

特集 ■ アンドロイドやエージェントに感じる人の存在感

ヒトが感じるヒトの存在感

ーバイオリジカルモーションとその周辺ー



平井真洋

生理学研究所 / 日本学術振興会特別研究員

HIRAI MASAHIRO

1. はじめに

近年のロボティクスの発展には目をみはるものがある。特に石黒らの開発したアンドロイドロボットは、一見するともはやそれはロボットではなく、私たちと同じ「ヒト」ではないかと錯覚してしまう。このようにロボットとヒトの境界が曖昧になりつつある現在において、私たちヒトが感じるヒトの存在感について科学的に考察する必要があるだろう。本稿では、ヒトの存在感を「動き」と「見かけ」といった二つの切り口から概観し、前半では我々が生得的に備えているとされる生物らしい動きに対する検出メカニズムについてこれまでの研究を概観する。後半では「見かけ」の影響、更に「動き」との相互作用、そしてそれらの知見に基づいたロボットの設計原理について言及したい。

2. “バイオリジカルモーション” 検出器

残業が終わり街頭の無い夜道を歩いているとき、月明かりに照らされてこちらに向かって歩いている人が見える。顔や服装はほとんど判らないのだが、わずかに見えるその動きからこちらに向かって歩いてくる相手が男性か女性か、あるいは若者かそうでないかはなんとなくわかる、といった経験をされたことはないだろうか？

実際、この経験は正しい。私たちは「動き」のみの手がかりから非常に豊かな情報を読み取ることができることが古くから知られている。これは、30年ほど前 Johansson によって報告されたバイオリジカルモーション [1] と呼ばれる知覚現象であり (例えば図 1, <http://www.biomotionlab.ca/Demos/BMLwalker.html>), わずか数十個の光点運動のみからヒトの運動を「見る」ことができる。近年では、国内外の研究室によってその知覚特性、またはその知覚処理の神経メカニズム、さらには社会性

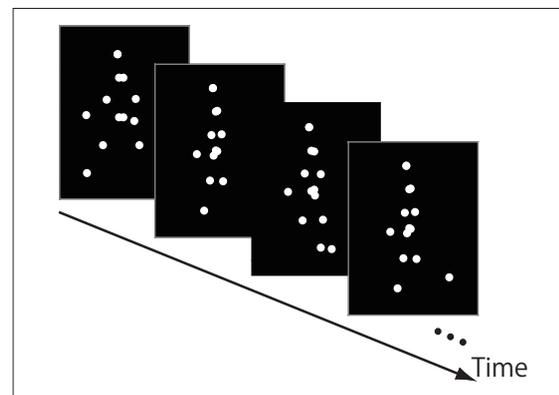


図1 バイオリジカルモーションの一例

との係わり合いなどが精力的に調べられている。

さて、このように計測された光点運動のみを提示することによって、我々はどうのような情報を読み取ることができるだろうか？これまでの数多くの心理実験の報告によれば、性別 [2], 運動カテゴリ [3], 感情, 知人かそうでないか [4], どのぐらいの荷物を持っているか [5] など、きわめて豊かな情報を知覚することが可能である。最近の研究では、二人の有意な相互作用の光点運動をノイズに埋め込んで提示した場合、そうではない相互作用の光点運動を提示した場合と比較して、検出成績が有意に向上したとの報告がある [6]。このように私たちは、動きの情報からでもヒトの動きを同定可能な上、感情、意図など非常に豊かな情報を抽出することが可能なことをこれまでの心理実験の結果は示している。

さて、ではこのような「生物的な運動」の検出メカニズムはどうのようなシステムにより実現されているのだろうか？このメカニズムを我々は生得的に備えているのであろうか？また、もしそのメカニズムが発達的に変化するとしたら、どのような過程を経るのであろうか？

