

## 特集 ■ 超五感

## 超身体感覚



前田太朗  
MAEDA TARO

大阪大学



安藤英由樹  
ANDO HIDEYUKI

大阪大学



飯塚博幸  
IIZUKA HIROYUKI

大阪大学

## 1. はじめに

バーチャルリアリティの分野では、物理的な特性とは異なる人間の感覚の特性を利用したテクニックを多用する。これはしばしば「錯覚」という形で知られているが、今回の特集で扱われている「超五感」もこのような生体特有の情報処理の特性が様々な形で反映されたものである場合が多い。しかし、我々が日常の体験でこのような錯覚や超感覚に遭遇している気がしないのは、こうした局面において機能している感覚は実際には単体ではなくマルチモーダルかつ複合的だからである。それらの異なる感覚が相補的に統合された結果、「最も尤もらしい世界像・自己身体イメージ」が意識下で構築され、その結果のみが意識上に現れる。結果として我々がそれを体験したものとして意識できるものはその尤もらしい世界像だけということになる。本稿では特に運動を伴うことで生じる身体性に着目し、身体性によって形作られている身体イメージがもたらす超感覚としての「超身体感覚」について紹介しよう。

## 2. 身体性とは何か

身体性とは文字通り身体というものの持つ特徴が反映された性質のことであり、これを形作るのはまぎれもなく人間の身体を持つ物理的な拘束条件そのものである。すなわち「頭一つに胴一つ。手が2本で足2本。目玉二つに耳二つ。立って歩いて尻尾無し」がその基本となる。身体は多くの感覚と多くの運動自由度を有するが、同時に多くの拘束条件を与えてくれる。感覚器は世界を計測する物差しとなり、物理現象を感覚情報へと変換する。身体運動は物理世界に作用して神経の指令を物理現象に反映する。こうして生物は動物として活動し始めると同時に身体を介して外界の現象と対峙し、生存のためにこの間の相互作用に対して常に即時の対応を求めら

れるという宿命を負っている。しかし、多細胞動物として体が大きくなり、構造や行動が複雑化してくるにつれて、生化学的な単純な反応だけではこの対応が間に合わなくなってくる。そのために感覚器を備えて外界を見張り、高速な情報伝達手段として神経系が生まれ、それらを統合処理するための脳が発達していく。脳を極限まで発達させてきた人間にとってもこの制約はつきまといっている。むしろそれを補うためにこそ脳活動があるのだと言っても過言ではない。人間も動物である以上、常に感覚に基づいて環境に対応した行動をし続けることが求められる。しかし、生物の神経系の速度には限界がある。大きく複雑になった人間の脳神経系では感覚で情報を捉えてから脳まで伝達・処理して運動を組み立てていたのでは時間的・物理的に間に合わない。そこで人間が取った情報処理戦略は外界と自己身体モデルを脳内に構築することであった。これが世界像・身体イメージの維持・更新である。行動の結果としてこの後に生じるであろう感覚入力をこのモデルによってシミュレーション予測しておき、実際の感覚入力と比較することで、環境の変化や異常を違和感として検出する。これに対して選択的に注意を向けることで処理すべき情報の抽出を容易にして意志決定のための処理負荷を下げ、神経系の持つ時間遅れを見かけ上低減しているものと思われる。バーチャルリアリティにおける臨場感とはこの世界像・身体イメージが安定で上記の違和感を強く生じないことによってもたらされる感覚であると定義できるだろう。

ではこのように複雑な身体性はどのように獲得されるのだろうか。進化過程への疑問としてはともかく発達過程に対してならばその学習メカニズムとしては見まね学習についての研究がその一端を解き明かしてくれる。見まね学習とは、人が他人の振る舞いを見てまねることによって行動様式を獲得する場合の学習方法である。人

