LJ-012

ロボットの機能に気づかせるノンバーバルインタラクション

Nonverbal Interaction Design for Users to Notice Robot's Function

小林 一樹 †　**山田 誠二** ‡　**北村 泰彦** †
Kazuki Kobayashi　Seiji Yamada　Yasuhiko Kitamura

1　はじめに

掃除ロボットやペットロボットに代表されるホームロボットが一般家庭に普及しつつある [8]．特に，自律芝刈りロボットや自律掃除ロボットなど，実用ロボットが開発されている．このようなロボットが家庭に普及したとき，現状の家電製品と同様に，高機能化・多機能化していくと考えられる．しかし，多機能化によって操作が複雑になることは，デジタルデバイドを助長する可能性があり大きな問題である．もし，マニュアルを読んだり，他者に教示されなくても簡単に使用できる多機能ロボットが開発されれば，多くの人々にとって有益だと考えられる．そこで，本研究では，そのようなマニュアルフリーロボットを実現するための要素技術として，ロボットが備えている機能をユーザに気づかせる方法を検討する．

これまで，使いやすい人工物の設計方法として，アフォーダンス [1] を利用した設計方法 [3] や，サッチマン [6] による，機械に対する人間の行動特性に関する研究，ロボットの親和性を高める方法 [5]，人間の自然な行為によってロボットを制御する方法 [10]，ロボットの状態提示方法に関する研究 [9] などが行なわれてきた．また，具体的なものでは，ユーザに人工物の状態を知らせる報知音 [12] やサイン音 [11] の研究があり，JIS:S0013 では家電製品の報知音が規格化されている．しかし，これらの研究では，ユーザにとって未知の機能に気づかせる具体的な方法は提案されていない．

本研究では，ユーザの行為に応じてフィードバックを変化させるアクションスローピングという手法を提案し，犬型ロボットを用いた参加者実験によって機能の気づきやすさを検証する．ロボットのフィードバックに着目した理由は，ユーザとロボットとのインタラクションが生じやすいと考えられる一般家庭での利用を想定したためである．ロボットに対してユーザからの積極的な関与を期待できるため，実験ではロボットの行為に先立ってユーザの行為が行われる状況を設定した．以降では，2 章で提案するアクションスローピングの説明を行い，3 章で実験とその結果を報告する．4 章では実験の考察を行い，5 章で本論文のまとめを述べる．

2　アクションスローピング

本研究では，ユーザの行為を誘導することでロボットの機能を発見させるアプローチをとる．そのための前提として，マニュアルに代表される言語情報を用いる状況とは対極にある，非言語情報のみをやりとりする状況を設定した．たとえば，ユーザがロボットのある作業をさせたいときには，以下に示すように，互いに行為の実行を繰り返すことでコミュニケーションを成立させる．

(1)　ユーザからロボットへの行為
(2)　ユーザの行為に対するロボットの行為 (フィードバック)
(3)　ロボットのフィードバックに対するユーザの行為
(4)　ロボットによる機能の実行

このとき，ユーザは自分の行為とロボットの行為（機能の実行）の対応関係を理解することで，ロボットの機能を発見できる考えられる．ここでは，この対応関係の理解に基づく機能の発見を**機能発見（Function Awareness）**と呼ぶ．