発達心理学の研究は、この「生物的な運動」の検出器が生得的であるかどうかについて一つの答えを示している。1980年代、Foxら、および Bertenthal らの一連の研究[7-10]は生後3ヶ月およびそれ以降の乳児において、正立のヒト歩行光点運動とそうではない光点運動を弁別可能であることを示した。ところが驚くべきことに、生後2日の新生児であっても正立のヒト歩行光点運動とそうではない光点運動を弁別できることが近年報告されている[11]。また児童期にかけても検出のメカニズムは変化し、例えばノイズに埋め込まれていないバイオリジカルモーションの検出課題では、5歳児においてほぼ成人と同様の成績を示すが[12]、ノイズに埋め込まれたバイオリジカルモーションの検出課題では9歳になりようやく成人の成績に近くなる[13]という報告もある。これらの知見は少なくとも我々の脳に予め「生物的な運動」を検出するメカニズムが備わっているが、検出のメカニズムは児童期においても発達に伴い変化することを示唆するものである。

3. バイオリジカルモーション知覚処理の階層メカニズム

前節では、光点運動のみからでも性別、感情などきわめて豊かな情報を抽出可能であり、その検出メカニズムは生得的に備えている可能性を示した。では、このような知覚メカニズムはどのような処理機構によって支えられているのだろうか。

バイオリジカルモーションの刺激を見てみると、確かに全体の光点運動からヒトの運動を知覚することが可能であるが、各光点運動からでも「生物らしさ」を知覚することは可能である。近年、Trojeはバイオリジカルモーションの知覚には階層的な処理が存在するのではないかと、この仮説を提唱している[14]。彼のモデルによればバイオリジカルモーションの知覚処理には少なくとも四つの階層があるとしている。一つは「life detector」階層であり、これは一つの光点運動から生物らしさを感じるレベルである。二つ目は「structure-from-motion」階層であり、各光点運動を統合しヒトの形を抽出するレベルである。三つ目は「action recognition」階層であり、structure-from-motion階層で抽出されたヒトの形から運動を認識する階層である。四つ目は「style recognition」階層であり、感情や意図などの認識に関する処理が行われるとしている。

特に一番目の life detection 階層では、その存在を示唆する知見がある。生後4日の乳児を対象とした実験では、単一の光点運動が非周期的(生物らしい運動)・周期的(生

物らしくない運動)かの2種類の運動を提示した際に、すでに非周期的な運動に対して選好があったと報告している[15]。また、最近の行動実験によっても局所的な運動から生物らしさを知覚するという報告が示されている[16]。このようにバイオリジカルモーション知覚処理は大きく分けて local vs. global といった二つの階層処理として捉えることもできよう。それでは、果たして、このような階層処理は脳内に存在するのであるだろうか？

4. バイオリジカルモーション知覚処理の神経メカニズム

過去10年、バイオリジカルモーション知覚処理の神経メカニズムを明らかにする試みが特に fMRI (機能的磁気共鳴画像)を用いて進められており、その知見が蓄積している。これらの報告によると、バイオリジカルモーションを提示した際には、特に上側頭溝 (Superior temporal sulcus, 以下 STS, 図 2A) と呼ばれる領域が特異的に活動することが一貫して報告されている(例えば[17])。それ以外にも小脳、扁桃核、運動前野など複数の脳領域の活動が報告されているが[18]、STSの活動はどの研究においても見られる。また、経頭蓋磁気刺激装置によって STS 付近の活動を抑制した場合はバイオリジカルモーションの検出が低下するとの報告もあり[19]、STSがバイオリジカルモーション知覚処理にとって重要である可能性は高い。

さて、この STS は脳のどの領域にあるのだろうか？ヒトの視覚系にはおおまかに言って、それぞれ色・形態処理をつかさどる腹側経路と運動処理をつかさどる背側経路の2種類あるとされており、STSはその合流点であるとされている。STSはこのように視覚処理の中でも高次の領域であるだけでなく、興味深いことに、近年の報告によって、視線、表情、体の動き、意図の検出など社会的に関係した刺激によって活動することが多数報告されており、「社会的知覚」処理システムの一つであることが示されている[20]。また、STSは視覚刺激だけに限らず、ヒトの運動に関連した聴覚刺激においても活動することが示されている。例えば、ヒトの足音を聞かせた場合、STS 付近の活動が増加することが報告[21]されており、感覚モダリティによらない、他者の行為に関連した処理を行う部位である可能性も十分考えられる。