型ロボットの知能的な行動学習の観点から研究が多く成されている [1]. この学習の興味深い点は他人の身体の動きを視覚的に見てその姿から即座に自身の身体の動きを作り出す情報を抽出している点にある. これは身体構造についてある種の逆問題を解いていることに相当する. この見まねの情報処理的な複雑さは言語学習における Motor theory に相当すると考えられる [2]. Motor theory とは鳥 (オウムなど) や人間が音声を認識する際には, 音声を発声する際の筋肉 (Motor) への指令を参照しているという考え方である. 発話時の発声器官の運動の複雑さ, 音声手がかりの認識と対応付けの難しさにもかかわらず, この難問である逆変換を鳥や人間が発達的な過程において誰に教えられともなく身につける学習メカニズムは, 見まね学習と共通するものと考えられる. この学習能力は本稿のテーマである身体性の基であり, 様々な現象において物理環境に対応した世界像や身体イメージを成立させる感覚統合の柔軟性を支えている. この柔軟性は時として自己の身体イメージの拡張や変形をも許容する「超身体感覚」をもたらす. 有名な現象としては, 四肢の喪失に伴って無いはずの肢があるように感じる幻肢や, 後述する Pseudo-Haptic, Rubber-Hand Illusion などがその好例である.

### 3. 前庭感覚インタフェース技術が作り出す超感覚

まずはじめに, 身体イメージに深く関わる平衡感覚に働きかけることでもたらされる超感覚について述べる.

#### 3.1 前庭電気刺激について

筆者らは 2002 年より平衡感覚の変化 (知覚される重力加速度方向の変化) を提示するインタフェース技術の研究を行い [3], 2005 年より, この技術を情報提示だけでなく, 芸術表現やエンターテインメント分野で応用する試みを行っている [4][5]. この技術では, 左右の耳の後ろ (頭部乳様突起部) に電極を装着し, 微弱電流を流す (Galvanic Vestibular Stimulation, 以下 GVS), 装着者は陽極側に自分の身体が傾いたと感じる. この現象を利用し, 微弱電流刺激を歩行中に与えるだけで, 装着者の歩行方向は電流の陽極側に曲がっていく. 従来の装置と比べ, GVS 技術は平衡感覚に対して小型軽量の装置で影響を与えることが可能である.

#### 3.2 前庭刺激による平衡感覚移植体験

平衡感覚や加速度感覚を司る内耳にある前庭器官に対して, GVS 技術は直接刺激を与えることができる. 一方で, 重力方向や加速度を検出する小型センサデバイスが MEMS 技術の進歩により実現されている. GVS 技術によってこの加速度センサ情報と等価な刺激を人間に与

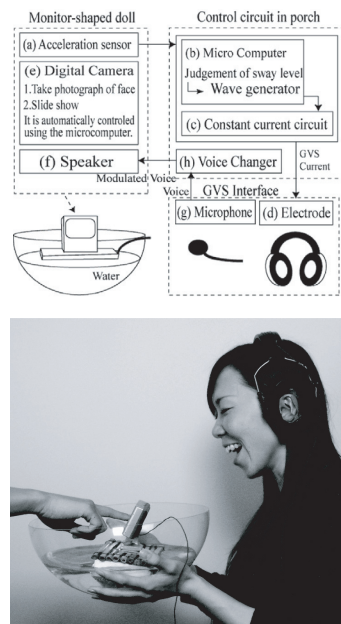


図 1 Save Yourself!!!

えることが可能となる. これは, 身体の外に平衡感覚や加速度感覚の受容器を引き出すことと等価になる. 著者らは加速度センサを水槽に浮かべた小型の人形に取り付け, GVS 装置を装着した人間がこの水槽を持って歩くというデバイスアート作品 “Save Yourself!!!” [5] を構築した (図 1 上にそのシステムの概要を, 図 1 下に実際に使用したデバイスを示す).

平衡感覚という感覚は, 人間が環境を知覚する上で, その座標系を決定する重要な感覚である. そして, その感覚を揺るがすことは, 体験者に大きなインパクトを残すこととなった. VR 的な見方をするとこのシステムは平衡感覚のトレイグジスタンスと言える. ただし, 一般的なトレイグジスタンスが時空間を移動しスケールを変換し, ここではない「どこか」の感覚を伝送することを主眼にしていることに対して, このシステムは体験者自身が保持する人形 (アバタ) に自己を投影する点を強調したトレイグジスタンスである. 感覚伝送の対象が目の前に存在し, 触覚的にそれを保持できるということは, 自身の感覚が投影された対象の存在を実感として理解できる. つまり自分がどこに存在しているかという「身体感覚」そのものを拡張することができたと言える.

