

生物らしさの知覚に伴う脳活動

— 実際の生物とロボットを用いて —

Brain activity of animacy perception

- An ERP study using real animate thing and robot -

福田玄明¹ 植田一博^{1,2}

Haruaki Fukuda¹ and Kazuhiro Ueda²

¹ 東京大学大学院総合文化研究科

¹ Department of General System Studies, The University of Tokyo

² 東京大学大学院情報学環・学際情報学部

² Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo

Abstract: We can discriminate between animate and inanimate things. This ability is called animacy perception. Animacy perception is thought to be a foundation of social cognition. We investigated the neural mechanism working for animacy perception by recording Event-Related brain Potentials (ERPs) during reaching action. Participants were asked to observe a moving object, either of an animate thing (turtle) or an inanimate thing (robot). We compared ERPs between the condition they were reaching to animate thing with the condition they were reaching to inanimate thing. As a result, we found that the amplitude of ERPs in left infero-frontal region was significantly different between the two conditions. Moreover, additional spectral analysis showed that mu suppression might occur when participants felt the object as animate. These findings suggest the possibility that 'Mirror System' serves as a foundation of the attribution of animacy perception.

はじめに

ふとした瞬間に「なにかいる」と感じることもある。このとき、「いる」と感じる対象が「なに」であるかはわかっていないにもかかわらず、「いる」という、通常、生き物の行動にのみ用いられる単語を用いて表現される。このような日常体験は、対象が「なに」であるかの判断と「生き物」であるかの判断がそれぞれ独立である可能性を示している。つまり、我々は対象が何であるかという情報をもとに、生き物であるかを判断しているわけではない。元々、ある対象が真に生物であるかどうかを正確に知ることはできない。にもかかわらず、我々は生物と非生物を区別し、異なる様式で接している。このように我々の生物/非生物の判断は曖昧で不完全であり、ヒューリスティック的であると考えられる。このヒューリスティックを知ることで、人工物に生物らしさを与え、接する人との社会的なインタラクションが可能となるかもしれない。そこで、どのような対象を、

どのようなメカニズムで生物らしいと我々が感じるのか、これを認知神経科学的手法により検討することで、生物らしい、もしくは生物らしさを感じさせる人工物の実現のための基礎を与えることが本研究の目的である。

生物らしさの知覚と社会的認知

生物らしさの知覚はアニマシー知覚と呼ばれ、古くから研究されてきた [1]。アニマシー知覚に関する最初の研究の一つであり、その後のアニマシー知覚研究に大きな影響を与えた研究として Heider and Simmel [2] の研究が挙げられる。Heider and Simmel [2] は、運動する幾何学図形を刺激として用い、たとえ対象が単なる幾何学図形であっても、その運動によって観察者はそれがあたかも生き物であるかのように見なすことを明らかにした。彼らの実験で用いられたアニメーション (図 1) を説明するように求められた実験参加者たちは、単なる三角形を擬人化し、その運動を意図や感情に関連した言葉 (追い

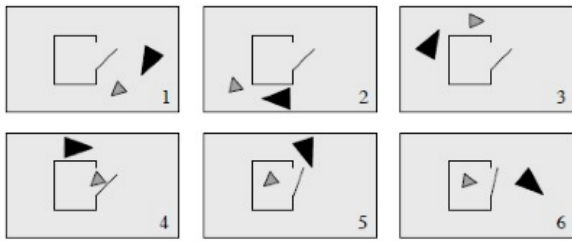


図 1. Heider and Simmel [2] において用いられたアニメーションを示す。Scassellati, 2001 [33]より

かける、攻撃するなど) を使って説明した。このように、明らかに生物ではない対象にもアニメーションが感じられることが知られている[3-5].