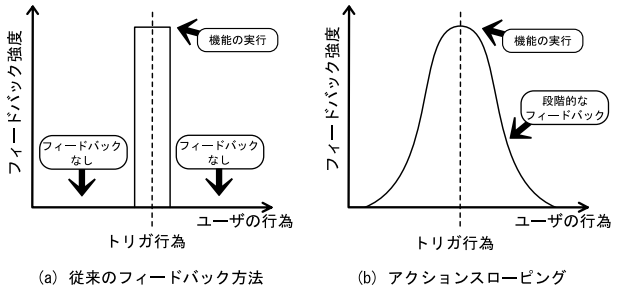

図 1　ユーザの行為とフィードバック強度の概念モデル

機能発見を実現するために，本研究では**アクションスローピング（Action Sloping）**を用いたロボットのフィードバック設計方法を提案する．図 1(a) に示すように，従来のフィードバック方法では，ロボットの機能を実行させるユーザの行為（以降，トリガ行為と呼ぶ）が行われたとき，ユーザはロボットの機能の実行を観察することで，対応関係を発見する．トリガ行為以外の行為をした場合にはフィードバックは得られない．それに対し，図 1(b) に示すアクションスローピングによるフィードバックでは，トリガ行為の周辺においてもフィードバックが得られるため，ユーザはロボットとのインタラクションを繰り返すことで，トリガ行為を行いやすくなると考えられる．ここでは，フィードバックとして用いる信号の強さ (音量やピッチ，明さなど) をフィードバック強度と呼ぶ．このように，アクションスローピングとは，ユーザの行為に応じて，ロボットによるフィードバックの強さを段階的に変化させる方法である．

たとえば，図 2 に示すような料理や洗い物を行う家事ロボットを考える．このロボットは，ユーザがあるボタン数秒間押し続けると，それに対応した機能が実行されるように設計されているとする．数秒間押し続ける利点は，ユーザが意図せずボタンを押してしまっても，押し続けない限り誤動作したり，ロボットが従事している作業が中断されない点にある．しかし，ユーザはマニュアルを読んだり，他人から教示されない限り，このような操作に気づくことは難しいと考えられる．アクションスローピングはこのような状況において有効である．つまり，ユーザがボタンを押した時間に応じて，フィードバックを変化させるので，ロボットの状態とユーザの行為との対応付けがとりやすい．図ではロボットの胸部にプログレスバーが表示されており，ボタンを押している時間に比例して，バーが増加する様子を表している．この様子をユーザが観察することで，マニュアルを読まなくてもロボットの機能に気づくことが可能だと考えられる．

次節では，このアクションスローピングを犬型ロボットに適用し，光，モーション，音声の 3 つのモダリティでフィードバックを行った実験について述べる．

† 関西学院大学，Kwansei Gakuin University
‡ 国立情報学研究所，National Institute of Informatics

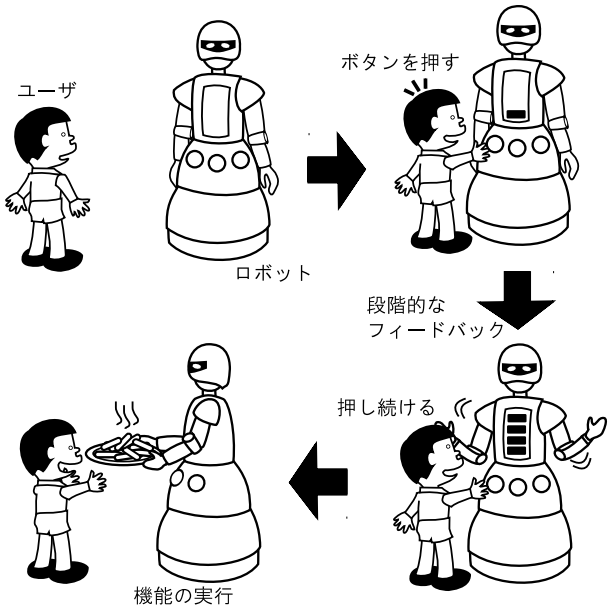

図 2　アクションスローピングの例

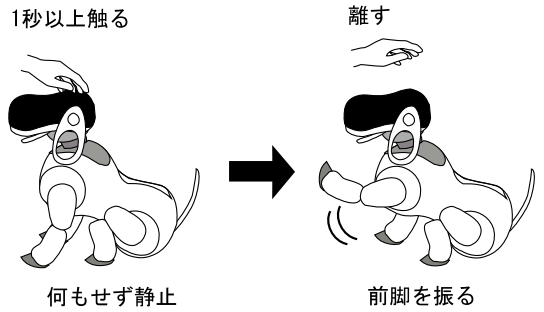

図 3　ロボットの機能

3　実験

実験では，アクションスローピングが実装されたロボットと，実装されていないロボットを実験参加者に使用させ，機能を発見するまでの時間を比較する．参加者には，ロボットに実装された，ある 1 つの機能を探索する課題が与えられた．アクションスローピングは 3 種類のモダリティによるものを採用し，アクションスローピングの実装なしとの間で比較を行った．以下に実験の詳細を示す．

