

ロボットの歩行動作設計によるオノマトペ・情動表現の共通理解

Understanding of Commonality of Emotion and Linguistic Expressions through Robot Design

杉山 雄紀 近藤 敏之
Yuki SUGIYAMA Toshiyuki KONDO

東京農工大学大学院 工学府 情報工学専攻

Dept. of Computer and Information Sciences, Tokyo University of Agriculture and Technology

We investigated how human shares emotional expression and common understanding of onomatopoeia through a constructive approach of human-robot interaction. For the purpose, we developed a quadruped robot simulator which walking pattern can be modulated by tuning its several parameters, e.g. walking speed, muscle tonus, range and viscosity coefficients of joint rotation, etc. Subjects were asked to optimize these parameters by hand for evoking five specific onomatopoeia, e.g., “Pyon-Pyon”, “Biku-Biku.” Each behavior designed by a subject was alternately evaluated by another subjects. Experimental results suggested that we share common understanding of onomatopoeia even through the behavior design of walking robot. Furthermore, onomatopoeia may be divided into two main groups, evoking bodily or mental movements.

1. はじめに

われわれは、身振りや表情・視線変化などの非言語的な「身体動作」から他者の行動意図や情動を読み取ることができる。例えば歩行動作ひとつを取り上げてみても、「歩行」という言葉そのものが指し示す物理的な運動の様子に加えて、歩行に随伴するさまざまな心的状態（行動意図、覚醒度、緊張度、快・不快度、疲労度など）を自動的に知覚することができる。加えて、非言語情報による心的状態の推定機能が障害されると、対人関係において文脈を正しくとらえることが困難となり「他者との円滑なコミュニケーション」が著しく損なわれることから、同機能はわれわれ人間が高度な「社会性」を実現する上で重要な役割を果たしていると考えられている [太田 10]。これに対し、頭に思い浮かぶイメージ (mental imagery) を言葉で他者に伝えることは一般に困難な問題である。言語によるコミュニケーションが成立するためには、伝えたい相手との間で共通の社会的背景に接地された言葉を適切に選択できる必要があり、さらに抽象的な言語表現を使いこなすには互いに高度な知性が要求される。しかるに、動きや音などの物理現象に接地される擬態語や擬音語（いわゆるオノマトペ）は、万人に共通して理解されやすいのだと考えられる。

ところで、このような非言語情報によるコミュニケーション能力は、われわれが長い年月をかけて進化的に獲得してきた生得的な能力であり、幼児期の発達過程において完成されると考えられているが、コミュニケーションの相手が人間や動物ではなくロボットや擬人化エージェントのような人工物である場合にはどのようなことが言えるであろうか。有田らは、車輪型移動ロボットを用いて「怒り」や「悲しみ」など5種類の感情に対応する行動パターンを設計し、行動の観察のみからロボットの感情状態を万人が共通して正しく推定できるかどうかについて調べている [有田 07]。また矢野らはCGで作成した人型モデルを用いて、「手を振る」などの基本動作を形容修飾するルール群（「手を動かす角度の範囲を大きくする」など）とそれが被験者の印象に与える影響の関係を分析し、「怒り」や

「喜び」のような興奮度（あるいは覚醒度）が高い表現と動作の大きさ・速さには相関があることを報告している [矢野 07]。このように、たとえ対象が人工物であったとしても、その身体動作が生物との類似性に基づいて設計されていれば非言語情報による心的状態の推定は可能である。しかしながら、ロボットの行動とそれが観察者に誘発する情動の関係性、すなわち身体動作の設計規範については各論的な話が多く、まだまだ十分な知見があるとは言えない。