では、その処理の時間的動態はどのようなになっているのだろうか？実際、バイオリジカルモーションを提示されるとすぐに私たちはどのような運動であるかを知覚することが可能であることから、バイオリジカルモーションは我々の脳内において高速に処理されている可能

性が考えられる。

そこで著者らは事象関連電位計測法を用いることにより、その処理の時間的側面を明らかにした。事象関連電位法とは、頭皮上に装着した電極から事象に関連した神経活動の電位変化をミリ秒単位で計測する手法である。実験では、光点運動からヒト歩行運動が知覚可能なバイオロジカルモーション刺激と、統制刺激として、各光点の速度ベクトルは同一であるが、光点の初期位置をランダム化したスクランブルモーション刺激を提示し、両者の神経活動を比較した [22]。その結果、バイオロジカルモーションを提示した際には刺激提示後約 200 ミリ秒後および 240 - 400 ミリ秒後に二つの事象関連電位成分を計測した (図 2B)。特に両成分とも、スクランブルモーション刺激よりもバイオロジカルモーション刺激条件で増大した。著者らのその後の実験により [23]、歩行運動以外 (具体的にはゴルフのスイングの光点運動刺激) でも同様の二つの事象関連電位成分を検出し、特に初期成分は局所的な運動情報にセンシティブであること、また、後期成分は大域的な運動パターン情報にセンシティブであることが判明した。これらより、バイオロジカルモーション知覚処理には少なくとも二つの処理過程が関与していること、具体的には、局所的な運動処理が刺激提示後 200 ミリ秒付近で行われ、その後大域的な運動処理が刺激提示後 400 ミリ秒付近で行われる可能性を示した。

筆者らの結果は、Troje が提案しているバイオロジカルモーション知覚処理における階層メカニズムと整合性が良いと思われる。近年、Peuskens らはこのような階層処理のメカニズムを実際の神経部位に対応付けて議論している。具体的には、MT/V5 野において複雑な運動パターンを解析し、さらに下側頭回においてヒトの形に関する情報を処理する。その後、両部位からの出力が STS

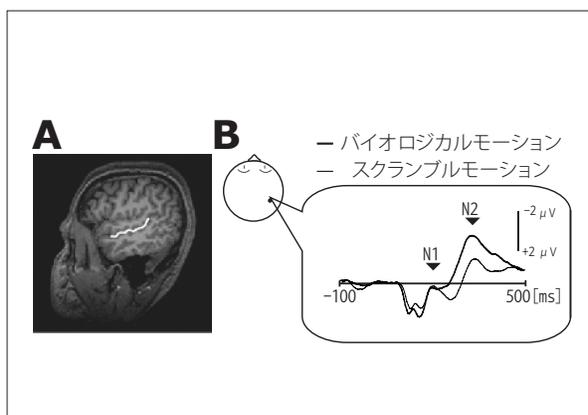


図 2 (A) STS (B) 事象関連電位計測による実験結果 [22]

に入力され、ヒトの行為に関する情報が処理されるのではないかと提案している [24]。したがって、著者らの知見と照らし合わせると、局所的な運動パターンは刺激提示後 200 ミリ秒後に、大域的な運動パターンは刺激提示後 400 ミリ秒後に処理されているのかもしれない。

5. ロボットとヒトに対する異なる処理

さて、このように生物らしい運動の検出メカニズムが我々の脳内に確かに存在し、その情報は迅速に処理される可能性のあることがわかってきた。では、当初の問題に戻り、ヒトの運動とロボットの運動は脳内においてどのように処理されているかについて考えていくことにしよう。

