

バイオフィードバックに基づく人間・ロボット交流実験の分析

Using Biofeedback to Analyze Human-Robot Interaction Experiments

○ バインブリッジ・ウィルマ (東大) 学 野沢 峻一 (東大)
植田 亮平 (東大) 垣内 洋平 (東大)
岡田 慧 (東大) 正 稲葉 雅幸 (東大)

*Wilma BAINBRIDGE, University of Tokyo, wilma.bainbridge@gmail.com
Ryohei UEDA, Shunichi NOZAWA, Yohei KAKIUCHI, Kei OKADA, Masayuki INABA,
University of Tokyo

In this paper, we discuss methods for using sensor data, combined with biographical and behavioral data, to investigate people's impressions towards a robot during an interaction. We outline a methodology for how to create a relevant and reliable data set from raw sensor data taken from the robot, and how these data can be interpreted psychologically. We conducted a large-scale human-robot interaction experiment at the University of Tokyo campus, where the humanoid robot HRP-2 greeted subjects by bowing, waving, and shaking hands with them. During the interaction, we collected sensor data including temperature, force, and tactile data. We found significant differences between different subject groupings, indicating that biofeedback can be a useful tool to implement within a robot's design.

Key Words: Human-Robot Interaction, Biofeedback, Multi-User Environment, Handshake, Sensor Data

1. はじめに

人間・ロボット相互作用 (Human-Robot Interaction, HRI) 実験の中で、人間のロボットに対しての感情的反応の効果的な数量化はまだあまりない。今まで、アンケートのデータが主に使用されていたのだが、ロボット自体のセンサから客観的なデータを大量に取ることも出来るのではないかとと思われる。元々、センサデータはエラー訂正や、自己姿勢の保持などで使われていたのだが、HRI でも使えるのではないだろうか。本研究では、ロボットのセンサを使用し、バイオフィードバック・データの取得を試みる。ロボットがどんなセンサを使い、どんなデータをとれるか、これが HRI 研究にどんな意味があるのかを述べる。

バイオフィードバックというのは、機械で人間の行為、身体からの情報を測定することである。心理学実験では、被験者の手や頭などに測定機械を付けて、ストレスについて調べる実験がよく使用されている[1]。心理学実験の方法論を基にして、HRI 実験の文脈の中で、被験者の体温、皮膚通電、握力、声量、視線などでストレス、心地良さ、気分などを理解することが出来るだろう。人間の感情を理解するだけではなく、バイオフィードバック・データの取得は、HRI 実験においていくつかの利点がある。ノイズが多い普段の多ユーザ環境でも一人ずつのデータを正確に取る事が出来る。そして、一回だけの作用でもデータを多く取ることが出来る。

これに先立つ研究で、この研究所は、多ユーザ環境でのバイオフィードバックの効果を示したが[2]、ロボットとの握手に基づいてバイオフィードバック・データの測定を試みた。本論文では、センサ・データから感情的反応の詳細を述べる。ロボットには様々なセンサを付けることが出来るが、どんなセンサで人間の感情を解釈することが出来るか。そして、その RAW センサ・データから感情データへの分析方法も述べる。

2. 実験の構造

まず、センサ・データを使用した実験の構造を説明しよう。本実験では、ロボットを東京大学本郷キャンパスの外に置いて、通っている人に挨拶させた。顔追跡が5枚のフレームに現れれば、ロボットは、ランダムに次の行動を選択した: 1) 握手、2) お手振り、3) お辞儀、4) 不動。人間同士で、知らない人と触れ合うときは、握手ぐらいしかない。だから、この実験では、握手を使って人間からのバイオフィードバックを自然に測ることが出来た。お辞儀、お手振りでも、人間の反応を見られたが、それは主にロボットとの交流を面白くするために入れただけである。

人がロボットに寄ってきたとき、実験者が、「ロボットに会ってみて下さいませんか？」という挨拶をしたが、ロボットの説明は詳しくしなかった。ロボットは、握手を始めたとき、Aquestalk[3]という音声合成ソフトウェアを使って、頭のスピーカーから、「はじめまして。HRP-2 といいます」と被験者に言った。その後、手を少し持ち上げて、人間が手を出すのを待った。「力」センサで手が出たのが分かったら、相手の手に合わせて握って、10秒の握手をした。30秒で手が出なかった場合、握手を諦めた。被験者が止めるまで続けさせたので、何回もロボットと握手した人もいた。被験者の中で、19人が2回握手し、8人が3回握手し、1人が4回握手した。ロボットとの握手が怖くて途中で諦めた人もいた。両方の被験者のデータが含まれている。被験者との相互作用が終わったら、ロボットと実験の詳細を説明した。図1で、実験の状況が分かる。