一方、明示的な情報伝達の代表である「言語」の公共性（共通理解度）を定量化するための手段としても非言語情報を用いることができる。小松らは、「がしがし」や「さらさら」のように明示的に説明することが困難なオノマトペの音節が持つ象徴を、「硬さ」や「滑らかさ」など8種類の属性値として数値化し、この属性値を介してロボットの身体動作パターンに反映させる表現手法を提案している [小松 08]。また大海らは、能動的に手を動かすことによる知覚（アクティブタッチ）が触覚に及ぼす影響を明らかにするため、触覚ディスプレイ装置を用いて被験者に「うねうね」と「ざらざら」の2種類のオノマトペを表現する触覚刺激パターンを対話的進化計算の枠組みを用いて最適化させている [大海 09]。これらの例に見られるように、オノマトペは日本語では副詞的に用いられることが多いため、身体動作や感覚・情動と結びつけて共通理解されていることが少なくないと考えられる。したがって、われわれの脳には「言語（オノマトペ）」と「非言語情報（身体動作や感覚）」、「情動」の三者間を適切に対応づけるマップが存在し、これが他者とのコミュニケーション、すなわち「社会性」の基盤になっている可能性がある。この仮説に従えば、ある特定のオノマトペから無自覚に想起される身体動作・感覚には、観察者間に共通する情動を誘発させる作用があり、逆に、任意の情動を表現する身体動作をこのマップから合成できれば、工学的には豊かな情動表出が可能なコミュニケーションロボットの実現が期待できる。また、具体的にいくつかのオノマトペについてこのマップを構成してその対称性を調べることで、オノマトペの認知的側面（すなわち公共性や情動との関係）について新たな知見が得られる可能性もある。

以上のような背景から、本稿では身体動作を自由に変更可能なロボットシミュレータを用いた心理実験を通して、オノマ

連絡先: 近藤敏之, 東京農工大学大学院工学府情報工学専攻, 東京都小金井市中町 2-24-16, t_kondo@cc.tuat.ac.jp, <http://www.livingsys.lab.tuat.ac.jp>

トペの認知的特性を構成論的に理解することを試みる。

2. 歩行運動シミュレータ

前述の目的を達するため、本研究では、図1に示す歩行運動シミュレータを開発した。同シミュレータは、歩行ロボットの運動の様子を描画するメインウィンドウと、歩行ロボットの身体動作に影響する「歩行運動パラメータ」をスライダによって調節するパラメータウィンドウで構成される。スライダを左右に動かして任意のパラメータを変化させることによって、動力学シミュレーションによって歩行ロボットの運動が変化する様子をリアルタイムに確認することができる。

ところで、われわれが歩行ロボットの身体動作を直感的に設計できるように、歩行運動パラメータが四脚動物の歩行運動制御との類似性を考慮して選定されていることが望ましい。動物の場合、すべての身体動作は筋骨格系が持つ運動自由度を脳が環境の状態に応じて適切に制御することで実現されていると考えられる。動物の脳には、歩行リズムを構成する脊髄の中脳神経パターン生成器 (central pattern generator, CPG)、CPG を興奮させ歩行を誘発する中脳歩行誘発野、筋緊張を制御する脚橋被蓋核・網様体脊髄路などがそれぞれ独立して存在し、大脳皮質・大脳基底核がこれらの部位を統合的に制御 (亢進・抑制) することによって歩行速度・筋緊張レベルを適切に調節した歩行運動が生成されている [土屋 10]。また大脳辺縁系や視床下部は、やはり大脳基底核を介して筋緊張レベルに作用することで情動の表出に関与している。このように、動物らしい身体動作が表現できるためには、周期運動を実現するためのリズム生成機構と筋骨格系のような冗長自由度を持つ身体運動制御機構が必要である。われわれの歩行運動シミュレータでは、ロボットの歩行速度が1つのペースメーカ振動子 (位相振動子) に支配されると仮定することによってこのリズム生成機構を実装している。したがって、ペースメーカ振動子の角周波数を変化させることにより歩行速度を自由に変更することができる。また、歩行ロボットの各脚は、ペースメーカ振動子の位相に対して一定の位相差を保ちながら駆動されるように設計した。これにより、この位相差を歩行運動パラメータとして調節することで、トロットやペースなど四脚歩行動物に見られるさまざまな歩容を実現することができる。一方、筋緊張レベルの調節による身体動作の変更は情動の表出には不可欠な要素であると考えられることから、われわれのシミュレータにおいても、ロボットのすべての能動関節 (腰・膝関節) は単関節の拮抗筋モデルにより制御されるものとした。すなわち各関節は、屈筋と伸筋が発生するトルクの差によって回転するとともに、拮抗筋の同時活動によって関節の機械的な粘弾性特性を変化させることができる。これにより、「ぎこちない動作」や「滑らかな動作」を表現することが可能となる。なお仮想筋モデルとし

