に持った外的物体の知覚にも生じることを報告した。この実験では、被験者 (8 名) は両手の人差し指でスティックを持った (図 6)。図 5 と同様の刺激系列をスティックを介して被験者の両人差し指に提示すると、スティックに沿って皮膚ウサギ錯覚が感じられた。即ち、脳の身体地図表象における神経活動に伴って生じる体性錯覚 [14] が、手にしたスティックの知覚にまで及んだのである。しばしば道具は身体の一部に喩えられる。実際、脳は、手にした道具を身体の一部のように表象していると考えられている [21]。この発見は、“脳における道具の身体化”を顕在知覚現象として捉えたものと考えられる。

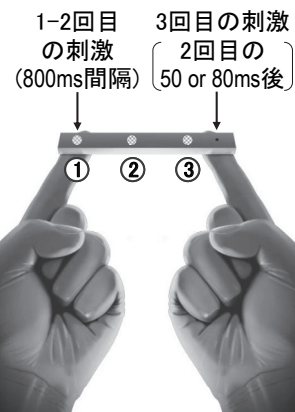


図 6. 身体外にも生じる皮膚ウサギ錯覚 [20].

2.3. 身体外の皮膚ウサギ錯覚の神経基盤は？

皮膚ウサギ錯覚が手にした外的物体の知覚にまで及ぶことが明らかとなった。しかし、生理学の教科書に従えば、皮膚ウサギ錯覚に関連した活動を示した S1 に表象されているのは固有の身体であり、スティックのような外的物体がそこに表象されているはずはない。身体化された道具の表象を示唆する神経活動が、サルの頭頂間溝 (IPS) に観測されているが [21]、IPS を含む PPC には、皮膚ウサギ錯覚に関連した活動は観測されていない [14]。つまり、既存の知見に従えば、皮膚ウサギ錯覚がスティックに感じられるはずはなかった。皮膚ウサギ錯覚、身体/道具の神経表象のいずれかに関する知見を更新しなくてはならない。

現時点で考えられる仮説の一つが、外的物体の把持に伴う PPC の参入である。Blankenburg et al. (2006) [14] は S1 とともに運動前野と前頭前野にも皮膚ウサギ関連活動を観測した。彼らは、運動前野と前頭前野が S1 をトップダウン変調し、皮膚ウサギ錯覚を引き起こしているのではないかと考えた。運動前野と前頭前野によるトップダウン変調の対象が道具利用時には PPC まで拡張しているのかもしれない。もう一つの仮説が、外的物体の把持に伴う S1 の適応的活動変化である。この仮説は有力とはいえないが、ヒトは道具利用が常態

化しており、サルとは異なるS1の適応性を有していても非合理ではない。Theorin & Johansson (2007) [22] は、片手/両手によるデバイス操作の脳活動を比較し、片手操作時に比べて両手操作時にS1を含む感覚運動野の活動が増大していることを報告した。その実験では、片手操作ではデバイスが外的に固定されていた。一方、両手操作ではデバイスを自身で把持して操作していたため、デバイスを介在した両手間の相互作用が存在し、S1の活動増大はそれを反映していた可能性がある。その場合、後者のS1仮説と一致する。これらの仮説は想像の域を越えるものではなく、今後の神経生理学的測定が必要となる。