3.1　ロボット

アクションスローピングを実装するロボットとして，SONY AIBO ERS–7 を採用した．ロボットの機能として，図 3 に示す「前足を振る」行為を実装した．この機能は，ユーザがロボットの頭部センサに 1 秒以上接触し，離した直後に実行される．よって，実験参加者が行うトリガ行為は「1 秒以上接触し，離す」となる．ロボットは，トリガ行為が行われたときのみこの機能を実行し，それ以外は反応しない．このような「長押し」操作は，携帯電話を代表として多くの電子機器に採用されており，1 つのボタンに複数の機能を割り当てるときに有効である．ロボットの行為の実装には AIBO 用のオープンソースなプログラム開発フレームワークである Tekkotsu framework[7] を用いた．

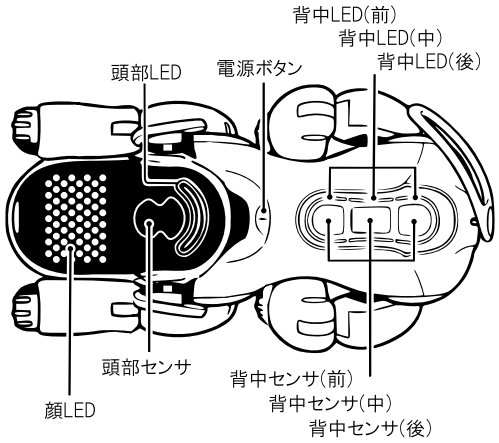

図 4　ERS–7 のセンサ配置

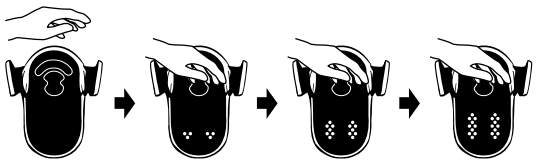

図 5　光フィードバック

3.2　アクションスローピング

ユーザにロボットの機能を容易に発見させるために，アクションスローピングに基づくフィードバック方法を実装した．ここでは，光，モーション，音声による 3 つのモダリティを採用した．ロボットの機能は，頭部センサを 1 秒以上接触されたあとに実行されるため，頭を触っている時間に比例して変化するフィードバックを行う．

光フィードバック

図 5 に示すように，顔 LED の点灯面積を 1 秒間に 4 段階増加させる方法を採用した．

モーションフィードバック

図 6 に示すように，機能の実行で使用される前足を，1 秒間で肩まで上げるモーションを採用した．

ピッチ変化音声フィードバック

1 秒間に 440Hz から 880Hz まで正弦波の音声を線形に変化させる方法を採用した．この周波数は NHK の時報でも採用されており，聞きとりやすいものと考えた．

ユーザが 1 秒を越えて頭部センサに接触している場合，ロボットは最終状態をそのまま継続し（音声のみ停止），ユーザが 1 秒未満で頭部センサから手を離した場合，フィードバックはそこで終了し初期状態に戻る．また，AIBO にはあらかじめ組み込まれているフィードバックがあり，図 4 に示すように，頭部センサに触れているとき頭 LED が点灯し，背中センサに触れているとき背中 LED がそれぞれ点灯する．組み込みフィードバックはどの条件でも同じように動作する．

3.3　参加者

実験への参加者は二十代の男女 46 名であり，使用するロボットのフィードバック方法に応じて，以下の 5 つのグループにランダムに分けられた．

(1) フィードバックなし条件

アクションスローピングによるフィードバックを行わない条件．参加者が頭部センサに触れても，フィードバックを行わない．参加者は男性 10 名．平均年齢 23.4 歳，標準偏差 2.5 歳．