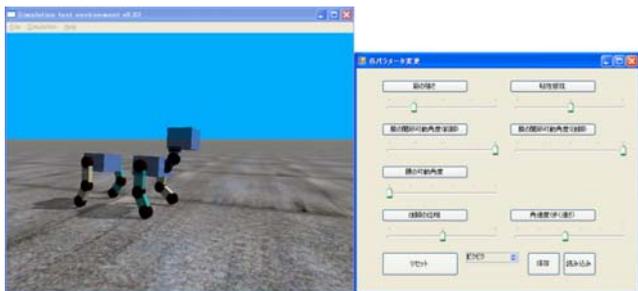


図 1: Simulator.

ては、関節角度の平衡点を制御入力とするバネ・ダンパモデルを適用した。したがって、脚の目標角度をペースメーカ振動子の位相の関数として与えることにより、任意のタイミングで仮想筋を収縮/弛緩させることができる。また、骨や腱による関節可動域の力学的拘束を表現するために、関節可動範囲を決定する歩行運動パラメータも別途用意した。

開発した歩行運動シミュレータにおいて変更可能なすべての歩行運動パラメータとその設定可能範囲 (上限, 下限) を表1に示す。被験者はパラメータウィンドウ上のスライダを調節して、これら7種の歩行運動パラメータを変更することで身体動作の最適化設計を試みる。なお歩行運動パラメータの初期値は、平均的な歩行速度で安定なトロット歩容が可能となるように、あらかじめ各脚の位相差と仮想筋モデルの収縮パターンを実数値 GA により最適化したものを用いた。

表 1: Parameters.

parameter	min	max
velocity [rad/s]	π	5π
phase difference [rad]	$-\pi/4$	$\pi/4$
joint range (knee, fore) [deg]	0	20
joint range (knee, hind) [deg]	0	20
joint range (hip, roll) [deg]	0	45
muscle gain	1	40
viscosity coefficient (knee)	0.0	0.2

3. 実験

3.1 実験 1

まず我々が人工物のふるまいとその情動的印象について共通する認識を持っているのかという点について明らかにするため、開発した歩行運動シミュレータを用いて、14名の被験者 (年齢 22-25 歳, 男性 12 名, 女性 2 名, 全員が日本人) に、実験者が指定した5つのオノマトペを表現する歩行パターンをそれぞれ設計させた。今回の実験で設計の対象としたオノマトペは、「ピクピク」「テクテク」「トボトボ」「イソイソ」「ピョピョン」の5つである。これらは、パラメータを網羅的に変更して得られる動作パターンを実験者が観察して書き留めた約 100 種のオノマトペを、パラメータ空間で重複が無いように分類する予備実験の結果に基づいて選定した。なお被験者には、本実験の目的がロボットを歩行させることではなく、あくまでも指定したオノマトペを最もよく表現していると考えられるロボットのふるまいを設計することであると注意した。

また実験後、すべての被験者に対し、各オノマトペに対応する動作パターンをどのような情動状態をイメージして設計したか、という点について、Russell の 2 次元円環モデル [Russell 97] 上に点を直接プロットするという方法で回答してもらった。同モデルは、覚醒度 (arousal level) と快・不快度 (pleasure-displeasure level) の 2 軸を情動の基本次元ととらえ、その上にさまざまな情動カテゴリ (恐れ, 満足, 疲労など) を位置づけたものである。