#### 3.3 周波数の変化をもたらす知覚の変容

前節のシステムにおいては, 揺れを強く喚起させるために実際の加速度情報をそのまま使用するのではなく加速度の強度に比例した振幅を持つ減衰振動を計算し, この値を前庭刺激量とした. これは, 人形サイズのスケールが体験者に比べて小さいため, 揺れの振動周波数が高

くそのままの信号では身体が揺れるような知覚にならなかったためである。このように、同じ強度の前庭刺激であっても、その効果は周波数によって大きく異なる。著者らは前庭電気刺激の応用において、音楽のテンポに同期した正弦波形の前庭刺激を与えるという試み [4] も行ったが、この場合も 0.5Hz 程度では身体をゆっくり揺らしている感覚が生起し、1.0～3.0Hz 程度では腰、体、頭など体の部位を振っているような感じとなり、周波数が高くなるにつれて腰から頭へと振っていると感じられる部位が移った。さらに、3.0Hz を超えると世界が揺れているような感覚に変容するという内観報告が見られた。これらは、同じ「揺れる」という感覚ではあるがその性質は大きく異なったものであった。おそらく、我々は日常の生活において、身体部位の固有周波数のようなものを潜在的に知っており、感覚入力として同じ前庭感覚を与えても、その周波数に対応した身体感覚が生起したと考えられる。

### 3.4 「思った」よりも「上手く」いつている

さらに筆者らは、前庭電気刺激を多自由度化しており、これを用いて 2 者間の頭部運動追従支援を試みている。具体的には視覚刺激に加え、4 極前庭電気刺激により刺激を与えたときの複合感覚による頭部運動の追従特性を評価する実験を行った。実験では HMD を用いランダムに運動するマーカーを視野の中心に捕らえるように頭部運動追従する課題をしたときに前庭電気刺激がパフォーマンスを向上させることを確認した [6]。ここで特筆すべきことは、内観報告として前庭電気刺激を与えた場合の方が「上手くいつていないと思う」という回答をしたにもかかわらず、パフォーマンスが向上したことである。前庭刺激が潜在的な身体感覚を介して与える支援は、意識に上らない、まさに超身体的、超運動的な効果をもたらすと我々は考えている。

## 4. 身体感覚のずれが触力覚、運動感覚を引き起こす

### 4.1 Pseudo-Haptics と自己身体イメージ

感覚と運動は表裏一体の関係であることは言うまでもないが、この関係性は同一モダリティに限ったことではない。近年、注目されている現象として、視覚刺激のみによって力触覚を生起する Pseudo-Haptics という現象 [7][8] がある。この現象は、対象者の身体運動と同期して動く視覚上の対象物に速度変化を与えることで対象者が力覚を知覚するというものである。我々はこの Pseudo-Haptics が起こる要因として、身体感覚の潜在的な機能が影響していると考えている。その潜在的機能とは、身体運動とその運動によって身体姿勢がどう変化するか予測を行い、常に観測結果と比較していることを指

す。そして、この関係が崩された視覚刺激は、予測と観測の不一致を生むこととなり、結果として、ないはずの力触覚が知覚される現象を生む。例えば、手はなめらかに動いているはずなのに、視覚上の手の映像を不連続に動かすと、手先になにか抵抗を感じる。

身体感覚という観点から見ると、固有感覚など身体姿勢に関する感覚受容器が存在しているところにのみ予測と観測の比較機能が働いているように思えるかもしれないが、実際には自己が意図的に制御できる対象、つまり「自己身体イメージを投影されているもの」であれば同様の機能が働く。例えば、箸を自由に使っているときを考えると、箸には感覚受容器が存在していないが、自分の指先でさわるように箸でつかんだ対象の状況を箸の先に感じ取ることができる。また、文献 [7] では、マウスのカソールにおいて Pseudo-Haptics が起こるわけだが、これも「自己身体イメージを投影されているもの」であるからこの現象が起こると言える。自己身体イメージの投影による身体感覚の拡大・変容機能は身体部位に限らず、その範囲は時間的、空間的な広がりすらみせる超感覚であると言える。