アニメーション知覚は対象を意図や感情を持ったものと見なし、社会的な対象として知覚する能力であることから社会性認知の一種と考えられている。Michotte [6] は、2つの運動する幾何学図形のみからでもアニメーション知覚が成立することから、アニメーション知覚は最も単純な刺激によって引き起こされる社会的認知であると考えた。

また、アニメーション知覚は、社会的認知の生得性、モジュール性に関連され議論されることも多い。Premack and Premack [7] は、ヒトは、他者を心を持った対象とみなし、他者が自分自身の意図や感情に基づいて行動していると感じることが生得的に可能なので、そのための神経基盤を持っているのではないかと議論している。特に、他者に意図や感情を帰属する能力は心の理論との関連が指摘されることから、近年活発に研究されるようになってきている。心の理論とは、他者の心の働きを推測し、他者が自分とは異なる信念を持っていることを理解する能力で、我々の社会的能力にとって重要な能力である。Baron-Cohen [8] によると、心の理論は、視線検出器、意図検出器と共同注意機構、心の理論機構からなる下位メカニズムから構成されているという。Frith and Frith [9] は、心の理論は進化過程で獲得されたものとした上で、心の理論の基礎となる能力として、生物と非生物を区別する能力、他者の視線方向を知る能力、目標志向的な行動を理解する能力、それに自己と他者の行動を区別する能力を挙げている。Baron-Cohen [8] が、その著書において、代表的なアニメーション(図 1)を引用して意図検出器の機能を説明したことや、Frith and Frith [9] が生物と非生物を見分ける能力を心の理論の基礎となる能力として挙げていることから、アニメーション知覚が心の理論に深く関係していると考えられる。このようにアニメーション知覚は我々の社会的認知において重要な役割を

担っていると考えられており、アニメーション知覚の脳内メカニズムを調べることは我々の社会性認知の基盤を知るためにも重要だと考えられる。

アニメーション知覚の脳内基盤

上述したとおり、社会性認知に関連する特定の脳内モジュールの存在が想定されており、また、実際に脳機能計測を用いた先行研究でも特定の脳活動がアニメーション知覚と対応することが示されている。

先行研究では、アニメーション知覚に関する脳内基盤の候補の一つとしてミラーシステムが挙げられている [10]. ミラーシステムは、自分自身の行動プログラムを用いてシミュレーションすることで他者の行動を理解する部位であり、模倣や他者理解において重要な役割を担っていると考えられている [11]. 多くの脳機能計測の結果は、ミラーシステムの活動が、他者の行動や運動を観察し、意図や感情を理解する際に起こることを示している [12, 13]. Tai, Scherfler, Brooks, Sawamoto & Castiello [14] は、実際のロボットの行動を観察する際の脳活動と人の行動を観察する際の脳活動をポジトロン断層法 (PET) で計測し、比較した。その結果、人の行動を観察する際にのみミラーシステムの賦活が見られたため、ミラーシステムは生物に対して選択的に活動するのではないかと述べている。

またミラーシステムの特性は、運動干渉 (movement interference) と呼ばれる現象によって調べられている。運動干渉とは Kilner, Paulignan, and Blakemore [15] が報告した現象で、ミラーシステムが自己の運動と他者の運動を同時にコードしているために、同時に観察する他者の運動が自己の運動に混ざる現象である。Kilner et al. [15] は、水平に腕を動かす運動を行っているときに垂直に腕を動かす他者の運動を観察すると、他者の運動を観察しない場合に比べて、腕の水平運動に含まれる垂直方向の運動成分が強くなることを報告した。さらに、彼らは運動するロボットアームあるいは人を観察しながら、実験参加者にそれらの運動とは異なる行動をするよう求めた。実験参加者が人の運動を観察する場合には運動干渉が見られたが、ロボットアームの運動を観察する場合には運動干渉は起こらなかった。このことから、ミラーシステムは人の運動に対してしか賦活しないのではないかと結論している。

また、運動干渉と同様のメカニズムで説明される運動促進 (facilitation of movement initiation) と呼ばれる観察した他者の行動と同じ行動が促進される現象においても、ロボットなどの人工的な見た目の対象に対しては運動促進が起こらないことが報告されている [16].