実験結果の一例を Fig.2~4 に示す。Fig.2 は、被験者ごとに最適化された仮想筋モデルのゲインパラメータの平均値と標準偏差を各オノマトペごとに示したものである。同様に、Fig.3 は、ペースメーカ振動子の角速度の平均値と標準偏差を示している。

これらの結果から、筋の強さを表す「筋モデルのゲインパラメータ」に関しては、「ピョンピョン」のみが突出して大きく、また「イソイソ」は比較的被験者間のばらつきが小さいことが見て取れる。一方、歩行速度に影響する「ペースメカ振動子の角速度」については、「ピョンピョン」「イソイソ」「テクテク」の順に大きく、「トボトボ」は非常に小さい（つまり「ゆっくり」とした歩行である）ことがわかる。またこのパラメータでは、「テクテク」と「トボトボ」において被験者間のばらつきが非常に小さいことも確認できる。

Fig.4 は、各被験者がオノマトペごとに最適化した動作パターンから受ける情動的な印象（Russell の円環モデルにおける覚醒度および快・不快度）の主観評価値の分布を示したものである。同図より、「ピョンピョン」「テクテク」は覚醒度が高く・快活な印象を、「トボトボ」は覚醒度が低く・不快な印象を抱きながら設計している様子が見て取れる。一方、「イソイソ」「ビクビク」については、被験者間のばらつきが大きく、被験者ごとに解釈が異なっている様子がうかがえる。

3.2 実験 2

次に、身体動作のどの部分が我々の情動推定機構に影響を及ぼしているかを定量的に明らかにするため、ロボットの動作をバイオリジカルモーション (biological motion, BM)[Johansson 73] に変換して推定する実験を行った。実験に用いた 4 種類のバイオリジカルモーション (BM1~BM4) を図 5 に示す。同図に示すように、BM1 はロボット腰部の 1 点、BM2 は右前脚の全関節とリンクの midpoint、BM3 は 4 つの肩関節、そして BM4 はすべての関節点とリンクの midpoint をそれぞれ輝点とするバイオリジカルモーションである。本実験では、最初の身体動作設計実験で各被験者に設計してもらった 5 つのオノマトペに関する身体動作をそれぞれ BM1~BM4 に変換し、これを提示映像とした。被験者には各 BM 条件下において、2 つのオノマトペに関するバイオリジカルモーション（たとえば「テクテク」と「ビクビク」）を同時に見せ、「どちらが「ビクビク」？」のように 2 択で回答を求める質問を 60 回、つまり 4 つの BM 条件では計 240 回実施した。実験は、先の実験に参加した被験者の中から 7 名の協力を得て行われた。

実験結果の一例を図 6 に示す。先にも述べたように、本実験では各 BM 条件下で 2 択によるオノマトペの識別を繰り返し行うため、たとえばオノマトペ A とオノマトペ B であれば、A が正解となる場合が 3 回、B が正解となる場合が 3 回の計 6 回について識別・比較を行うことになる。ここでは、この 6 回すべてに正答する場合に 1.0、すべてに誤答する（つまり、A と B を完全に逆にとらえている）場合に -1.0、正答率がチャンスレベルである場合は 0.0 となるように「理解度 (understanding rate)」を定義した。したがって、理解度の絶対値が大きいほど、その 2 者択一における不確かさが小さい（確信を持って回答している）ことを意味する。

図 6 は、「ビクビク」とその他 4 つのオノマトペについて、各 BM 条件下で比較した場合の理解度を示している。同図より、まず BM1 から BM4 の順に理解度が向上する傾向がうかがえる。特に「テクテク」と比べた場合、BM1 では完全に逆の理解を示していたのに対し、BM4 では両者を完全に理解して識別できていることがわかる。また、脚だけを提示する BM2 では両者の識別がほぼチャンスレベルであったことから、「テクテク」と「ビクビク」の判別には肩の動き、すなわち他の脚との相対的な運動を知覚できることが重要であることが示唆される。同様の傾向は「ピョンピョン」との比較においてもうかがえるが、理解度の絶対値が総じて小さいことから、「ビクビク」の場合「ピョンピョン」との二者択一による識別の方が「テク