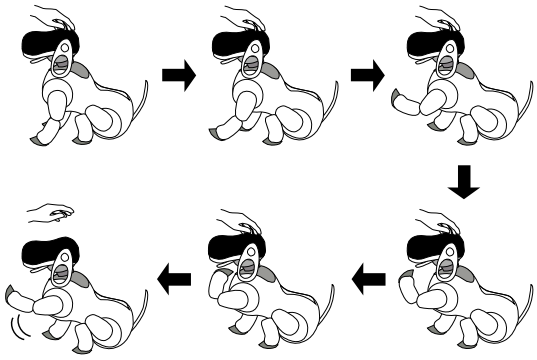

図 6　モーションフィードバック

(2) **ピッチ一定音声フィードバック条件**

アクションスローピングによるフィードバックを行わない条件．参加者が頭部センサに触れた場合，ピッチが一定（440Hz）の正弦波音声が再生される．参加者は男性 9 名，女性 1 名．平均年齢 21.6 歳，標準偏差 1.4 歳.

(3) **光フィードバック条件**

アクションスローピングを適用した，光によるフィードバックを行う条件．参加者は男性 7 名，女性 2 名．平均年齢 21.8 歳，標準偏差 1.1 歳.

(4) **モーションフィードバック条件**

アクションスローピングを適用した，モーションによるフィードバックを行う条件．参加者は男性 8 名．平均年齢 21.6 歳，標準偏差 1.3 歳.

(5) **ピッチ変化音声フィードバック条件**

アクションスローピングを適用した，ピッチが変化する音声によるフィードバックを行う条件．参加者は男性 8 名，女性 1 名．平均年齢 21.7 歳，標準偏差 0.9 歳.

3.4　実験手順

実験は関西学院大学において，周囲から区切られた実験室内 (W: 256 × D: 205 × H: 215 cm) で行われた．1 回に 1 名のみが入室し，ロボットを使用する．ロボットは，椅子に座った状態の参加者に対し，机の上に横向き（頭が左側）に設置された．実験室に案内された参加者は，実験概要を説明されたのち，ロボットを机の上に配置され，注意事項を教示される．参加者への教示内容は，(1) ロボットは自分からは何も行動を開始しない，(2) ロボットは，参加者が何かをしたときにある行動を行う，(3) 何をしたときに，ロボットがどういう行動をするのかを見つけること，(4) ロボットの行動は 1 つだけである，(5) 実験者の合図で実験が開始され，およそ 5 分後の合図で終了される，の 5 項目である．また，制限事項として，(1) ロボットを持ち上げないこと，(2) 強く押したり，部品を取り外さないこと，(3) 関節は固定されているので，無理に曲げないこと，(4) 電源ボタンを押さないこと，の 4 点を説明した．実験者は実験開始の合図を行ったのち，実験室から退室した．終了の合図は，実験者が実験室に入室すると同時に行った.

3.5　実験結果

表 1 に各モダリティのタスク達成率を示す．フィードバックなし条件では 4 名，ピッチ一定音声フィードバック条件では 3 名，光フィードバック条件とモーションフィードバックでは各 1 名が制限時間（約 4 分）以内にロボットの機能を発見することができなかった．ピッチ変化音声フィードバック条件では全員が時間内に機能を発見した.

図 7 に参加者が機能を発見するまでに要した時間の平均を示す．ここでは，参加者が発見したと思ったか思わなかったかに関係なく，参加者が最初に頭部センサに接触した時刻からロボットの機能がはじめて実行された時刻までの経過時間を測定した．分散分析の結果，全体に有意な差が認められた（$F_{4,32} = 3.08, p < 0.05$）．HSD 法による多重比較の結果，フィードバックなし–ピッチ変化音声フィードバック間に有意な差 ($p < 0.05$) が認められた．ピッチ変化音声フィードバック条件は，フィードバックなし条件に比較して，機能が発見しやすいことがわかる.

表 2 に頭部センサへの接触回数と接触継続時間との相関係数を示す．接触回数は参加者ごとに異なるため，それぞれの参加者の接触回数を 1 として正規化した．相関係数の検定を行ったところ，ピッチ変化フィードバックにおける相関係数のみに有意差が認められた（Spearman's $\rho = 0.183, p < 0.05$）．ピッチ変化音声を提示した場合には，接触回数が増加すると 1 回あたりの接触時間もそれに伴い増加することがわかる.

