

触覚の時空間知覚・属性知覚に姿勢が及ぼす影響

渡邊 淳司^{*1} 黒木 忍^{*2}

Influence of Posture on Perceptions of Space-time Configuration and Material Properties

Junji Watanabe^{*1} and Scinob Kuroki^{*2}

Abstract --- Touch is a unique modality with regard to its spatial representation. Peripheral receptors are distributed throughout the entire body, and body parts can flexibly move relative to one another. Therefore tactile space can be defined at least in two spatial representations: those before and after the integration of the cutaneous information with the body posture information. Although human can choose either of the spatial representations to perform tactile tasks, the relationship between the spatial representations and judged attributes has not been discussed systematically. Here we review psychophysical findings that provided insights into how the cutaneous and proprioceptive sensations are integrated according to tactile tasks.

Keywords: Tactile sensation, Cutaneous sensation, Proprioceptive sensation, Body schema

1 はじめに

触覚は、受容器が四肢に分布し、四肢自体もその位置や姿勢を大きく変化させるため、その空間的な情報処理にいくつかの段階が存在する。図1上にある情報処理(A)のように、受容器からの皮膚感覚情報のみに基づき、姿勢によらない知覚を生じさせる情報処理もあれば、図1下にある情報処理(B)のように、自己受容感覚と統合された空間で知覚を生じさせる情報処理もある。どちらの情報処理が行われるかは、皮膚に与えられる物理刺激の違いだけでなく、そのときに行われる判断によっても異なる。たとえば、指腹に与えられた二つの触刺刺激を結ぶ方向を回答する心理物理実験の課題では、皮膚感覚のみによって「手の平から指先の方向へ」と回答することもできれば(図1上)、皮膚感覚の情報と自己受容感覚の姿勢情報を統合し、「右」方向や「左」方向という、空間での方向を回答することもできる(図1下)。また、このような触覚の空間情報処理の違いは、心理物理実験だけでなく、触覚ディスプレイを設計する上でも重要な要因である。特に、手に把持するタイプ(たとえば[1,2])や指や腕に装着するタイプ(たとえば[3,4])の触覚ディスプレイでは、使用者の姿勢に依存して解釈が変化する情報(図1下)もあれば、解釈が変化しない情報(図1上)もあり、それらの違いを知ることで、より効率的に情報を提示する設計が可能となる。

このように、皮膚感覚と自己受容感覚がどのように関係付けられて触覚の知覚が生じるか、そのメカニズムを理

解することは、知覚心理学だけでなく、インターフェース分野においても重要な課題であるといえる。しかしながら、皮膚感覚と自己受容感覚との関係性を調べた研究は、それらの感覚に特化した研究に比べて極めて数が少ない。また、これまでの解説書的な文献[5-7]においても、皮膚感覚と自己受容感覚は異なる文脈で論じられ、それらの関係を体系的に理解することが難しかった。そこで本論文では、ディスプレイの設計とも関連が深い、心理物理学的な研究に焦点を当て、皮膚感覚と自己受容感覚の関係について俯瞰的に述べる。以下、2章では皮膚感覚と自己受容感覚の脳生理学的な基盤を確認し、3章では触刺激が「いつ、どこ」にあるという触覚の時空間知覚に対する姿勢の影響について、4章では触刺激が「どのようなもの」であるという触覚の属性知覚に対する姿勢の影響について、それぞれ事例紹介を行う。

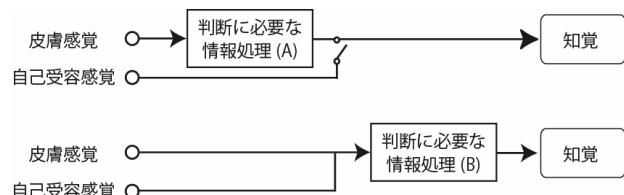


図1 皮膚感覚の情報処理によって生じる知覚(上)と皮膚感覚と自己受容感覚の情報を統合することで生じる知覚(下).

Fig.1 Schematic drawing of perception only using cutaneous sensation (Above), and that performed by integrating cutaneous and proprioceptive sensations (Below)

2 皮膚感覚と自己受容感覚の脳生理学的基盤

指先は、皮膚感覚と自己受容感覚が関連する重要な身体部位であり、本論文で扱う心理物理実験の多くも、

*1 NTTコミュニケーション科学基礎研究所 日本電信電話株式会社

*2 東京大学大学院情報理工学系研究科 (現 日本電信電話株式会社)

*1 NTT Communication Science Laboratories, Nippon Telegraph and Telephone Corporation

*2 NTT Communication Science Laboratories, Nippon Telegraph and Telephone Corporation. On leave from the University of Tokyo

指先で何らかの刺激に触れ、課題に回答するものである。そこで本章では、指先の皮膚感覚と自己受容感覚の脳生理学的基盤について述べる。

指の皮膚に与えられた刺激は、皮膚に変形を生じさせ、皮膚内部の機械受容器を刺激する。そこで生成された神経信号は脊髄、視床等を経て、脳内の初期体性感覚野(図2参照)の3b野と1野に入力される。ここでは別の指からの神経信号は領野の別々の場所へ投射されている[8]。つまり、皮膚感覚の神経信号を脳内に受信したばかりの段階では、身体の「どの部位」に刺激が加えられたかという情報のみが保持され、そこでの触覚的な情報処理に姿勢情報は含まれない(図1上)。