この実験は東京大学の卒業生が帰ってくるホームカミング・デーで行い、多くの異なったバックグラウンドの被験者が訪れた。実験の3時間中に、70人がロボットと作用し

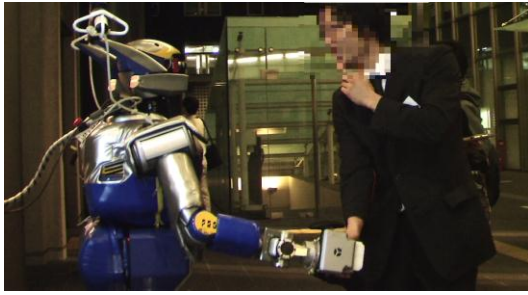


Fig. 1 Photographs indicating different behaviors of the HRP-2 during the experiment.

Participants' faces are censored in order to preserve their anonymity. Upper left: handshake; upper right: wave; lower left: bow.

て、62人が握手した。70人の中で、49人が男性で、21人が女性だった。63人が東洋人で、7人が西洋人だった。平均の年齢は25歳だった。そして、15人がロボットと接した経験があった。

3. センサ構造

この実験では、ヒューマノイドロボット HRP-2JSK を利用して、センサで人間のデータを測定した。川田工業の作った HRP-2 には既に付いているセンサがいくつもある。各腕には「力」センサが六つあり、各センサがニュートン (N) で六つの方向で力を測ることが出来る: x 、 y 、 z 、 $roll$ 、 $pitch$ 、 yaw 。その「力」センサで、人間がロボットにどんな圧力を与えているかを測ることが出来る。つまり、握手している間、人間が積極的に握手しているかどうかを測定することができる。その観察から色々な心理的な現象が分かる。例えば、積極的な握手であれば、心地良さ、性別の違い、などを表すのではないだろうか。また、握手が普通である社会 (アメリカ) と握手が特殊である社会 (日本) の文化の違いなどが示すのではないだろうか。

HRP-2JSK とは、JSK 研究室で HRP-2 型のロボットの頭と手に変更を加えたロボットである。頭にはステレオ・ビジョンのカメラと7自由度の機能を入れた。そのカメラを一つ使い、この実験ではロボットに被験者の顔追跡をさせた。カメラから取れた動画で、被験者がロボットと目を合わせたかどうかを分析した。ロボットのカメラの解像度は、まだ完全でなく自動的に分析することが出来ない。しかし、研究室の分析によって、次の分類をした: 1) 全く視線が合わせなかった、2) 視線を一回だけ合わせた、3) 視線を一回以上合わせた、4) 視線をずっと合わせ続けた。

HRP2-JSK の手は指が3本あり、親指、人差し指、中指が6自由度で動くことが出来る。親指には2自由度があり、人差

し指には3自由度があり、中指には1自由度がある。手が動くとき、触れている物を潰さないように柔らかさを変更することができる。それを使って、人間に楽な握手が出来るほどの柔らかさにした。手にもバイオフィードバック式のセンサを付けた。各指に人間の触感を測れるタクタイル・センサを二つ付けた。データ分析には、 $tactile0$ 、 1 が親指、 $tactile2$ 、 3 が人差し指、 $tactile4$ 、 5 が中指に付けたセンサ。そのセンサはアナログ数字で測られる。握手している間の触感から、人間の握手の強さ (または、心地良さ) も測定することが出来るだろう。

ロボットの親指 ($thermo0$)、人差し指 ($thermo1$)、手のひら ($thermo2$) にも体温センサを付けた。その三箇所が握手のときに最も触れている所で、付けると一番体温の差が出ると思われる。体温は摂氏を使用している。これは心理学でよく使われる方法論である。皮膚通電はノイズが多く、触れている時間が長いのが必要なので、本実験で使わなかったが、今後の実験で使うことも考えている。手の体温とストレスの相関を表している心理学研究もあり[4]、体温と心地良さの相関を表している研究もある[5] ので、今後の研究でその点について調べられるだろう。高い体温も興奮を表すのではないと思われる。

4. データの分析

実験のスク립トは Robot Operating System (ROS) の構造 [6] を使用して EUSLISP というオブジェクト指向の LISP のプログラミング言語 [7] で書かれている。データは、全部自動的に ROS の bag file (いわゆる、データを自動的に圧縮しファイルする場所) に投入される。HRP-2JSK のセンサ・データを使うと、1分に1000行、画像データも含めて1GB ぐらいのデータが得られる。そのデータを別けて分析するのは簡単な作業ではない。センサのそれぞれの測る頻度が違うので、