一方で、ロボットなどの人工的な対象を観察する際においてもミラーシステムが賦活することを報告する研究もある。Kilner, Hamilton, and Blakemore [17] は、対象の見た目と運動の両方が運動干渉に影響を与えることを示している。

また、Oberman, McCleery, Ramachandran, and Pineda [18] は、CG でつくられたロボットアームのリーチング行動と人の腕のリーチング行動を観察する際の運動野のミュー波減衰を測定した。ミュー波減衰とは、ミラーシステムが活動する際に、運動野においてニューバンド (8Hz-13Hz) の周波数帯域が減衰する現象 [19] を指しており、ミラーシステムの活動の指標となると考えられている。結果は、どちらの条件でもミュー波減衰は起こっており、人の CG を観察する場合とロボットの CG を観察する場合でのミュー波の減衰量には差が見られなかった。この結果は観察対象が人でもロボットでも同じようにミラーシステムが賦活する可能性を示している。

さらに Oztop, Franklin, Chaminade, and Cheng [20] は、ロボットアームをヒューマノイドロボットに替えて Kilner et al. [15] と同様の実験を行ない、ロボットの運動を観察する場合でも十分に運動干渉が起こることを示した。Engel, Burke, Fiehler, Bien, and Rosler [21] は、人の手の動きを模した運動をする幾何学図形と、同じ動きをする人の手を観察する際のミラーシステムの活動を fMRI により計測し、比較した。その結果、幾何学図形を観察する際であっても、ミラーシステムの活動が見られることがわかった。

これらの研究は、ミラーシステムの活動が生物に対する選択性を持っていることを示唆している一方で、これを否定する研究も存在し、統一見解は得られていない。

本研究の目的

アニメーション知覚の脳内基盤を検討することが本研究の目的である。本研究では、すべての実験において実物の対象を用いることとした。実物の対象を用いることは、アニメーション知覚が社会認知の一種であることを考えると重要だと考えられる。Shimada and Hiraki [22] は、テレビに映った人の行動を観察する際よりも実際の人の行動を観察する際の方がミラーシステムの活動が強くなることを報告し、我々の脳は実物の対象とヴァーチャルな対象とでは異なった反応をするのではないかと議論している。また、Nowak and Biocca [23] は、対象の存在感がアニメーションに影響することを報告している。これらを踏まえると、アニメーション知覚の研究には実物の対象を用いる必要があると考えられる。ところが、アニメーション



図 2. 実験に用いられたカメラ (左) と e-puck (右) を示す。



図 3. 実験風景を示す。

知覚は、生物と非生物を見分ける能力と見なすことができるにもかかわらず、実際に生物を用いたアニメーション知覚の先行研究は、我々の知る限り存在しない。このようにこれまで画面上に呈示された刺激や人工物を用いて調べられることが多かったアニメーション知覚について、本研究では実物の生物とロボットを用いることで、実際の生物と人工物に対してどのような脳活動が見られるかを検討し、アニメーション知覚の脳内基盤について検討する。

方法

実験参加者

実験の目的を知らされていない男女 13 名 (男 9 名, 女 4 名, 27.3 ± 5.1 歳) が実験に参加した。全員が右利きで同様の実験に参加したことはなかった。

材料と装置

生き物としてニホンイシガメ 4 匹 (甲長 5.5 6.5cm, 以下カメラと略記) を一匹ずつ交代で使い、人工物として小型移動ロボット e-puck を用いた。カメラは e-puck の外側ケースを甲羅に絆創膏で貼付けられ、その大きさ、形が e-puck と同じになるようにした上で実験を行った (図 2)。e-puck は、30 秒間計測されたカメラの運動と速度と方向変化の平均および分散の点で等しい運動をするようにプログラムされていた。