一方、指先の筋や腱によって生成される姿勢に関する神経信号は3a野、1野、2野に入力されており[9]、1野や2野で初めて、皮膚感覚と自己受容感覚の統合が可能となる。その後、信号はSIから後頭頂葉の5野を経て、7野に届く。5野では手首や肘など複数の関節の姿勢情報が入力され、三次元的な空間情報処理が行われるとされる[10]。7野には視覚野からの入力もあり、マルチモーダルな空間情報処理が示唆されている[11]。このように、皮膚感覚の情報は、その処理が進むにつれて、指の姿勢情報、さらには手首や肘の姿勢情報と段階的に統合されて、刺激が「どの空間位置」にあるか(図1下)を符号化可能になる。

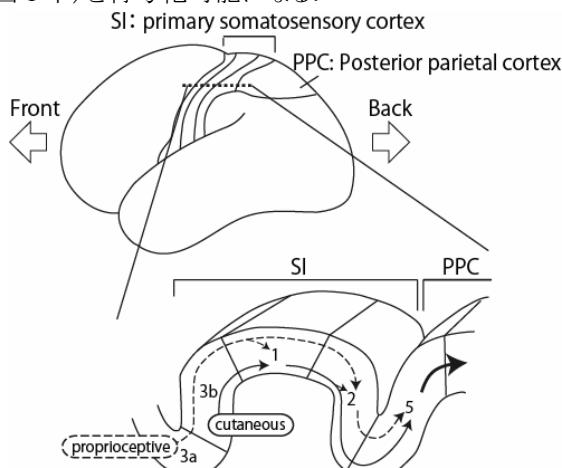


図2 初期体性感覚野(SI)は、前頭葉と頭頂葉の間にある中心溝の後方に位置する。

Fig.2 Schematic drawing of primary somatosensory cortex (SI) located in the backside of the central sulcus.

3 時空間関係の知覚

3.1 一点刺激に関する課題

触刺激の時空間知覚における基本的な課題として、一点の触刺激に対して、その有無を回答する刺激検出課題[12]や、刺激がいつ身体に加えられたかを回答する刺激のタイミング検出課題[13]、さらには、一定の空間的長さ[14]や時間的長さ[15]を持つ刺激に対する知覚課題が考えられる。これらの課題では、刺激を加える

身体部位によって感度[12]や検出時間[13]が異なることが示されてはいるものの、姿勢に関する検討はあまり行われておらず、今後の検証が待たれる。

3.2 同時性判断

刺激が二点加えられると、二刺激の関係性を判断することが可能となる。身体表面に加えられた二刺激の時空間判断において、最も基本的な課題は、二刺激の同時・非同時を判断する同時性判断課題である。この課題においては、刺激を片手内の二指に加える場合と、両手一指ずつに加える場合で判断精度が異なり、両手に刺激を加えた方が判断精度は低いことが知られている[16,17]。ただし、指や腕を交差する、腕を広げる等、姿勢を変化させても判断精度は変わらない。つまり、同時性判断課題は、二刺激を提示する身体部位によって判断精度が異なるが、姿勢によって変化する空間的な位置関係には影響されない。これらのこととは、皮膚感覚が姿勢情報と統合される前の情報処理メカニズム(図1(A))によって、課題が遂行されていることを示唆する。

3.3 運動感

同時性判断課題よりも提示する二刺激の時間差を大きく、それぞれの持続時間を長くすると、二点間を結ぶ仮現運動が知覚される[18]。二刺激を加える身体部位が片手内である場合と両手に渡る場合では、仮現運動の生起確率・知覚強度が異なるが、刺激が両手に渡る場合に腕を開閉しても、その影響は見られない[17,19]。このことから、運動感の知覚は、二刺激を提示する身体部位に影響されるが、姿勢によって変化する空間的な位置関係には影響されない。つまり、皮膚感覚と姿勢情報が統合される前の情報処理メカニズム(図1(A))によって、課題が遂行されていることを示唆する。

3.4 運動方向判断

運動が知覚されると、その方向を判断することが可能である。運動の生起確率や知覚強度には姿勢の影響が表れなかったが、日常では姿勢を考慮に入れた「環境における運動方向」が知覚されていることから、運動方向判断課題には姿勢が強く影響すると推測される。

触覚の運動方向判断では順応現象が観察されており、順応実験を利用して姿勢の影響を調べることができる。運動方向知覚の順応は、視覚では「滝の錯視」として広く知られ、近年、触覚においてもその存在が報告されている[20]。触覚の順応では、たとえば、図3左のように、二点の振動刺激を右手の人差し指、中指に順に加え、右向きの仮現運動を一定時間提示し、それに順応する。そうすると、テスト刺激(図3中央上、ある開始時間差を持つ仮現運動刺激)は、図3右上のように、順応刺激と逆の向き、すなわち、中指から人差し指への方向(左向き)に知覚されやすくなる。