ヒトとロボットの運動が脳活動に与える影響を調べた研究は近年増えつつある。例えば Pelphrey の実験によれば、CG により作成された正立のヒト・ロボット歩行、振り子時計、ロボットの関節をはずした運動の 4 種類を提示した際の脳活動を調べた場合、STS の活動はヒト・ロボット条件で振り子時計条件よりも増大した [25]。これは STS の活動が外見によらずバイオロジカルモーションそれ自体により活動していることを示唆するものである。一方、Tai らは、ロボットがリーチングする映像とヒトがリーチングする映像を提示した際の脳活動を計測し、その差分を調べた [26]。その結果、左運動前野における活動がヒト条件のほうがロボット条件よりも有意に増加することを示したが、STS 付近での活動に差は見られなかった。これらの知見は STS の活動は見かけの影響を受けないことを示唆している。では、外見の影響は本当はないのだろうか？そこで筆者らはバイオロジカルモーション知覚処理における見かけの影響を調べるため、異なる外見をもつ物体 (ヒト、ロボット、光点) に対して同一の歩行運動する CG を作成し、それらを正立および倒立して提示した際の倒立効果を事象関連電位計測することにより検討した [27] (図 3A)。事象関連電位における倒立効果とは、顔および身体に特徴的に見られる陰性成分の振幅が正立条件よりも倒立条件で大きく、かつ潜時が正立条件よりも倒立条件で長いことにより特徴付けられる。先行研究により、ヒト身体においては倒立効果が生じるが、靴や家などのオブジェクトでは倒立効果が生じないとの報告がされている [28]。したがって、もしロボットの身体がヒト身体と同様に処理されているのであれば、倒立効果が生じるであろうが、オブジェクトのような処理がされているとしたら、倒立効果が生じないであろう、

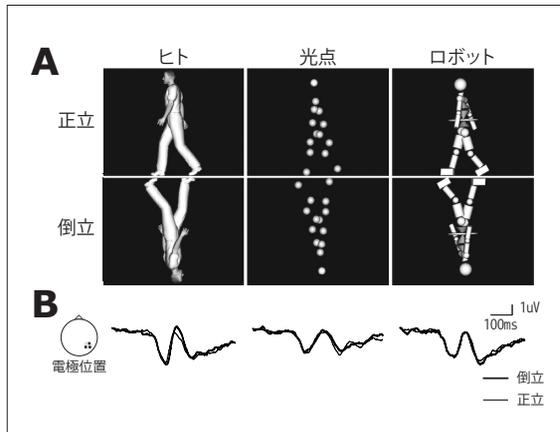


図3 (A) 実験刺激 (B) ヒト, 光点, ロボットに対する事象関連電位
太い線が倒立条件を, 細い線が正立条件を表している
* 口絵にカラー版掲載

という仮説を立て検証した。その結果、ヒト歩行運動では、倒立効果が認められたが、ロボット歩行運動においては倒立効果が認められなかった(図3B)。全条件において、運動情報は同一であるので、倒立効果に影響を与えた要因は「見かけ」情報である可能性が考えられる。これは運動情報だけでなく、「見かけ」情報も生物らしさの知覚には重要な役割を担っていることを示唆する知見であろう。

さらに、ヒトとロボットの運動知覚の処理の違いは行為にも影響を与えることが報告されている。例えば Kilner らは、被験者の腕振り運動が観察する相手がヒトかロボットかによって影響を受けると報告している [29]。具体的には、相手(ヒトあるいはロボット)が垂直方向に腕振り運動をした場合、被験者には水平方向に腕振り運動をしてもらう。腕の運動の軌跡をモーションキャプチャ装置により記録し、その運動のばらつき、すなわち、上記の例であれば被験者の垂直方向の運動の分散を計算し、指標とした。その結果、相手がヒトである場合はロボットである場合よりも有意に分散が増大することが示された。その後、Kilner らは速度の与える影響を検討した [30]。実験では、2種類の運動条件(生物的な運動、一定速度)と2種類の外見条件(ヒト、ボール)の要因を組み合わせ、先と同様に観察した運動によって腕振り運動の軌跡の分散がどのように影響されるかを調べた。結果、ヒトの外見条件では生物的な運動を観察した場合にのみ腕振り運動が影響されたが、ボール運動を観察した場合には、両方の速度条件で腕振り運動に影響が見られた。つまりこれらの実験結果は「見かけ」と「運動」の違いが視覚系にとどま