### 4.2 先行 / 遅延する自己身体イメージと Pseudo-Haptics の生起

筆者らは、前節で述べた自己身体イメージの投影範囲について、広がりや遅延がどのように知覚に影響を与えるのか実験を行った。実験システムを図 2 左に示す。実験は暗室で行われ、被験者は鏡を介して提示映像のみを観察でき、自身の手の動きを直接観察できないが、提示映像図 2 右のように自分の手の映像に加え、運動の途中で先行 / 遅延する手先映像が重ね合わされた映像が提示される。先行 / 遅延の速度変化は「減速の後加速」と「加速の後減速」の 2 種類を用いており、さらに、先行 / 遅延の差は映像で 6 フレーム (約 200ms) 条件、12 フレーム (約 400ms) 条件とした。被験者には、自分の手の映像の指先を注視するように指示をし、同時に眼球運動や手先の運動を計測することで、タスクが正確に行われているか確認した。手先の運動は毎回同じ運動のみであるため十分に練習させており、6 フレーム、12 フレームの場合の注視点からの視野的な距離はそれぞれ、7.7deg (中心視野内)、13.5deg (中心視野外) である。つまり、「先行」「遅延」で 2 条件、「減速の後加速」「加速の後減速」で 2 条件、「6 フレーム」「12 フレーム」で 2 条件、その組み合わせは 8 通りである。

その結果、6 フレーム条件では、すべての組み合わせで、Pseudo-Haptics が起きたと答え、12 フレーム条件では、「先行」かつ「減速の後加速」または、「遅延」かつ「加速の後減速」のみで Pseudo-Haptics が起きた。つま

り、中心視野内の範囲においては常に自己身体イメージの投影が行われているが、中心視野外においては常時自己身体イメージの投影が行われているわけではないことがわかった。さらに中心視野内の条件において Pseudo-Haptics が生じた場合には手が重くなった等の内観報告があるのに対して、中心視野外の条件では自己に対しての衝突感を感じるという知覚の性質が異なる興味深い報告を得た。このことは、従来の意味での環境的な世界像と自己の身体イメージとの間に「自己運動との相関については身体と同様の扱いでありながら皮膚の外に属するが故に衝突しうる物」としての「準身体」とでも言える領域（通常は衣類・装身具等が相当する）の運動イメージについても、人間は自己の身体と同様に維持・更新している可能性を示唆するものである。

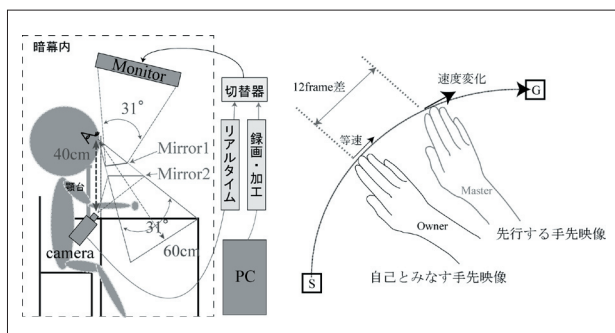


図 2 自己身体イメージと Pseudo-Haptic の生起  
\* 口絵にカラー版掲載

### 5. 人と人の相互作用における超感覚

前章までは世界像（他者を含まない）と自己の身体イメージを用いてその相互作用に関する超感覚について述べた。本章では、自己と他者の身体イメージ間の相互作用から「人らしさ」を感じる超感覚について述べる。人間が機械やロボットと対峙するときそこに「人らしさ」を感じないが、人同士によって作られる相互作用は、機械やロボットが相手のときに作られる相互作用と本質的に異なるものであろうか。つまり相手が人であるときと、機械やロボットのように、人に似た何かはするが人そのものではないときに、人がその「人らしさ」を判断できるなら、いかにしてそれを実現しているのかを明らかにするというのがここでの狙いである。