ここで、運動方向判断に対する自己受容感覚の影響を調べるために、図3左下のように指を交差して、中指から人差し指への方向(右向き)の仮現運動に順応し、指姿勢を非交差に戻してテスト刺激を提示すると(図3中央下)，指を交差しないで順応したときと同じく、テスト刺激を中指から人差し指への方向(左向き)へ知覚しやすくなる(図3右下)。図3上下の実験条件を比べたとき、順応時に刺激を加える指の順番は逆であるにもかかわらず、テスト刺激に対する順応は環境で同じ方向へ観察された(開眼閉眼によらず)[21]。これらの結果から、運動方向判断の情報処理メカニズムは、皮膚感覚の方向情報ではなく、皮膚感覚に自己受容感覚を統合した後の方針情報を利用していることが示唆される(図1(B))。これは運動感の判断とは異なる傾向であるが、同じ運動に関する課題でも、方向判断課題では空間的な判断を要するため、姿勢の影響が大きくなつたと考えられる。

また、触覚の運動方向判断の偏りは、視覚の運動方向順応によっても生じ、逆に、触覚への順応が、視覚の運動方向判断に偏りを引き起こす[22]。これらのこととは、運動方向判断の情報処理は自己受容感覚だけでなく、多感覚的な空間表象とも関連があることを示唆する。

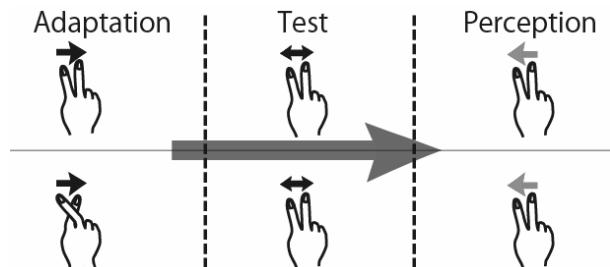


図3 運動方向判断の順応実験[21]。通常の指姿勢での順応(上)。指を交差して、同じ環境の向き(指の順は逆)に順応しても、影響は指を交差しない場合と同じ方向である(下)。

Fig.3 Tactile motion aftereffect [21] in normal posture (Above), and in crossed finger posture during adaptation (Below). The biases for the test were observed in the same direction.

3.5 運動方向の相互作用

二つ以上の運動方向が同時に提示されると、全体としての運動方向が、個別の運動の方向判断に影響を与える。この運動方向の相互作用は、姿勢を含めて計算された方向で生じることが知られている。具体的には、図4左の一致条件(Congruentの姿勢)のように、手を開いた状態で親指と人差し指の指腹それぞれに同じ方向に運動する刺激を提示したとき、各指の運動方向を正しく判断することができるが、図4右の不一致条件(Incongruentの姿勢)のように、指を向かい合わせると、指腹に対しては図4左と同じ運動刺激が提示されているにもかかわらず、各指の運動方向判断の精度が悪化する[23]。これは、運動方向の相互作用においては、指

姿勢が大きな影響を持つことを示している(図1(B))。

この運動方向の相互作用は両手間でも生じる。図5のように、振動子付きの箱を両手に握り、両手それぞれに仮現運動が提示されたとき、一方の手に生じる運動方向(親指からその他の指、もしくは、その他の指から親指の方向)を判断する課題が行われた[24]。両手の手の平を同じ方向(上もしくは下)に向けた場合(図5左のCongruentの姿勢)、二つの箱から生じる運動が同じ方向であるとき(両方とも親指からその他、もしくはその逆)に、方向判断の精度が向上した。しかし、同様の刺激を加えながら、二つの運動刺激の環境での方向を背反させるように片手の手首をひっくり返すと(図5右のIncongruentの姿勢)、方向判断精度が低下した。この結果は運動方向判断の相互作用には、指だけでなく手首の姿勢も影響することを示唆している(図1(B))。

また、一方の手に加えられた運動方向による、もう一方の手に加えられた運動の方向判断への干渉は、両手の距離を遠ざけることで減少することが知られるが、両手を開いた状態で鏡を置いて、視覚的な空間距離を近づけると、再度干渉は大きくなる[24]。この結果は、運動方向判断の相互作用が、自己受容感覚だけでなく、視覚による空間表象とも関連があることを示唆している。

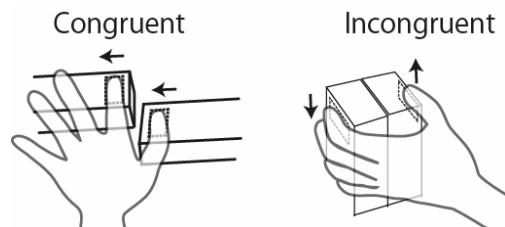


図4 皮膚上の関係が同じで、手の姿勢が変わると環境での関係が変化する例[23]。一致条件(左 Congruent の姿勢)に比べ、不一致条件(右 Incongruent の姿勢)は判断精度が悪い。

Fig.4 An example of congruent and incongruent motion directions influenced by hand posture [23]. Comparing congruent conditions (Left), the task performances of direction judgments are degraded in the incongruent condition (Right).

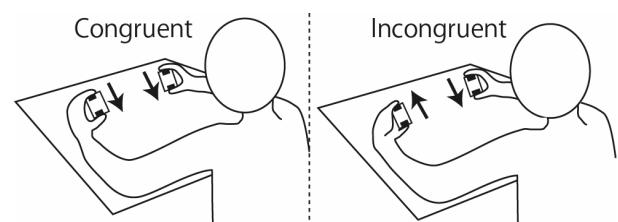


図5 手上の運動順序が同じでも、手首の姿勢で環境での関係が変化する例[24]。一致条件(左 Congruent の姿勢)に比べ、不一致条件(右 Incongruent の姿勢)は判断精度が悪い。

Fig.5 An example of congruent and incongruent motion directions influenced by wrist posture [24]. Comparing congruent conditions (Left), the task performances of direction judgments are degraded in the incongruent conditions (Right).