謝辞: 本研究は、JSPS 科研費 (21670004, 25242058) の支援を受けて行った。

文献

- [1] K. P. Körding and D. M. Wolpert, Bayesian integration in sensorimotor learning, *Nature*, vol.427, no.6971, pp. 244-247, 2004.
- [2] Y. Sato and K. Aihara, Integrative bayesian model on two opposite types of sensory adaptation, *Artificial Life and Robotics*, vol.14, no.2, pp. 289-292, 2009.
- [3] K. P. Körding, S. P. Ku and D. M. Wolpert, Bayesian integration in force estimation, *J Neurophysiol*, vol.92, no.5, pp. 3161-3165, 2004.
- [4] M. Jazayeri and M. N. Shadlen, Temporal context calibrates interval timing, *Nat Neurosci*, vol.13, no.8, pp. 1020-1026, 2010.
- [5] M. Miyazaki, D. Nozaki and Y. Nakajima, Testing bayesian models of human coincidence timing, *J Neurophysiol*, vol.94, no.1, pp. 395-399, 2005.
- [6] M. Miyazaki, S. Yamamoto, S. Uchida and S. Kitazawa, Bayesian calibration of simultaneity in tactile temporal order judgment, *Nat Neurosci*, vol.9, no.7, pp. 875-877, 2006.
- [7] Y. Nagai, M. Suzuki, M. Miyazaki and S. Kitazawa, Acquisition of multiple prior distributions in tactile temporal order judgment, *Front Psychol*, vol.3, pp. 276 (1-7), 2012.
- [8] S. Yamamoto, M. Miyazaki, T. Iwano and S. Kitazawa, Bayesian calibration of simultaneity in audiovisual temporal order judgments, *PLoS ONE*, vol.7, no.7, pp. e40379, 2012.
- [9] W. Fujisaki, S. Shimojo, M. Kashino and S. Nishida, Recalibration of audiovisual simultaneity, *Nat Neurosci*, vol.7, no.7, pp. 773-778, 2004.
- [10] S. Takeuchi, H. Sekiguchi, K. S. Matsuzaki and M. Miyazaki, Probabilistic optimization in the human perceptuo-motor system, *J Phys Fit Sport Med*, vol.2, no.3, pp. 287-294, 2013.
- [11] J. J. McDonald, W. A. Teder-Salejarvi, F. Di Russo and S. A. Hillyard, Neural basis of auditory-induced shifts in visual time-order perception, *Nat Neurosci*, vol.8, no.9, pp. 1197-1202, 2005.
- [12] J. Vibell, C. Klinge, M. Zampini, C. Spence and A. C. Nobre, Temporal order is coded temporally in the brain: Early event-related potential latency shifts underlying prior entry in a cross-modal temporal order judgment task, *J Cogn Neurosci*, vol.19, no.1, pp. 109-120, 2007.
- [13] R. D. Pascual-Marqui, Standardized low-resolution brain electromagnetic tomography (sLORETA): Technical details, *Methods Find Exp Clin Pharmacol*, vol.24 Suppl D, pp. 5-12, 2002.
- [14] F. Blankenburg, C. C. Ruff, R. Deichmann, G. Rees and J. Driver, The cutaneous rabbit illusion affects human primary sensory cortex somatotopically, *PLoS Biol*, vol.4, no.3, pp. e69, 2006.
- [15] B. Deklewa, P. Wanda, L. Miller and K. Körding, "The representation of priors and likelihoods in reaching, " in 42th Annu Meet Soc Neurosci, New Orleans, USA., 2012.
- [16] F. E. van den Berg, S. P. Swinnen and N. Wenderoth, Hemispheric asymmetries of the premotor cortex are task specific as revealed by disruptive tms during bimanual versus unimanual movements, *Cereb Cortex*, vol.20, no.12, pp. 2842-2851, 2010.
- [17] F. A. Geldard and C. E. Sherrick, The cutaneous "rabbit": A perceptual illusion, *Science*, vol.178, no.57, pp. 178-179, 1972.
- [18] F. A. Geldard, Saltation in somesthesia, *Psychol Bull*, vol.92, no.1, pp. 136-175, 1982.
- [19] D. M. Eagleman and T. J. Sejnowski, Motion integration and postdiction in visual awareness, *Science*, vol.287, no.5460, pp. 2036-2038, 2000.
- [20] M. Miyazaki, M. Hirashima and D. Nozaki, The "cutaneous rabbit" hopping out of the body, *J Neurosci*, vol.30, no.5, pp. 1856-1860, 2010.
- [21] A. Iriki, M. Tanaka and Y. Iwamura, Coding of modified body schema during tool use by macaque postcentral neurones, *Neuroreport*, vol.7, no.14, pp. 2325-2330, 1996.
- [22] A. Theorin and R. S. Johansson, Zones of bimanual and unimanual preference within human primary sensorimotor cortex during object manipulation, *Neuroimage*, vol.36 Suppl 2, pp. T2-T15, 2007.