らず、運動系に影響を及ぼすこと、更には対象の「見かけ」によって腕振り運動に作用する運動の種類が限定されることを示すものと考えられる。

6. ロボットがヒトらしくなるための設計原理

このように、「動き」のみからでも生物らしさを感じること、また「見かけ」と「動き」も相互に影響を与えること、そして「見かけ」が生成可能な「動き」を制約する可能性があることがわかった。では、これらの研究成果をロボットの設計原理に適用することは可能であろうか? 現時点において、筆者は時期尚早のように考えるが、これまでの知見から考察してみたい。

前節に挙げたように、対象の「見かけ」によって、生じる「運動」に制約がかかる可能性は十分ありえる。さらに、「見かけ」によって生じるであろうと期待される運動が生じなかったとき、我々はその対象に違和感を覚えてしまうかもしれない。例えば、「見かけ」が極めてヒトに近いロボットの場合(石黒らのアンドロイドロボット)、我々のロボットに対する動きの敏感さは非常に高いものとなる一方、工業用ロボットでは、動きに対してそれほど敏感ではないのかもしれない。したがって、これを利用し、ロボットの制御系が生成可能な運動に基づいて「見かけ」を実装することで、違和感のないロボットを設計することは可能ではないだろうか。

森により、不気味の谷現象が提案されている [31]。これはロボットがあまりにもヒトに似すぎた場合、親近感が負になるとされる仮説である。ロボットがどれだけヒトに似ているかを決定する要因は「見かけ」のほかに「動き」もあり得るだろう。例えば、我々は見かけが極めてヒトに近い場合、わずかな動きの不自然さでも検知し、不気味さを覚えてしまうだろう。一方、見かけがロボットらしい場合、運動のぎこちなさはそれほど気にならず、むしろ「可愛い」といった印象を持つかもしれない。

「見かけ」と「動き」をうまく制御することによって我々ヒトにとって親和性の高いロボットを開発することが可能であると思われるが、まずは我々の「見かけ」と「動き」に対する知覚特性について心理学、脳科学など複数の研究領域からの研究により明らかにする必要があるだろう。

参考文献

- [1] Johansson G: Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Percept Psychophys*, 14, pp.201-211 (1973)
- [2] Kozlowski LT, Cutting JE: Recognizing the sex of a walker from