3.6 順序判断

二刺激の時間差が大きくなると、刺激の加えられた順序を回答することが可能になる。この課題では、同時性判断や運動感と同じく、二刺激を片手に提示するか、両手に提示するかで判断精度が変化することが知られている[17,25]。ただし、同時性判断や運動感とは異なり、順序判断課題の精度は姿勢を変化させることによっても変化する。たとえば、両手の指先に加えられた刺激の順序判断を、腕を交差した姿勢で行った場合(図 6 右上)、腕を非交差で課題を行ったとき(図 6 左)に比べ、判断精度が著しく低下することが知られている[26]。この身体部位の交差による順序判断精度の低下は、片手の二指に刺激を加えた場合にも生じる[27]。また、交差ほど明瞭ではないものの、両手間の距離を変更した場合にも、順序判断が影響を受ける場合もある[28]。これらの結果は、順序判断課題には、二刺激の身体上の位置関係だけでなく、姿勢情報統合後の情報処理が含まれることを示唆している(図 1(B))。

順序判断精度の低下は、手先に持った道具の先端を交差させても生じる(図 6 右下)[26]。また逆に、実際に腕を交差していても、ゴム手袋を用いて見た目に腕が交差しない状況を作りだすと、判断精度が腕非交差時の値に近づく[29]。これらは、順序判断課題の遂行に、皮膚感覺と自己受容感覺を統合した情報だけでなく、より高次の情報が利用されていることを示唆している。

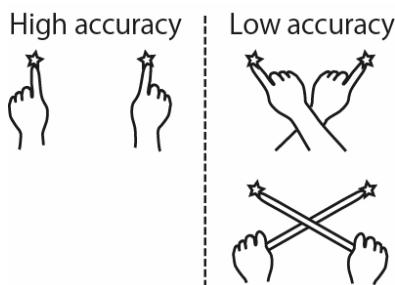


図6 腕を交差しない順序判断課題(左)に比べ、腕を交差する(右上)、道具を交差する(右下)と精度が悪化する[26]。

Fig.6 Comparing with the arm-uncrossed condition (Left), the task performances of temporal order judgments were worse in the arm-crossed and tool-crossed conditions (Right) [26].

3.7 運動の順序判断

二本の指の指腹それぞれに、時間差をもって運動刺激を提示し、どちらの指の刺激が先に提示されたかを回答する課題(運動刺激の順序判断課題)においても、姿勢の影響が現れる。図 7 左上の一一致条件(Congruent の姿勢)のように、非交差の指二本に対して各指の局所的運動の方向と指間の大局部的運動の方向が一致するように刺激すると、刺激された指の順序を高い精度で判断できるが、指腹に同じ運動刺激を提示したまま、図 7 右上の不一致条件(Incongruent の姿勢)のように指を交

差させると、順序判断の回答精度が低下する[30]。これは、運動刺激の順序判断についても、自己受容感覺統合後の空間情報処理メカニズム(図 1(B))が利用されていることを示唆している。

また、運動を両手に加えた場合についても、同様に姿勢の影響が生じる。両手の人差し指を平行に並べた状態で、図 7 左下の一一致条件(Congruent の順序)のように、左手の人差し指に右向きの運動を提示し、その後、右手の人差し指に右向きの運動を提示すると、全体としての運動方向と両手の各指に加えられた運動方向が一致するため、被験者は左手の人差し指が先に刺激されたと高い精度で回答できる。しかし、各指への運動提示順を逆にする、つまりは、図 7 右下にある不一致条件(Incongruent の順序)のように、右手人差し指に右向きの運動を提示した後、左手人差し指に右向きの運動を提示すると、全体としての運動方向と両手の各指に加えられた運動方向が一致しないため、運動順序の回答精度は低下する。そして、指先には図 7 左下の一一致条件と同様の刺激を提示しながら、図 7 下中央の無関係条件(Irrelevant の姿勢)のように、両手の人差し指を一直線に並べると、その中間の回答精度となる[30]。このことからもまた、運動順序判断の精度は、姿勢によって変化することが示唆される(図 1(B))。

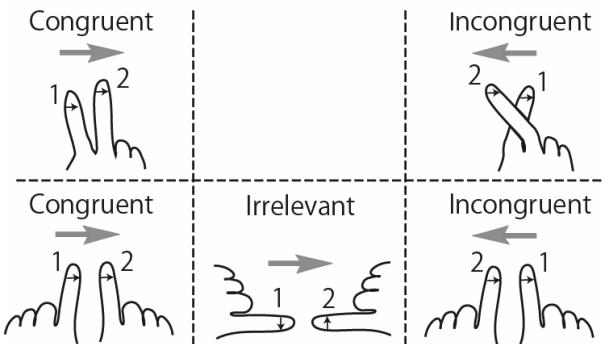


図7 片手、両手において、一致条件(Congruent の姿勢や順序)に比べて、不一致条件(Incongruent の姿勢や順序)では、運動順序の判断精度が悪化する。無関係条件(Irrelevant の姿勢)ではそれらの中間の精度となる[30]。

Fig.7 Comparing congruent conditions (Left column), the task performances of temporal order judgment is degraded in the incongruent conditions (Right column). The trend was observed within an arm and between arms. The performance of irrelevant condition was between the two conditions (Center) [30].