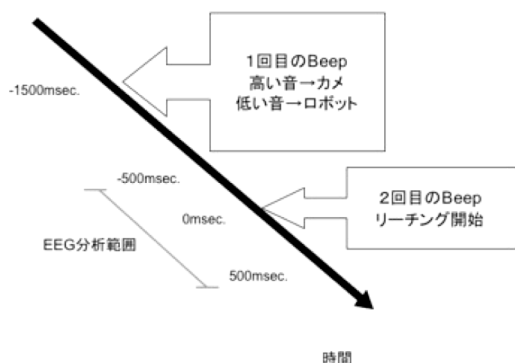


図 4. 実験の手続きを示す

実験中、カメと e-puck は実験参加者の前に設置された枠 (40×32cm) の中で自由に動いていた。枠の中央には注視点が描かれていた(図3)。ERP計測には、NeuroScan 社製 NuAmp と Quick-Cap (36ch, AgCl 電極) 用いられた。

手続き

実験参加者は、ロボットとカメの入った枠の前に座ってリラックスするよう教示された。実験参加者は試行中、眼球運動を抑制するため、注視点を凝視することを求められた。その後、二回のビーブ音が鳴った。一度目のビーブ音は実験参加者が掴む対象を指定するもので、高い音 (700Hz) であるときはカメ (生き物条件) を、低い音 (200Hz) のときはロボット (ロボット条件) を掴むものと事前に教示されていた。二度目のビーブ音は行動の開始の合図であり、実験参加者は二度目のビーブを聞いた後、速やかにリーチング行動を行なうよう教示されていた。二回のビーブ音のインターバルは 2000msec とした。これを一試行とし、実験参加者一人当たり 1 ブロック 50 試行を 4 ブロック、計 200 試行行なった。ブロック間には、自由に休憩を取ることができた。試行ごとのリーチングの対象は、カメを掴む回数とロボットを掴む回数が同数になるようにランダム化されていた。手続きの模式図を図 4 に示す。本実験は、運動を伴う脳波計測であり、アーチファクトの大きい測定となることが予測された。できるだけ、モーションアーチファクトを小さくするために、実験参加者は実験前にリーチング行動を脳波計影響を与えず行なうための練習を事前に行ない、実験を行った。また、モーションアーチファクトが両条件に同等に含まれるよう、試行中、カメ、ロボットの枠の中の位置が偏らないよう注意した。また、これら手続き、および次に述べる分析方法は、指差し行動

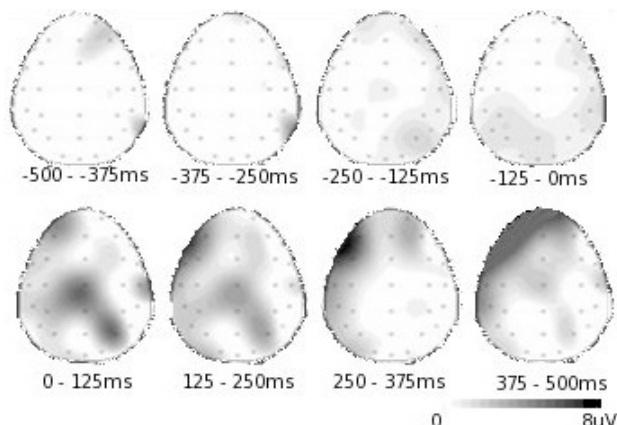


図 5. リーチングに伴う事象関連電位の生き物条件とロボット条件の差を示す。

における ERP 研究 [27] とリーチング行動における ERP 研究 [28] を参考にした。

分析方法

脳波は、0.25-200Hz のバンドパスフィルターを通した後、1000Hz のサンプリングレートでデジタル化し記録した。電極のインピーダンスは 5kΩ 以下であった。同時に、眼電位も記録し、眼電位が 50μV を越えた試行はアーチファクト試行として分析対象から除外した。基準電極は両耳朶連結とした。リーチング行動開始の時点をもとに (0msec.) とし、-500 500msec を分析対象とした。リーチング開始は実験参加者が行動開始前にキーボードを押した状態で待機し、その状態からリーチングを開始することで、キーボードのキーアップイベントによって取得した。