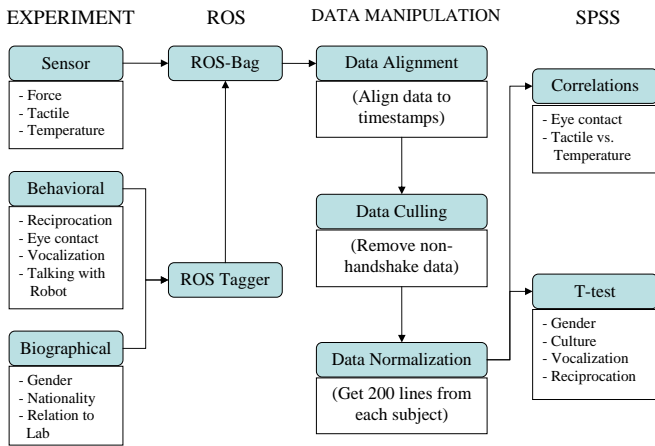


Fig. 2 Flow chart of the data analysis steps involved in this study

データを揃えるためのソフトを書いた。そのソフトは、同じ時間の範囲にある計測を揃えて、タブ区切りテキスト・ファイルに1行として出力する。さらに、ロボットが握手している間以外のデータ(顔追跡のときや、他の挨拶しているとき)を削除した。

被験者一人ずつから取れたデータの量は、平均802行で、ロボットと触れ合っている時間によって、221行から2000行までのデータ量の範囲があった。データが多ければ多いほど、ロボットに対しての感情の傾向が見られる。各被験者のデータが多くて、被験者の人数も多いので、一人ずつの特異性が消えて、一般の感情の違いが残るはずである。しかし、被験者によってデータの量が違ったので、データをそのまま分析すれば、長く握手した人は、データに大きな影響を与えるはずである。それを直すために、各被験者のデータを次の様に修正した。各被験者から200行のデータをランダムに取り、新しいスプレッドシートに出すソフトを書いた。

HRI 実験のデータを分析するには、心理学の使用している方法が必要だ。この実験では、二つの仮説検定の種類を使用した: t検定(二つのグループを比較する場合)と、相関係数(二つの連続変数を比較する場合)。全部の分析はSPSSというソフトで行われた。この実験では、 $p < 0.05$ のときは、有意差があることにした。力データと触感データの場合は、結果は六つの数字として出るので、五つか六つが有意差であれば全体的に有意差として分析した。同じように、体温データは三つの数字で出るので、二つか三つの有意差の基準で一般的有意差として解釈した。

この実験では、センサ・データを補強するために、実験者がビデオから記述したさまざまなデータも使用した。結果を分析するために、ROSのvideo taggerを作成した。そのtaggerというのは、ロボットから得られたセンサ・データと実験者が記入したデータを揃える機能があるソフトである。実験者は、動画を見ながら、taggerで被験者についての情報(例えば、性別や、研究室との関係など)を入力することが出来る。

	力	触感	体温	目線
基本データ				
女性 X	+	-	-	-
男性				
西洋人 X			-	+
東洋人				
研究室メンバー X		-	-	+
メンバーじゃない人				
行為データ				
挨拶を返した人 X	+		+	+
返さなかった人				
ロボットと話した人 X		+	+	+
話さなかった人				
肯定的な発言 X		+	+	+
否定的な発言				
握手を諦めなかった人 X	+		+	+
諦めた人				

Fig. 3 Chart showing the trends of the data divided by group. Colors match trends in the sensor data to group divisions.

taggerは、どのビデオの時点で実験者の記述が行われたかを探知し、その記述を同時点のセンサ・データと符合させる。このtaggerを使って、被験者の基本情報と行為を記録する: 性別、研究室との関係、人種、ロボットとの目線(目を合わせたかどうか)、ロボットのお手振りとお辞儀に対する反応、ロボットに言った言葉、ロボットと話したかどうか、ロボットとの握手を途中で諦めたかどうか。図2でデータの構造と分析の流れ図が見られる。

5. 結果

この実験で人間のバイオフィードバックデータを測ることが出来た。性別、文化、などでロボットに対する感情的反応が異なるようだ。図3で結果の要約が見られる。統計の結果は、図4を参照のこと。