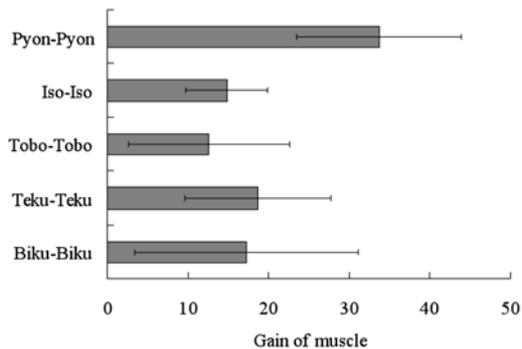


図 2: Resultant distribution of muscle gain parameters.

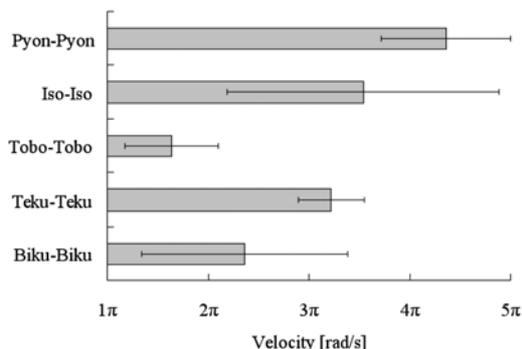


図 3: Resultant distribution of velocity parameters.

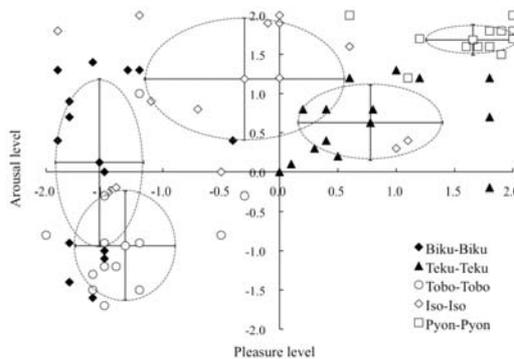


図 4: Resultant distribution of emotional impressions on Russell's model.

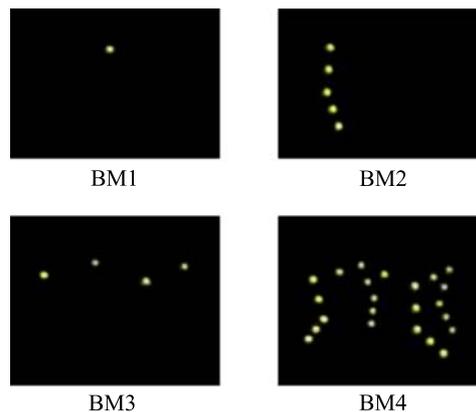


図 5: Biological motions.

Question: Which behavior is more looked as “Biku-Biku” compared with?

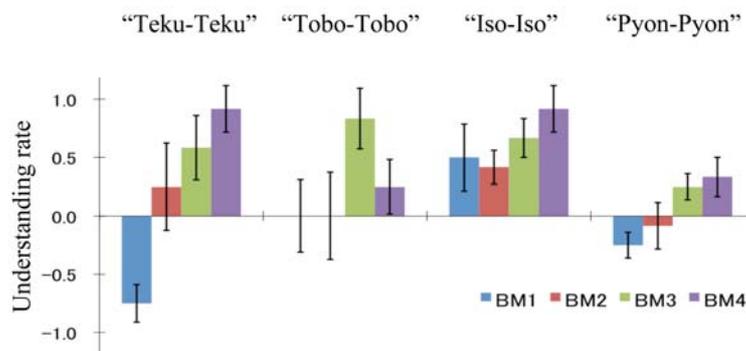


図 6: Comparison of understanding rate.