このキーアップイベントをリーチング開始点とみなし、このリーチング開始点を事象関連電位の基準 (0msec.) として各試行を加算平均することにより、事象関連電位を算出した。また同時に、上腕内側の筋電位を計測することで、実験参加者が対象を把握するタイミングも監視した。

結果

実験により得られた事象関連電位のトポグラフィックマップを図 5 に示す。生き物条件とロボット条件において、左前頭下部に違いが見られた。それぞれの違いを大きく示している電極 F7 (右前頭) を中心に代表的な電極における ERP 波形を図 6 に示す。図 6 から、F7 において、リーチング開始時点から、500ms 後ま

で生き物条件の波形が大きく負に触れていることがわかる。F7 について、生き物条件とロボット条件の電位について時間ごとの t 検定を行なったところ、96ms から 115ms の間で有意確率が 5% を下回っ

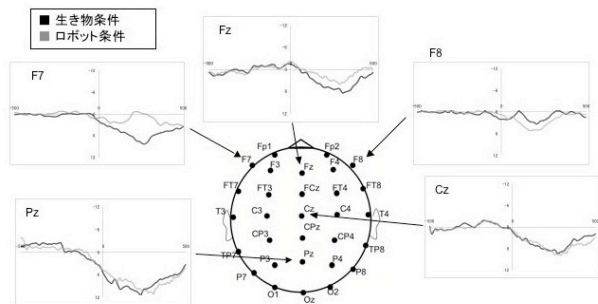


図 6. 条件間の事象関連電位を示す. 左前頭には計の違いが見られる.

た (267ms (条件感の差が最大になる時点) ; $t(12) = 2.57, p > .05$). これらの分析から, 生き物条件でのリーチングにともなう事象関連電位は, ロボット条件でのそれに比べ, リーチング開始から 270msec. 後ピークを持つに左前頭部において正の電位が生じることがわかった.

考察

結果をまとめると, 生き物に対してリーチングする場合とロボットに対してリーチングを行なう場合とでは, 左前頭下部と右側頭部の事象関連電位に異なる振幅が見られた. 先行研究を考慮すると, 左前頭下部における生き物条件とロボット条件の事象関連電位の差に, ミラーシステムが関与している可能性が考えられる. しかし, 決められた目標に対するリーチング行動と目標を特定されていないリーチング行動を比べた事象関連電位研究 (Naranjo et al., 2007) において, リーチング開始から 260msec. あたりに前頭部の事象関連電位の違いが認められている. この結果から Naranjo et al. はリーチング行動の計画に前頭部の活動が関与しているのではないかと考察している. したがって, 本実験の結果も, アニマシーとは関係なく, 運動計画との関連で単に運動自体が異なるために発生した違いである可能性も考えられる. そこで, リーチング開始前の左右運動野 (電極 C3/C4) における 2000msec. (-2000msec 0msec.) を分析対象とし, ミュー波 (8-13Hz) のパワーを求め, ミラーシステムの活動の指標となるといわれるミュー波減 [18, 19] について調べた. ミュー波は, 中心溝近くで観察され, 運動に伴って減衰し, また他者の行動を観察する際にも減衰することが知られていることから, ミラーシステムの活動を示す指標になると考えられている [29, 30]. 結果 (図 7) から, 生き物条件の方がロボット条件よりもミュー波のパワーが小さくなっていることがわかる. 生き物条件とロボット条件におけるリーチング開始前のミュー