まず、「力」データを分析した。ロボットに挨拶を返した人は、返さなかった人よりも強かった。男性より、女性の方も握手が強かった。そして、握手を途中で諦めた人は、力が弱かった。強い力は、被験者の自信、つまりロボットとの心地良さを表しているだろうと思われる。

触感データにも傾向が出た。女性は男性より触感データが低く、研究室のメンバーも初めてロボットに接した人より低かった。逆に、ロボットと直接話した人、実験者にロボットについて肯定的な発言(「凄い」など)をした人は否定的な発言(「怖い」など)をした人より、ロボットにもっと強く触れた。以上の結果を見ると、高い触感データはロボットとの心地良さを表しているのではないかと思われる。女性の場合は、手の大きさ、握手の習慣などの違いが反映しているかもしれない。そして、研究室のメンバーの低い触感データは意外だが、既にロボットと何度も握手したので気軽な握手になったのかもしれない。それでも、次の実験では、触感データについてもっと調べるつもりである。

体温データの分析はさらに難しい。女性、研究室のメンバ

「力」データ： 女性 (18人) > 男性 (44人) : x: $t=4.71, p<0.001$; y: $t=8.00, p<0.001$; z: $t=3.16, p<0.001$; roll: $t=10.12, p<0.005$; pitch: $t=5.92, p<0.001$; yaw: $t=7.86, p<0.001$. 挨拶を返した人 (20人) > 返さなかった人 (14人) : x: $t=9.46, p<0.001$; y: $t=6.24, p<0.001$; z: $t=11.83, p<0.001$; roll: $t=10.62, p<0.001$; pitch: $t=8.20, p<0.001$; yaw: $t=4.41, p<0.001$. 握手を諦めた人 (5人) < 諦めなかった人 (57人) : x: $t=5.80, p<0.001$; y: $t=4.71, p<0.001$; z: $t=3.00, p<0.005$; roll: $t=2.63, p<0.01$, pitch: $t=6.65, p<0.001$; yaw: $t=2.09, p<0.05$

触感データ： 女性 < 男性 : tactile0: $t=10.53, p<0.0001$; 1: $t=13.81, p<0.0001$; 2: $t=10.40, p<0.0001$; 3: $t=11.65, p<0.001$; 4: $t=10.46, p<0.001$; 5: $t=12.13, p<0.001$. 研究室のメンバー (5人) < メンバーではない人 (57人) : tactile0: $t=3.24, p<0.005$; 1: $t=6.53, p<0.001$; 2: $t=4.94, p<0.001$; 3: $t=4.39, p<0.001$; 4: $t=4.47, p<0.001$; 5: $t=5.25, p<0.001$. ロボットと話した人 (10人) > 話していない人 (52人) : tactile0: $t=6.56, p<0.001$; 1: $t=5.50, p<0.001$; 2: $t=4.22, p<0.001$; 3: $t=4.82, p<0.001$; 4: $t=4.55, p<0.001$; 5: $t=5.63, p<0.001$. 肯定的な発言 (19人) > 否定的な発言 (13人) : tactile0: $t=7.44, p<0.001$; 1: $t=6.83, p<0.001$; 2: $t=5.94, p<0.001$; 3: $t=5.32, p<0.001$; 4: $t=6.75, p<0.001$; 5: $t=5.56, p<0.001$

体温データ： 女性 < 男性 : thermo0: $t=20.54, p<0.001$; 1: $t=17.60, p<0.001$; 2: $t=4.88, p<0.001$. 研究室のメンバー < メンバーではない人 : thermo0: $t=12.31, p<0.001$; 1: $t=13.02, p<0.001$. 挨拶を返した人 > 返さなかった人 : thermo0: $t=12.38, p<0.001$; 1: $t=9.03, p<0.001$; 2: $t=10.71, p<0.001$. ロボットと話した人 > 話していない人 : thermo0: $t=2.50, p<0.05$; 1: $t=2.55, p<0.05$. 握手を諦めた人 < 諦めなかった人 : thermo0: $t=18.47, p<0.001$; 1: $t=16.34, p<0.001$; 2: $t=7.95, p<0.001$. 肯定的な発言 > 否定的な発言 : thermo0: $t=6.52, p<0.001$; 1: $t=11.35, p<0.001$; 2: $t=2.95, p<0.005$. 西洋人 < 東洋人 : thermo0: $t=19.40, p<0.001$; 1: $t=16.76, p<0.001$

目線データ： 女性 < 男性 : $t=5.17, p<0.001$. 研究室の人 > メンバーではない人 : $t=10.13, p<0.001$. 挨拶を返した人 > 返さなかった人 : $t=7.11, p<0.001$. ロボットと話した人 > 話していない人 : $t=21.92, p<0.001$. 握手を諦めた人 < 握手を諦めなかった人 : $t=18.83, p<0.001$. 肯定的な発言 > 否定的な発言 : $t=15.55, p<0.001$. 西洋人 > 東洋人 : $t=16.27, p<0.001$

Fig. 4 The statistical values associated with the Independent Samples t-tests conducted on the sensor data for different subject groupings. The inequalities represent which group had significantly higher means.