4 属性の知覚

4.1 振動周波数の知覚

触刺激の属性知覚の基本的なものの一つとして、振動周波数の知覚が挙げられる。これまでに、周波数知覚についても順応現象が報告されている[15]。ある周波数(たとえば、35Hz)の振動に数十秒順応した後、順応振動刺激の周波数よりも低い周波数(たとえば、25Hz)

のテスト振動を加えると、高い周波数に順応した被験者にとって、そのテスト振動はより低い周波数(約 20Hz)に知覚される。運動方向判断(3.4 節)で行ったように、この順応現象を利用して、振動周波数知覚における姿勢の影響を調べることが可能である。しかし、現在のところそのような報告はなく、今後の検証が待たれる。

4.2 温度の知覚

次に、機械刺激とは異なる神経伝達経路を持つ温度知覚の空間情報処理について、自己受容感覚との関係を調べた研究[31]を紹介する。この研究では、図 8 上にあるような温度知覚の錯覚が利用されている。三つの温度刺激に三本の指(たとえば、人差し指、中指、薬指)を置き、両端の二つに温かい(冷たい)刺激を、中央に室温の刺激を提示すると、中央の刺激も温かく(冷たく)感じる[32]。この錯覚において、三つの刺激に人差し指、中指、薬指で触れた場合(図 8 上)のほうが、人差し指、中指、小指で触れた場合(図 8 下)よりも、その効果が大きい。そして、図 8 中のように、人差し指、中指、薬指で触れ、薬指の刺激位置を小指の空間位置に移動させても、図 8 上と錯覚の効果は等しかった。また、中指と人差し指を交差して両端の二つ(中指と薬指)に温かい刺激を提示しても、中央の指(人差し指)に錯覚は生じない[33]。つまり、刺激を提示する指の違いが、指の空間的位置関係よりも強い影響を与えており、温度の空間的な情報処理には、自己受容感覚と統合する前の情報処理メカニズムが寄与していることが示唆される(図 1(A))。

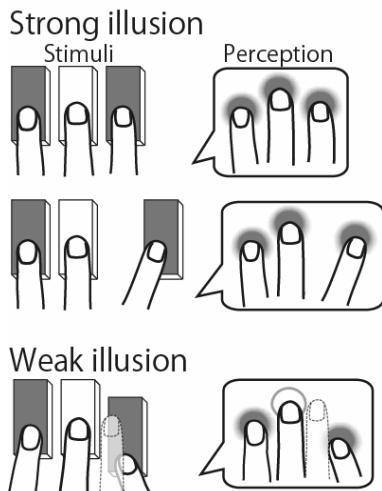


図8 両端の指が温かい(冷たい)対象物に接触していると、室温の中央の対象物に触れる指にも温度知覚が生じる(上)[32]。錯覚は片手の指間の空間距離を離しても変化がないが(中)、指を変えると効果が弱まる(下)[31]。

Fig.8 Thermal referral illusion [32]. The central neutral object is perceived cold/warm, when the outer two objects are cold/warm (Top). The strength is decided by somatotopic distance (Bottom), not spatiotopic distance (Middle) [31].

4.3 粗さの知覚

触刺激を指でなぞることで、皮膚に振動が生じ、その皮膚知覚の情報に基づいて粗さが知覚される。この粗さの知覚においても順応現象が知られており[34]、粗い(滑らかな)刺激に対して順応した後(図 9 左)、一定の粗さのテスト刺激に触ると(図 9 中央)、その刺激がより滑らかに(より粗く)知覚される(図 9 右)。ただし、粗さ知覚には複数のメカニズムがあることが示唆されており、200μm 以上の粗さ刺激とそれ以下の粗さ刺激を順応刺激とテスト刺激として組み合わせると、順応が観察されない[35]。順応現象を利用することで粗さ知覚における姿勢の影響を調べることは可能であるが、現在のところ、そのような報告はなされていない。ただし、指を動かして粗さを知覚する際、指のなぞり速度を変化させても知覚される粗さは大幅に変化しないことから[36]、自己受容感覚の情報によって皮膚知覚の入力が補正されている可能性がある。

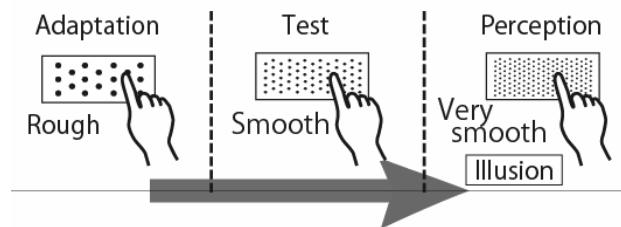


図9 粗さ知覚の順応実験[34]。指腹で粗い(滑らかな)面を一定時間なぞって順応した後に(左)、ある粗さの面をなぞると(中央)、その面はより滑らかに(粗く)に知覚される(右)。

Fig.9 Tactile roughness aftereffect [34]. After adapting to the rough surface (Left), test surface (Center) is perceived smoother (Right), and vice versa.