この課題に対して、我々は一般的には言語的に行われるチューリングテスト [9][10] を非言語的に行うことで、検証実験を行った。実験（図 3）は、2 人の被験者がそれぞれの前に据えられたレールに指を置き、左右に動かすことで行われる。両被験者はバーチャルに空間を共有しており、バーチャル空間内で互いの指が接触すると、振動刺激として知覚される。この環境下で、相手が人であるか、それ以外であるかを判断する。被験者は人同士

がリアルタイムに相互作用をする試行を行うときもあれば、以前に記録した運動が片側の被験者の代わりに再生される試行を行うときもある。一定時間の相互作用後に相手が人であったか、人以外であったのかを 2 肢強制選択で回答する。

結果として、実験を繰り返していくと、2 人の被験者達はそれぞれが人かどうかを判断しているだけにも関わらず、人の言語コミュニケーションに見られるターンテイキング（時間的役割の転換）が振る舞いとして発現する。その際は一人が静止し、その間にもう一人が存在を確認するように振動しながら触るように運動する。この役割は自然と交替し、ターンテイキングが続いていく。相手が記録されている運動を再生しているだけのときには、この役割の転換がスムーズにいかずに相互作用が壊れて、人ではないという判断になった。

この人同士のときに成立するターンテイキングの構造の安定性を調べるために、ノイズの強さをコントロールした実験を行った。ノイズは振動入力 of オン・オフを反転することで与えた（接触時の入力がオフになったり、非接触時にオンになったりする）。この実験では、常に人同士が相互作用を行い、相手が“人である”か“それ以外”と感じるかを常時答えさせた。実験初期のターンテイキング成立直後にノイズをいれると、ノイズの影響でターンテイキングは壊れ両者は相手は人ではないと判断する。その後一旦ノイズの強さを下げ、ターンテイキングの構造を十分に作った後、再び先程と同じ強さのノイズをいれる。すると今度はそのノイズの強さでも構造を安定に保ち続けることができる。さらに、そのままノイズの強さを上げていっても、ターンテイキングの構造は保たれお互いに人であると判断し続ける。つまり、ターンテイキングの構造を作り、お互いにターンテイキングが共有されると、そのターンテイキングの構造の安定性は変わり、より安定になっていく。この安定性の向上は被験者が相互に「人らしさ」という抽象的な概念を確認

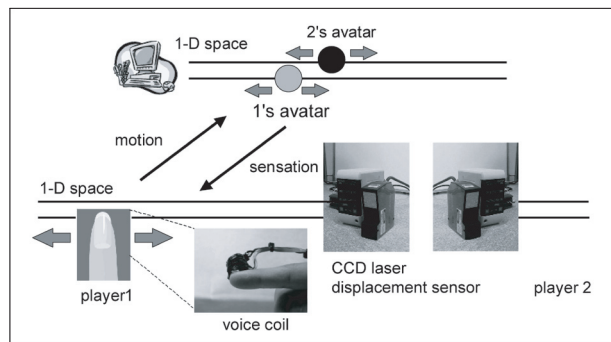


図 3 実験環境  
1 次元上の空間を動き、VR 空間で接触すると指に振動刺激を受ける

していく過程で確信度を共有していく形で実現されている。この共有は人同士が行っているコミュニケーションの萌芽に他ならない。実験では、運動は左右方向の移動のみであり、感覚は単なる振動の有無のみである。ターンテイキングが生じるまでの運動は被験者にとっては世界を探索するための単なる運動だが、一旦相手と相互に絡み合うことによってターンテイキングという構造を作ると、それが共有されることでお互いに人であるという感覚が生まれる。この共有こそが人におけるコミュニケーションであり、単なる物理世界との相互作用とは異なる人同士の間で成立する超感覚であると言える。

ではこのような行動様式が何故成立するのかといえばこれもまた身体性のためである。例えばターンテイキングにおいては暗黙のうちに互いのターンの長さやターンの交代時間を決めていたが、この時間幅を双方が妥当であると考えられる理由は恐らくは人間の身体にとっての自発運動の継続時間と運動の切り替えに要する代表的な時間幅として身体性が与えている拘束条件であると考えられる。