表 1　タスク達成率

実験条件	達成率 (人数)
フィードバックなし	60.0 %　(6/10)
ピッチ一定音声	70.0 %　(7/10)
光	88.9 %　(8/9)
モーション	87.5 %　(7/8)
ピッチ変化音声	100 %　(9/9)

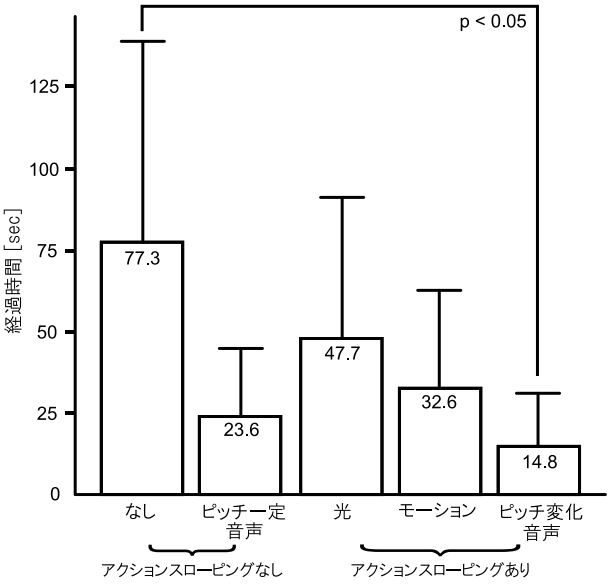

図 7　機能に気づくまでに経過時間

表 2　接触回数と接触継続時間の相関係数

実験条件	相関係数	p 値	接触回数
フィードバックなし	.032	.813	57
ピッチ一定音声	.183	.240	43
光	.112	.294	90
モーション	.694	.694	59
ピッチ変化音声	.346	.029*	40

4 考察

4.1 アクションスローピングの有効性に関して

なぜピッチ変化音声フィードバック条件にだけ有意差が出たのだろうか．小松ら [2] は，参加者にロボットの態度を推定させる実験において，周波数を変化させた音声を聞かせている．周波数が高くなるビープ音では，ポジティブな態度だと推定され，周波数が低くなるビープ音では，ネガティブな態度だと推定されるという実験結果が得られている．また，Ohala[4] は，発話において，イントネーションの基本周波数が高いと，小さいこと，脅迫的でない態度，聞き手を親切にしたいとう願望を示し，周波数が低いと，脅迫的な態度，自信，うぬぼれを伝達すると述べている．今回の実験用いたピッチ変化音声は，周波数が高くなるように変化するため，参加者は，ロボットがポジティブで親切な態度をとっていると解釈した可能性がある．周波数が低くなるように変化させた場合，ユーザがどのような行為をとるかは調査していないが，上記の研究を参考にすると，機能発見への寄与は少ないと考えられる．

フィードバックなし条件と比較して，他のフィードバックあり条件ではどれも機能発見までの時間が短くなることがわかった．しかし，モダリティの効果を考えると，先行研究 [9] とは異なる結果になっている．先行研究では，モーションによるフィードバックが，最も早く参加者の行動を導いている．これに対し，本研究では，ピッチ変化音声によるフィードバックが，最も早く参加者の行動を導いている．２つの実験では，使用しているロボットやタスク，環境などが異なる．その中でも最も大きな違いは，タスクの持つ性質の違いにあると考えられる．先行研究ではロボットの機能を参加者に教示しているのに対し，本実験では，ロボットの機能を教示していない．これらの違いを考慮すると，ピッチ変化音声フィードバックは，未知のロボット行動を探索する課題に適し，モーションフィードバックは，状況から推測しやすいロボット行動を誘導する課題に適している可能性がある．

4.2 実験における制約

実験では，参加者にロボットを持ち上げてはならないという制約を課した．この制約は，ロボットを乱暴に扱われないようにすることが目的だったが，このサイズのロボットであれば参加者が容易に持ち上げることが可能である．今回の実験で，持ち上げる行為にかわり，他の行為が多く生じているとすれば，観察された発見までの時間は，実際よりも早くなっていると考えられる．