4.4 硬さの知覚

硬さの知覚は、指を動かさず受動的に対象に触れた場合にも生じる。しかし、皮膚を麻痺させて受動的に触れた場合に対象の硬さの弁別が殆どできないことから[37]、硬さの知覚では、皮膚知覚が重要な役割を果たしていると示唆される。また、触れる方向によって硬さの弁別精度が異なることが知られている[38]。ただしこの現象では、指の動かし方によって物体への指の押し込みが変化し、皮膚知覚への入力そのものが変化した結果であるのか、皮膚知覚への入力は同じであり、自己受容感覚が異なることによって弁別精度が変化した結果であるのか、区別することができない。自己受容感覚の影響については今後より詳細な検証が待たれる。

4.5 凹凸の知覚

曲面を持つ対象に触ると、その対象の凹凸を知覚することができる。この凹凸知覚においても順応現象が報告されている。3 cm 程度の凸(凹)の曲面に指で一定時間触れた後(図 10 左)、平らな表面を触ると(図 10 中央)、その表面が凹(凸)に知覚される(図 10 右)[39]。こ

の凹凸知覚の順応では、順応刺激に触れる指とテスト刺激に触れる指を別の手に変え、同じ空間位置の刺激に順番に触れた場合にも、弱いながら効果が生じる。このことから、凹凸の知覚は姿勢情報を統合した空間位置での情報処理(図 1(B))を含む可能性がある。ただし、この実験は同じ皮膚刺激に対しての姿勢や空間位置の影響を観察したものではないので、姿勢の影響について断定的な議論をするのは難しい。

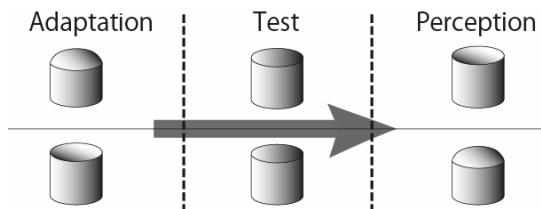


図10 凹凸知覚における順応実験[39]。指腹で凸(凹)の面に一定時間触れて順応した後(左)、平面に触れると(中央)、その面は凹(凸)に知覚される(右)。

Fig.10 Haptic curvature aftereffect [39]. After adapting to the convex surface (Left), flat surface (Center) is perceived as concave (Right), and vice versa.

4.6 形状の知覚

指先よりも大きな形状を知覚する際には、空間の中で指がどのように移動したか、その距離や軌跡の情報が重要である。たとえば、図 11 上のように、指の移動中に接触対象が指と同方向に移動した場合、指腹(皮膚感覚)には対象の移動の情報が存在するにもかかわらず、接触対象の形状を実際よりも大きく、指の移動量と同程度ものとして知覚される[40]。また、逆に、接触対象が指運動と逆方向に移動すると、実際よりも小さく知覚される(図 11 下)。これらのこととは、形状の知覚では姿勢情報が大きな役割を果たしていることを示唆する(図 1(B))。

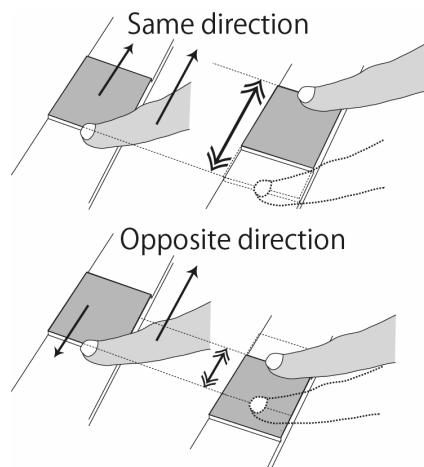


図11 なぞり動作時に接触対象が指の運動と同方向に動いた場合(上)と逆方向に動いた場合(下)[40]。

Fig.11 When an object moves in the same (opposite) direction of the finger during finger movement, it is perceived elongated (shrunk) [40].

4.7 文字の認識

形状知覚の中でもより認知的な知覚課題として、アルファベット等の認識が挙げられる。この課題については、体表に文字を書いた際に想起される文字を回答することで姿勢の影響が調べられている。図 12 中央枠内にあるように、右手の平に文字「b」を書いたときに、手首や腕の姿勢によって、それが「b, d, p, q」等、上下左右に対称のアルファベットと認識される[41]。たとえば、図 12 左のように、手のひらを内側に向ければ文字「b」が認識され、図 12 右のように、手のひらを外側に向けると文字「d」が認識される。この現象は晴眼者、視覚障害者の区別なく生じることから、手の平に提示された文字を視覚的に認識した結果ではないことがわかる。これらのこととは、文字認識の情報処理メカニズムが姿勢情報から大きな影響を受けていることを示唆している(図 1(B))。

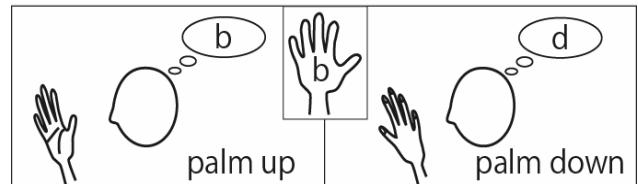


図12 手のひらに対して同じ文字を書いた場合でも、手の姿勢によって異なる文字が知覚される[41]。

Fig.12 Letters written on the palm can be perceived differently according to the body posture [41].