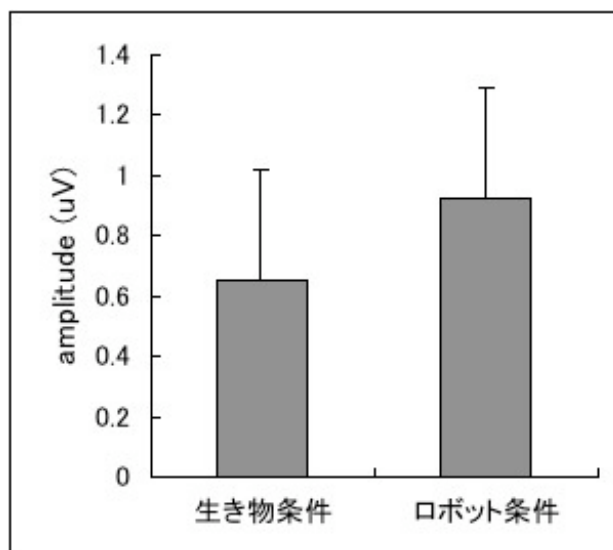


図 7. ミュー波のパワーを条件ごとに示す

波のパワーに対して, 対応のある t 検定を行ったところ, 有意な差が見られた ($t(12) = 2.225, p .05$). この結果は, 生き物条件においてミュー波がより減衰している可能性が考えられ, アニマシー知覚にミラーシステムが関与している可能性を示唆する.

このように, 本実験の結果は, 左前頭下部における脳内過程がアニマシー知覚に関与していることを示唆し, ミラーシステムの活動と関連している可能性が示唆される.

近年, ヒューマンロボットインタラクション研究においてもアニマシー知覚についての研究が多くなされている [31]. これは, ユーザーがロボットをどのような性質を持った対象であるとみなすかによって, ユーザーのロボットに対する相互作用の仕方が変化することが指摘されており, 特に, ロボットを社会的な存在であるとみなしたときにスムーズな相互作用が可能になると考えられているためである [32].

本研究では, 実物の対象に働きかける際のアニマシー知覚を, 判別課題, 事象関連電位計測という客観的な指標で評価することに成功している. これはヒューマンロボットインタラクション状況にも応用可能であり, 本研究の結果はヒューマンロボットインタラクションにおけるアニマシー知覚研究に貢献できると期待される.

参考文献

- [1] B. J. School and P. D. Tremoulet: Perceptual causality and animacy, Trends in Cognitive Sciences, vol.4, pp.299-309, (2000)