一、西洋人は手の温度が低かった。そして、挨拶を返した人、ロボットと話した人、握手を諦めなかった人、ロボットに対して肯定的な発言をした人は、手の体温が高かった。前の研究では、高い体温がストレスを表していると思ったが、ロボットに好意的な人達の体温が高い結果を見ると、高い体温は興奮开心地良さを表しているのではないか。しかし、女性の場合は、身体的な条件の違い、西洋人の場合は、文化の違いなどから、良いに結論は出せない。

最後に、目線も分析した。男性、研究室のメンバー、西洋人の方がよく目を合わせた。この結果は、相互交流の文化の違いを表しているだろう。行為のデータを見ると、握手を返した人、ロボットと話した人、握手を諦めなかった人、肯定的な発言をした人の方は、ロボットと目を合わせ、それはロボットとの心地良さを表していると思われる。

以上のセンサ・データの結果は、人間のロボットに対する印象を説明する様だ。性別、国籍については、さらに研究が必要である。しかし、行為に関しては、今回のセンサ・データがある程度の結論を出している。ロボットに対して良い印象を持った被験者は、高い握力、高い触感、高い体温、長い目線のカテゴリーに入る様である。

6. おわりに

本論文は、センサ・データをバイオフィードバックとしての分析の仕方、HRI 研究での使い方を提案している。以上の結果は被験者のロボットに対しての深い感情まで分からなかったが、HRI 研究の一つの可能性を示したものである。このデータだけでは、性別、文化などのロボットに対しての違いは言えないが、何らかの測定できる差があることが分かる。これからの研究で、この差の心理的な根拠を調べるつもりである。それで、他の実験環境、タスク、被験者グループで調べるのも必要かと思われる。今後、心理的現象をもっと深く分析す

るために、被験者一人ずつの長い実験をさせる予定である。

この実験で使った方法論の展開も可能である。この実験では、人間の力、触感、体温、目線、行為だけを測ったが、他のバイオフィードバック的な観察もあるだろう。次の実験で、皮膚通電 (ストレスと関係ある手の汗)、声量、被験者が手を動かす速度、ロボットの手だけでなく、ロボットの体全体の触感を測定するつもりだ。

まだ新しい研究分野、方法論だが、未来のロボット・人間相互作用を大幅に改善する一歩となれば幸いである。

謝辞

本論文を作成するにあたり、エール大学の Fox International Fellowship と Gordon Grand Fellowship から、支持を賜りました。ここに感謝の意を表します。

文献

- [1] Brown, B.B. 1977. *Stress and the art of biofeedback*. Harper & Row: New York.
- [2] Bainbridge, W.A., Nozawa, S., Ueda, R., Kakiuchi, Y., Nagahama, K., Okada, K. and Inaba, M. 2011. "Understanding Expectations of a Robot's Identity Through Multi-User Interactions," *Proceedings of the Human Robot Interaction 2011: Workshop on the role of expectations in intuitive human-robot interaction* (Lausanne, Switzerland, March 6 - 9, 2011).
- [3] Aquest. 2010. AquesTalk - Text-to-speech synthesis middleware. Retrieved October 1, 2010 from: <http://www.a-quest.com/download/index.html>.
- [4] Baker, L.M. and Taylor W.M. 1954. The relationship under stress between changes in skin temperature, electrical skin resistance, and pulse rate. *Journal of Experimental Psychology*. 48, 5 (1954).
- [5] Mittelmann, B. and Wolff, H.G. 1939. Affective states and skin temperature: experimental study of subjects with "cold hands" and Raynaud's Syndrome. *Psychosomatic Medicine*. 1: 271-292.
- [6] Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B. P., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., Wheeler, R. and Ng, A. Y. 2009. ROS: an open-source robot operating system. In *ICRA Workshop on Open Source Software*, 2009.
- [7] Matsui, T. and Inaba, M. 1990. Euslisp: an object-based implementation of Lisp. *Journal of Information Processing*. 13, 3 (1990).