5 おわりに

5.1 時空間知覚・属性知覚に対する姿勢の影響

触刺激が「いつ、どこ」に知覚されるという触覚の時空間知覚(3 章)と、触刺激が「どのような」ものであるという触覚の属性知覚(4 章)における姿勢の影響を、比較的単純な課題から複雑な課題まで取り上げた。

時空間知覚において、同時性や運動感の判断など課題遂行に空間的な情報処理が含まれない判断では、姿勢の影響が観察されなかった(図 1(A))。一方で、二刺激を結ぶ方向を回答する運動方向判断課題や、どちらの空間位置の刺激が先に提示されたかを回答する順序判断課題では、姿勢の影響が観察され(図 1(B))、それぞれの課題ごとに影響の大きさが異なった。さらに、運動方向の相互作用や運動刺激の順序判断課題などより複雑な課題においては、視覚的空間表象の影響も観察された。また、本論文では取り扱っていないが、より複雑な多感覚的課題においても、触覚の関与する相互作用が報告されている[42,43]。これらの多感覚的な相互作用は皮膚上の位置関係や自己受容感覚との統合だけでは説明できず、図 1(A),(B)の情報処理の後にあら、高次の情報処理についても調べていく必要がある。

属性知覚については、文字認識において自己受容感覚との関係が示唆されたものの(図 1(B))、その他の属性知覚については、姿勢の影響があるという明確な

事例はこれまでに報告されていない。逆に、4.2 節で述べたように、温度感覚の空間統合処理においては、姿勢は殆ど影響しない[31]（図1(A)）。このように、一見空間的な課題を行っている場合でも姿勢の影響は認められないことがあり、その他の属性に関する研究は、情報処理過程をひとつひとつ丁寧に調べていく必要がある。

5.2 まとめ

皮膚感覚と自己受容感覚は、触知覚において根本的な役割を果たしている。しかしながら、それぞれの感覚内での研究に比べて、それらの関係性に関する研究は、心理物理学の分野においても未だ少ない。また、これらの感覚の統合過程の理解は触覚の情報提示技術、特に手や指先、腕に装着して情報提示を行うデバイスの効率性や頑健性を考える上で大変重要である。本総説論文が、心理物理学の分野としての裾野を広げるとともに、心理物理学の知見や視点に基づくデバイスの開発・評価に寄与することを望む。

参考文献

- [1] 雨宮, 安藤, 前田: 知覚の非線形性を利用した非接地型力覚惹起手法の提案と評価; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 11(1), 47-58 (2006)
- [2] 中村, 福井: 携帯型感覚情報通信における可触化技術の開発動向: 非ベース型触力覚インターフェース‘GyroCube’について; バイオメカニズム学会誌, 31(2), 90-94 (2007)
- [3] 南澤, 深町, 梶本, 川上, 舘: バーチャルな物体の質量および内部ダイナミクスを提示する装着型触力覚ディスプレイ; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 13(1), 15-24 (2008)
- [4] 大丘, 藤田: 振動ファンタムセンセーションの位置制御による指先への接線力とすべりの代替提示; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 15(2), 263-272 (2010)
- [5] E.R. Kandel, J.H. Schwartz, T.M. Jessell: Principles of neural science; McGraw-Hill Medical, 4th ed. (2000)
- [6] L.A. Jones, S.J. Lederman: Human Hand Function; Oxford University Press. (2006)
- [7] 下条, 前野, 篠田, 佐野(監修): 触感認識メカニズムと応用技術 -触覚センサ・触覚ディスプレイ-; サインエス & テクノロジー (2010)
- [8] W. Penfield, E. Boldrey: Somatic motor and sensory representation in the cerebral cortex of man as studied by electrical stimulation; Brain, 60(4), 389-443 (1937)
- [9] Y. Iwamura, M. Tanaka, M. Sakamoto, O. Hikosaka: Rostrocaudal gradients in the neuronal receptive field complexity in the finger region of the alert monkey's postcentral gyrus; Exp Brain Res, 92 (3), 360-368 (1993)
- [10] H. Sakata, Y. Takaoka, A. Kawasaki, H. Shibutani: Somatosensory properties of neurons in the superior parietal cortex (area 5) of the rhesus monkey; Brain Res., 64, 85-102 (1973)
- [11] W.K. Dong, E.H. Chudler, K. Sugiama, V.J. Roberts, T. Hayashi: Somatosensory, multisensory, and task-related neurons in cortical area 7b (PF) of unanesthetized monkeys; J Neurophysiol., 72(2), 542-564 (1994)
- [12] S. Weinstein: Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex, and laterality; In *The Skin Senses*, ed. D. R. Kenshalo. Springfield, Ill.: Thomas., 195-222 (1968)
- [13] V. Harrar, L.R. Harris: Simultaneity constancy: detecting events with touch and vision; Exp Brain Res., 166 (3) 465-473 (2005)
- [14] M. Hollins, A.K. Goble: Perception of the length of voluntary movements; Somatosens Res., 5(4), 335-348, (1988)
- [15] J. Watanabe, T. Amemiya, S. Nishida, A. Johnston: Tactile duration compression by vibrotactile adaptation; Neuroreport, 21 (3), 856-860 (2010)
- [16] G. Geffen, V. Rosa, M.J. Luciano: Effects of preferred hand and sex on the perception of tactile simultaneity; J Clin Exp Neuropsychol., 22(2), 219-231 (2000)
- [17] S. Kuroki, J. Watanabe, N. Kawakami, S. Tachi, S. Nishida: Somatotopic dominance in tactile temporal processing; Exp Brain Res., 203(1), 51-62 (2010)
- [18] J.H. Kirman: Tactile apparent movement: The effects of interstimulus onset interval and stimulus duration; Percept & Psychophys., 15(1), 1-6 (1974)
- [19] C.E. Sherrick: Bilateral apparent haptic movement; Percept & Psychophys., 4(3), 159-160 (1968)
- [20] J. Watanabe, S. Hayashi, H. Kajimoto, S. Tachi, S. Nishida: Tactile motion aftereffects produced by appropriate presentation for mechanoreceptors; Exp Brain Res., 180(3), 577-582 (2007)
- [21] 黒木, 渡邊, 川上, 舘: 触運動知覚メカニズムと意識に上る運動方向の関係; 第 14 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 大会論文集 (2009)
- [22] T. Konkle, Q. Wang, V. Hayward, C.I. Moore: Motion aftereffects transfer between touch and vision; Curr Biol., 19 (9), 745-750 (2009)
- [23] M.A. Rinken, J.C. Craig: The effect of spatial orientation on the perception of moving tactile stimuli; Percept & Psychophys., 56(3), 356-362 (1994)
- [24] S. Soto-Faraco, A. Ronald, C. Spence: Tactile selective attention and body posture: assessing the multisensory contributions of vision and proprioception; Percept & Psychophys., 66(7), 1077-1094 (2004)
- [25] J.C. Craig: Attending to two fingers: two hands are better than one; Percept & Psychophys., 38(6), 496-511 (1985)
- [26] S. Yamamoto, S. Kitazawa: Reversal of subjective temporal order due to arm crossing; Nat Neurosci., 4(7), 759-765 (2001)
- [27] T. Sekine, K. Mogi: Distinct neural processes of bodily awareness in crossed fingers illusion; Neuroreport., 20 (5), 467-472 (2009)
- [28] D.I. Shore, K. Gray, E. Spry, C. Spence: Spatial modulation of tactile temporal order judgments; Perception., 34, 1251-1262 (2005)
- [29] E. Azanon, S. Soto-Faraco: Alleviating the ‘crossed-hands’ deficit by seeing uncrossed rubber hands; Exp Brain Res., 182(4), 537-548 (2007)
- [30] J.C. Craig: The effect of hand position and pattern motion