- [2] F. Heider and M. Simmel: An experimental study of apparent behavior, *American Journal of Psychology*, vol.57, pp.243-249, (1944)
- [3] W. Dittrich, and S. Lea: Visual perception of intentional motions, *Perception*, vol.23, pp.253-268, (1994)
- [4] P. Tremoulet, and J. Feldman: Perception of animacy from the motion of a single object, *Perception*, vol.29, pp.943-951, (2000)
- [5] P. Tremoulet, and J. Feldman: The influence of spatial context and the role of intentionality in the interpretation of animacy from motion, *Perception and Psychophysics*, vol.68, pp.1047-1058, (2006)
- [6] A. Michotte: *The perception of causality*, BasicBooks, New York, (1963)
- [7] D. Premack, and A. Premack: *Original intelligence*, McGraw Hill, New York, (2002)
- [8] S. Baron-Cohen: *Mindblindness*, MIT Press, Cambridge, (1997)
- [9] C. Frith, and U. Frith: Interacting minds -a biological basis-, *Science*, vol.286, pp.1692-1695, (1999)
- [1 0] T. Wheatley, S. C. Milleville, and A. Martin: Understanding animate agents: distinct roles for the social network and mirror system, *Psychological Science*, vol.18, pp 469-474, (2007)
- [1 1] G. Gallese, C. Keysers, and G. Rizzolatti: A unifying view of the basis of social cognition, *Trends in Cognitive Science*, vol.358, pp.459-473, (2004)
- [1 2] M. Iacoboni: Neural mechanisms of imitation. *Current Opinions in Neurobiology*, vol.15, pp.632-637, (2005)
- [1 3] M. Iacoboni, R. Woods, M. Brass, H. Bekkering, J. Mazziotta, and G. Rizzolatti: Cortical mechanisms of human imitation, *Science*, vol.286, pp.2526-2528, (1999)
- [1 4] Y. F. Tai, C. Scherfler, D. J. Brooks, N. Sawamoto, and U. Castiello: The human premotor cortex is 'mirror' only for biological actions, *Current Biology*, vol.14, pp.117-120, (2003)
- [1 5] J. M. Kilner, Y. Paulignan, and S. J. Blakemore: An interference effect of observed biological movement on action, *Current Biology*, vol.13, pp.522-525, (2003)
- [1 6] C. Press, G. Bird, R. Flach, and C. Heyes: Robotic movement elicits automatic imitation, *Cognitive Brain Research*, vol.25, pp.632-640, (2005)
- [1 7] J. M. Kilner, A. Hamilton, and S. Blakemore: Interference effect of observed human movement on action is due to velocity profile of biological motion, *Social Neuroscience*, vol.2, pp.158-166, (2007)
- [1 8] L. Oberman, J. McCleery, V. Ramachandran, and J. Pineda: EEG evidence for mirror neuron activity during the observation of human and robot actions: Toward an analysis of the human qualities of interactive robots, *Neurocomputing*, vol.70, pp.2149-203, (2007)
- [1 9] J. A. Pineda: The functional significance of mu rhythms: Translating "seeing" and "hearing" into "doing", *Brain Research Reviews*, vol.50, pp.57-68, (2005)
- [2 0] E. Oztop, T. Chaminade, D. W. Franklin, and C. Gordon: Human-humanoid interaction: is a humanoid robot perceived as a human? *International Journal of Humanoid Robotics*, vol.2, pp.537-559, (2004)
- [2 1] A. Engel, M. Burke, K. Fiehler, S. Bien, and F. Rosler: What activates the human mirror neuron system during observation of artificial movements: bottom-up visual features or top-down intentions? *Neuropsychologia*, vol.46, pp.2033-2042, (2008)
- [2 2] S. Shimada, and K. Hiraki: Infant's brain responses to live and televised action, *Neuroimage*, vol.32, pp.930-939, (2006)
- [2 3] K. Nowak, and F. Biocca: The Effect of the Agency and Anthropomorphism on Users' Sense of Telepresence, Copresence, and Social Presence in Virtual Environments, *Presence*, vol.12, pp.481-494, (2003)
- [2 4] I. Berndt, V. H. Franz, H. H. Bulthoff, and E. Wascher: Effects of pointing direction and direction predictability on event-related lateralizations of the EEG. *Human Movement Science*, vol.21, pp.387-410, (2002)
- [2 5] J. Naranjo, A. Brovelli, R. Longo, R. Budai, R. Kristeva, and P. Battaglini: EEG dynamics of the frontoparietal network during reaching preparation in humans, *Neuroimage*, vol.34, pp.1673-1682, (2007)
- [2 6] S. Cochin, C. Barthelemy, B. Lejeune, S. Roux, and J. Martineau: Perception of motion and qEEG activity in human adults, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, vol.107, pp.287-295, (1998)
- [2 7] S. Cochin, C. Barthelemy, B. Lejeune, S. Roux, and J. Martineau: Observation and execution of movement: similarities demonstrated by quantified electroencephalography, *European Journal of Neuroscience*, vol.11, pp.1839-1842, (1999)
- [2 8] C. Bertneck, T. Kanda, O. Mubin, and A. Marmud: Does the Design of robot influence its animacy and perceived intelligence?, *International Journal of Social Robotics*, vo.1, pp.195-204, (2009)
- [2 9] Kaplan, F., Free creatures: The role of uselessness in the design of artificial pets, In Christaller, T. and Indiveri, G. and Poigne, A. (Ed.), *Proceedings of the 1st Edutainment Robotics Workshop*.
- [3 0] B. Scassellati: Theory of mind for a humanoid robot. *Autonomous Robots*, vol.12, pp.13-24, (2001)