テク」と比べて難しいことがわかる。これは、「ビクビク」についての歩行運動パラメータや円環モデル上の主観的印象の分布は「テクテク」と近く、「ピョンピョン」とは明らかに異なる特性を持っていたことから考えても意外な結果である。一方、「イソイソ」との比較では BM1 の段階から識別ができており、輝点が増えるにつれて理解度が向上している。したがって、腰の運動の知覚が両者の識別に重要な要素であると推察される。なお両者は円環モデル上の主観的印象では被験者ごとに解釈がばらつく傾向が見られたオノマトペではあるが、二者択一による身体動作の識別は十分可能であることが示された。最後に、「トボトボ」との比較では、BM3 の場合を除いてチャンスレベルの識別結果となった。BM3 は肩の 4 点のみを輝点として表示したバイオロジカルモーションであり、この 4 点は BM4 にも含まれている。それにもかかわらず BM4 では理解度が低下していることから、擬情語である「ビクビク」は「トボトボ」と比べて歩行運動との結びつきが弱く、脚の運動を知覚することそれ自体が「トボトボ」の印象を被験者に与えた可能性を示している。

4. まとめ

本研究では、歩行速度や関節の粘弾性・駆動力の大きさなどを自由に変更可能な四脚歩行ロボットシミュレータを構築し、被験者に「ビクビク」や「ピョンピョン」など 5 種類のオノマトペを表現するロボットの身体動作を設計させる心理実験を通して、オノマトペから抱くイメージの公共性や、身体動作のどの部分がわれわれの知覚に影響を及ぼすかといった点について調査した。実験の結果、「ピョンピョン」「テクテク」のように動作に関連する擬態語オノマトペは被験者によらず似通った身体動作となる傾向があるのに対し、「ビクビク」「イソイソ」のように心的状態の表現に関係が深い擬情語オノマトペは、被験者間で情動的な解釈にばらつきがあることが示唆された。

今後の課題としては、これまでの実験結果の分析に基づいて、「言語（オノマトペ）」「ふるまい」「情動」を相互に結びつける写像を構築することが挙げられる。この写像を活用することで、Russel の円環モデル上の任意の座標を指定することで、その情動に見合うロボットの歩行パターンを生成できるシステムが可能となる。すなわち、未知のオノマトペに対しても、快・不快度と覚醒度についての印象からそれに見合うロボットのふるまいを実現できるようになる。これにより、豊かな情動

表出が可能なコミュニケーションロボットの実現が期待できると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤研究（B）、課題番号:23300216）の支援により行われた。ここに謝意を表す。

参考文献

- [太田 10] 太田順, 青沼仁志: シリーズ移動知第 4 巻「社会適応」—発現機構と機能障害—, オーム社, 2010.
- [有田 07] 有田隆也: 心はプログラムできるか—人工生命で探る人類最後の謎, ソフトバンククリエイティブ, 2007.
- [矢野 07] 矢野良和, 山口淳嗣, 道木慎二, 大熊繁: ロボットの動作による感情表現と観測者の受ける印象の分析, 第 17 回インテリジェントシステム・シンポジウム講演論文集, pp.373—378, 2007.
- [小松 08] 小松孝徳, 秋山広美: ユーザの直感的表現を支援するオノマトペ意図理解システム, Human-Agent Interaction Symposium 2008, 2A-4, 2008.
- [大海 09] 大海悠太, 池上高志: ニューラルネットワークと触覚ディスプレイを用いたアクティブタッチの研究「うねうね」と「ざらざら」の触覚の構成, 電子情報通信学会技術報告, HIP2009-51, pp.17-21, 2009.
- [土屋 10] 土屋, 高草木, 荻原 編: シリーズ移動知第 2 巻「身体適応」—歩行運動の神経機構とシステムモデル, オーム社, 2010.
- [Russell 97] J. A. Russell: A Circumplex Model of Affect, *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol.39, No.6, pp.1161—1178, 1980.
- [Johansson 73] G. Johansson: Visual perception of biological motion and a model for its analysis, *Perception and Psychophysics*, vol.14, pp.201-211, 1973.