on temporal order judgments; *Percept & Psychophys.*, 65(5), 779-788 (2003)

[著者紹介]

- [31] H.-N. Ho, J. Watanabe, H. Ando, M. Kashino: Somatotopic or Spatiotopic? Frame of reference for localizing thermal sensations under thermo-tactile interactions; *Attention, Percept & Psychophys.*, 72(6), 1666-1675 (2010)
- [32] B.G. Green: Referred thermal sensations: Warmth versus cold; *Sens Processes.*, 2(3), 220-230 (1978)
- [33] Ho, Watanabe, Ando, Kashino: Effects of Finger Position on Referred Thermal Sensation; 第12回日本バーチャルリアリティ学会大会, 大会論文集 (2007)
- [34] M. Kahrmanovic, Tiest W.M. Bergmann, A.M. Kappers: Context effects in haptic perception of roughness; *Exp Brain Res.*, 194(2), 287-297 (2009)
- [35] M. Hollins, S.J. Bensmaia, S. Washburn: Vibrotactile adaptation impairs discrimination of fine, but not coarse, textures; *Somatosens Mot Res.*, 18(4), 253-262 (2001)
- [36] S. Lederman: Tactual roughness perception: Spatial and temporal determinants; *Can J Psychol.*, 37(4), 498-511 (1983)
- [37] M.A. Srinivasan, R.H. LaMotte: Tactual discrimination of softness; *J Neurophysiol.*, 73(1), 88-101 (1995)
- [38] K. Drewing L. Kaim: Haptic shape perception from force and position signals varies with exploratory movement direction and the exploring finger; *Atten Percept Psychophys.*, 71(5), 1174-1184 (2009)
- [39] B.J. van der Horst, M.J. Duijndam, M.F. Ketels, M.T. Wilbers, S.A. Zwijsen, A.M. Kappers: Intramanual and intermanual transfer of the curvature aftereffect; *Exp Brain Res.*, 187(3), 491-496 (2008)
- [40] 安藤, 仲谷, 渡邊, 前田, 館:なぞり動作を利用した触形状提示手法の検討; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 11(1), 91-94 (2006)
- [41] S. Shimojo, M. Sasaki, L.M. Parsons, S. Torii: Mirror reversal by blind subjects in cutaneous perception and motor production of letters and numbers; *Percept & Psychophys.*, 45(2), 145-52 (1989)
- [42] D. Sanabria, S. Soto-Faraco, C. Spence: Spatiotemporal interactions between audition and touch depend on hand posture; *Exp Brain Res.*, 165(4), 505-514 (2005)
- [43] E. Azanon, S. Soto-Faraco: Changing reference frames during the encoding of tactile events; *Curr Biol.*, 18(14), 1044-1049 (2008)

渡邊 淳司 (正会員)



2005 年東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了. 博士 (情報理工学).
2011 年 4 月より NTT コミュニケーション科学基礎研究所リサーチスペシャリスト.
<http://www.junji.org>

黒木 忍 (正会員)



2011 年東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了. 博士 (情報理工学).
2011 年 4 月より NTT コミュニケーション科学基礎研究所研究員として触覚の知覚心理研究に従事.

(2011年3月19日)