参加者には，「何をしたらロボットがどういう行動をするのかを発見せよ」と教示している．そのため，観察された行為は，ある作業中に特定の機能を探している状況というよりは，ロボットと遊んでいるような状況に近い．今回の実験では，あるときは人間の作業を支援し，あるときは人間と遊ぶといったロボットの使用方法を前提としている．現状では，エンタテイメントロボットとしての側面と実用ロボットとしての側面を備えているロボットは開発されていないが，ユーザとの親和性を高めるという意味でエンタテイメント性の導入は有効だと考えられる．

最後に，参加者に「ロボットの行動は１つだけである」と教示している問題がある．これは，実用的な状況とのギャップが大きい．本来はロボットに多くの機能が実装された状況を設定するのが望ましいが，本実験では提案手法の有効性を検証するのに必要最低限の設定とした．

5 まとめ

ユーザがマニュアルを読まずに，自然にロボットの機能に気づくことができれば，負担の軽減や作業効率の向上につながり有益である．そのためのロボットの設計方法として，アクションスローピングを提案した．アクションスローピングは，ロボットのノンバーバルなフィードバックを，ユーザの行為に応じて段階的に変化させ，ユーザの行為を機能の発見へと導く手法である．実験では，ロボットのセンサに１秒間接触し続けたときに実行される機能（簡単な動作）を見つける課題を設定し，実験参加者が機能を見つけるまでの時間を記録した．光，モーション，音声の３つのモダリティにおいてアクションスローピングを犬型ロボットに実装し，アクションスローピングを実装しない２つの条件を含めて比較を行った．実験の結果，ピッチ変化音声によるフィードバック条件において発見するまでの時間が最も早くなり，提案手法の有効性を支持する結果を得た．今後，実験データの詳細な分析行うとともに，体系的な調査を実施し，マニュアルフリーロボットの設計指針を構築する予定である．

謝辞

本研究の一部は，科学研究費補助金・若手研究（スタートアップ）（課題番号:18800067）からの研究助成を受けました．ここに謝意を記します．

参考文献

[1] James J. Gibson. *The Ecological Approach to Visual Perception*. Lawrence Erlbaum Associates Inc., 1979.

[2] T. Komatsu. Can we assign attitudes to a computer based on its beep sounds? In *Proceedings of the Affective Interactions: The computer in the affective loop Workshop at Intelligent User Interface 2005*, pages 35–37, 2005.

[3] Donald A. Norman. *The Psychology of Everyday Things*. Basic Books, 1988.

[4] J. J. Ohala. *Sound symbolism*, chapter 22 The frequency codes underlies the sound symbolic use of voice pitch, pages 325–347. Cambridge University Press, 1994.

[5] Tetsuo Ono, Michita Imai, and Ryohei Nakatsu. Reading a robot's mind: A model of utterance understanding based on the theory of mind mechanism. *International Journal of Advanced Robotics*, 14(4):311–326, 2000.

[6] Lucy A. Suchman. *Plans and Situated Actions: The Problem of Human-Machine Communication*. Cambridge University Press, 1987.

[7] David S. Touretzky and Ethan J. Tira-Thompson. Tekkotsu: A framework for aibo cognitive robotics. In *Proc. of the Twentieth National Conference on Artificial Intelligence*, 2005.

[8] United Nations Economic Commission for Europe and International Federation of Robotics. *World Robotics 2004 – Statistics, Market Analysis, Forecasts, Case Studies and Profitability of Robot Investment*. Palais des Nations, 2004.

[9] 小林 一樹 and 山田 誠二. 擬人化したモーションによるロボットのマインド表出. **人工知能学会論文誌**, 21(4):380–387, 2006.

[10] 小林 一樹 and 山田 誠二. 行為に埋め込まれたコマンドによる人間とロボットの協調. **人工知能学会論文誌**, 21(1):63–72, 2006.

[11] 山内 勝也 and 岩宮 眞一郎. 振幅変調音の擬音語表現とサイン音としての機能イメージ. **日本音響学会誌**, 60(7):358–367, 2004.

[12] 和氣 早苗, 上窪 真一, 福住 伸一, 旭 敏之, and 広明 敏彦. 音響インタフェース設計手法”報知音多次元設計手法”確立への一考察. **電子情報通信学会論文誌** *D-II*, J82-D-II(10):1721–1728, 1999.