## 6. おわりに

本稿では身体性に基づいた「身体の枠を超える感覚」としての「超身体性」について紹介し、運動を含む複合的な感覚の統合がもたらす身体性の知見とその認識とは何かについて我々の見解に基づいた解説を加えさせてもらった。解釈自体に未だ諸説ある「身体性」なれど、VRから人の応答を考える観点としては「臨場感」を支える概念として今後も追いかけるに値する研究テーマで有り続けるものと思われる。

## 参考文献

- [1] T. Inamura, I. Toshima and Y. Nakamura: Acquisition and embodiment of motion elements in closed mimesis loop, In the Proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics & Automation, pp.1539-1544 (2002)
- [2] Lieberman, P.,: Primate vocalizations and human linguistic ability, Journal of the Acoustical Society of America 44, pp.1157-1164 (1968)
- [3] 安藤英由樹, 渡邊淳司, 杉本麻樹, 前田太郎: 前庭感覚インタフェース技術の理論と応用, 情報処理学会論文誌, Vol. 48, No. 3, pp. 1326-1335 (2007)
- [4] Taro Maeda, Hideyuki Ando, Tomohiro Amemiya, Masahiko Inami, Naohisa Nagaya, Maki Sugimoto: Shaking The World: Galvanic Vestibular Stimulation As A Novel Sensation Interface, ACM SIGGRAPH 2005, Emerging Technologies (2005)
- [5] 安藤英由樹, 吉田知史, 前田太郎, 渡邊淳司: Save Yourself !!! - 前庭刺激による平衡感覚移植体験, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.12, No.3, pp. 225-232 (2007)
- [6] 加藤, 濱田, 宮田, 北原, 安藤, 前田: 視覚刺激と前庭刺激を用いた頭部運動追従の特性評価, 第13回日本バーチャルリアリティ学会大会 (2008)
- [7] Anatole Lecuyer, Jean-Marie Burkhardt, Laurent, Etienne: Feeling Bumps and Holes without a Haptics, Interface: the Perception of Pseudo-Haptic Textures, ACM SIGCHI (2004)
- [8] Andreas Pusch, Olivier Martin, Sabine Coquillart: HEMP hand-displacement-based pseudo-haptics: A study of a force field application and a behavioural analysis, International Journal of Human-Computer Studies, Volume 67, Issue 3, pp256-268 (2009)
- [9] 西垣通: 思想としてのパソコン, NTT 出版 (1997)
- [10] Turing, A.M.: Computing machinery and intelligence. Mind, 59, pp.433-460 (1950)

この研究の一部は、大阪大学のグローバル COE プログラム「アンビエント情報社会基盤創成拠点」、JST CREST「先進的統合センシング技術」の研究助成による。

## 【略歴】

前田太郎 (MAEDA Taro)

大阪大学大学院情報科学研究科 教授

1987年東京大学工学部卒業, 同年通産省工業技術院機械技術研究所に入所. 1992年東京大学先端科学技術センター助手, 1994年東京大学より博士(工学)を授与. 1997年同工学部講師, 2003年NTTコミュニケーション科学基礎研究所主幹研究員. 2007年より現職. 専門は人間情報工学, 感覚伝送デバイス, パラサイトヒューマン.

安藤英由樹 (ANDO Hideyuki)

大阪大学大学院情報科学研究科 准教授

1999年愛知工業大学工学研究科修士課程修了, 同年同研究科博士課程その後中退. 2000年理研BMC JRA 配属. 01年東京大学情報学環にてJST「協調と制御」研究員. 02年よりNTT CS 研, 同研究員, RA, RSを経て, 2008年より現職. 2004年東京大学より博士(情報理工学)を授与. 専門は錯覚応用工学, ヒューマンインタフェース, インタラクティブ・アート.

飯塚博幸 (IIZUKA Hiroyuki)

大阪大学大学院情報科学研究科 助教

2001年北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻修士課程修了, 2004年東京大学総合文化研究科広域科学専攻博士課程修了. 2008年より現職. 専門は人工生命, 複雑系科学.