- a dynamic point-light display. *Percept Psychophys*, 21, pp.575-580 (1977)
- [3] Dittrich WH: Action categories and the perception of biological motion. *Perception*, 22 (1), pp.15-22 (1993)
- [4] Cutting JE, Kozlowski LT: Recognition of friends by their walk. *Bull Psychonom Soc*, 9, pp.353-356 (1977)
- [5] Runeson S, Frykholm G: Visual perception of lifted weight. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 7 (4), pp.733-740 (1981)
- [6] Neri P, Luu JY, Levi DM: Meaningful interactions can enhance visual discrimination of human agents. *Nat Neurosci*, 9 (9), pp.1186-1192 (2006)
- [7] Fox R, McDaniel C: The perception of biological motion by human infants. *Science*, 218 (4571), pp.486-487 (1982)
- [8] Bertenthal BI, Proffitt DR, Kramer SJ: Perception of biomechanical motions by infants - Implementation of various processing constraints. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 13, pp.577-585 (1987)
- [9] Bertenthal BI, Proffitt DR, Kramer SJ, Spetner NB: Infants' encoding of kinetic displays varying in relative coherence. *Dev Psychol*, 23, pp.171-178 (1987)
- [10] Bertenthal BI, Proffitt DR, Spetner NB: Infant sensitivity to figural coherence in biomechanical motions. *J Exp Child Psychol*, 37, pp.213-230 (1984)
- [11] Simion F, Regolin L, Bulf H: A predisposition for biological motion in the newborn baby. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 105 (2), pp.809-813 (2008)
- [12] Pavlova M, Krageloh-Mann I, Sokolov A, Birbaumer N: Recognition of point-light biological motion displays by young children. *Perception*, 30 (8), pp.925-933 (2001)
- [13] Freire A, Lewis TL, Maurer D, Blake R: The development of sensitivity to biological motion in noise. *Perception* 35 (5), pp. 647-657 (2006)
- [14] Troje NF: Biological motion perception. In *The senses: A comprehensive references*. Edited by Allan Basbaum et al. ABe: Elsevier; pp.231-238 (2008)
- [15] Meary D, Kitromilides E, Mazens K, Graff C, Gentaz E: Four-day-old human neonates look longer at non-biological motions of a single point-of-light. *PLoS ONE*, 2(1), e186 (2007)
- [16] Chang DHF, Troje NF: Perception of animacy and direction from local biological motion signals. *J Vis*, 8 (5), pp.1-10 (2008)
- [17] Grossman E, Donnelly M, Price R, Pickens D, Morgan V, Neighbor G, Blake R: Brain areas involved in perception of biological motion. *J Cogn Neurosci*, 12 (5), pp.711-720 (2000)
- [18] Saygin AP, Wilson SM, Hagler DJ, Jr., Bates E, Sereno MI: Point-light biological motion perception activates human premotor cortex. *J Neurosci*, 24 (27), pp.6181-6188 (2004)
- [19] Grossman ED, Battelli L, Pascual-Leone A: Repetitive TMS over posterior STS disrupts perception of biological motion. *Vision Res*, 45 (22), pp.2847-2853 (2005)
- [20] Allison T, Puce A, McCarthy G: Social perception from visual cues: role of the STS region. *Trends Cogn Sci*, 4 (7), pp.267-278 (2000)
- [21] Bidet-Caulet A, Voisin J, Bertrand O, Fonlupt P: Listening to a walking human activates the temporal biological motion area. *NeuroImage*, 28, pp.132-139 (2005)
- [22] Hirai M, Fukushima H, Hiraki K: An event-related potentials study of biological motion perception in humans. *Neurosci Lett*, 344 (1), pp.41-44 (2003)
- [23] Hirai M, Kakigi R: Differential cortical processing of local and global motion information in biological motion: an event-related potential study. *J Vis*, 8 (16), pp.1-17 (2008)
- [24] Peuskens H, Vanrie J, Verfaillie K, Orban GA: Specificity of regions processing biological motion. *Eur J Neurosci*, 21 (10), pp.2864-2875 (2005)
- [25] Pelphrey KA, Morris JP, McCarthy G: Neural basis of eye gaze processing deficits in autism. *Brain*, 128 (5), pp.1038-1048 (2005)
- [26] Tai YF, Scherfler C, Brooks DJ, Sawamoto N, Castiello U: The human premotor cortex is 'mirror' only for biological actions. *Curr Biol*, 14 (2), pp.117-120 (2004)
- [27] Hirai M, Hiraki K: Differential neural responses to humans vs. robots: an event-related potential study. *Brain Res*, 1165, pp.105-115 (2007)
- [28] Stekelenburg JJ, de Gelder B: The neural correlates of perceiving human bodies: an ERP study on the body-inversion effect. *Neuroreport*, 15 (5), pp.777-780 (2004)
- [29] Kilner JM, Paulignan Y, Blakemore SJ: An interference effect of observed biological movement on action. *Curr Biol*, 13 (6), pp.522-525 (2003)
- [30] Kilner J, Hamilton AF, Blakemore S-J: Interference effect of observed human movement on action is due to velocity profile of biological motion. *Soc Neurosci*, 2 (3-4), pp.158-166 (2007)
- [31] 森政弘: 不気味の谷, *Energy*, VOL. 7, NO.4, pp.33-35 (1970)

【略歴】

平井真洋 (HIRAI Masahiro)

日本学術振興会特別研究員

2005年東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻博士課程修了。博士(学術)。2005年東京大学21世紀COE「心とことば - 進化認知科学的展開」研究拠点形成特任研究員を経て2006年4月から現職。専門は発達認知神経科学。