

家庭用ロボットのための触覚インタフェース

5B-3

納谷 太 大和 淳司 篠沢 一彦

NTTコミュニケーション科学基礎研究所

E-mail:{naya,junji,shino}@cslab.kecl.ntt.co.jp

1. はじめに

近年、ロボットがブームである。Furbyをはじめ、ペット型のロボットが関係各社から次々に発表されており、ロボットは家庭にとって身近な存在となつつある。では、近い将来、このようなロボットと人とのコミュニケーションの形態はどのようなものになり得るであろうか?

われわれは、人と自然にコミュニケーションできる能力に焦点を当てた、コミュニケーションロボットプロジェクトを現在進めている。この研究プロジェクトの目的は、従来の産業用ロボットなどのいわゆる道具としてのロボットというよりは、自然言語で会話するような高度な能力はないが、いわばペットのような存在として人とコミュニケーションできるロボットを実現することである。

われわれは、この研究の一貫として、去る1999年2月に、新宿初台にある東京オペラシティ内のNTT InterCommunication Center(ICC)にて、「進化するロボットとの共生」*[1]という実験を行った。実験内容は、メディアアーティストであるヤノベケンジ氏が、1台のロボットと共に1部屋に閉じ込められ、外界と遮断された状態で6日間過ごす過程において、人とロボットのコミュニケーションの形態を観察するというものである。ロボットは、視覚処理によるカラートラッキング、マイクによる音源の定位、半導体圧力センサによる人の「なでる」と「たたく」動作の識別と、それらの結果に応じた腕および尻尾による行動生成などの機能を有する。このロボットは、音声認識や音声合成による自然言語を介したコミュニケーション機能はないが、人の声のピッチを

まねて発声する仕組 MiMIC[2]を持つ。

この実験を通じて、ロボットと人とのインタラクションの中でも、特に「触れ合う」ことが非常に重要なコミュニケーション形態であることが分かってきた。将来の家庭用ロボットの機能として、従来の音声や画像だけではなく、「触れ合い」を通じて人の状態や行動を認識することは非常に重要である。そこで我々は、この「触れ合い」によるコミュニケーションに焦点を当て、人の触行動を識別する実験を行った。本稿では、ロボット用触覚インタフェースによる人の触行動識別手法と実験について報告する。

2. ロボットのための触覚インタフェース

触覚は、視覚や聴覚といった非接触の感覚と比べ、センシングとアクチュエーションの2面性があり、ロボットが人の状態や行動を認識するのに必要なだけでなく、ロボット自身が人に対して何らかの行動を働き掛ける際にも必要不可欠な感覚である。

このような人とロボットとの物理的な接触を伴うインタラクションを考えた場合、ロボットの全身に触覚センサが装着されていることが望ましい。しかしながら、従来の触覚デバイスの研究事例では、ロボットハンドの指先に圧電素子を装着したものや、歪みゲージ等を利用した力覚センサなど[3, 6]が大半であり、ロボット全身を覆うほどの広範囲で柔構造の圧力センサはあまり例を見ない。

数少ない事例として、稲葉らは、電気伝導性の布をヒューマノイド型ロボットに実装している[4]。この電気伝導性の布は、柔構造であり、ロボットを全身を覆う192個のバイナリスイッチとして働く。センサ信号は、ロボットのカメラ画像にスーパーインポーズされ、ビデオレート(30[Hz])での処理が可能になっている。人がロボットの肩を触っている例や、

"A Haptic Interface for a Personal Robot"
Futoshi Naya, Junji Yamato and Kazuhiko Shinowaza
NTT Communication Science Laboratories
2-4, Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto, 619-0237, JAPAN

*http://www.ntticc.or.jp/special/robot/events/ws2_j.html

ロボットが両手でボールを掴んでいる例が紹介されている。

別の事例では、柴田らがペット型ロボットに触覚センサを利用している[5]。この触覚センサは、風船がつながれた半導体圧力センサを使用しており、人に対する手触りを重視して設計されている。使用例として、人の「たたく」「なでる」といった触行動のセンシングパターンについて紹介されているが、これらの行動の識別に関する詳細については述べられていない。

また、「くすぐる」などのより微妙な触行動を識別するためには、触覚センサの測定性能は、高い空間分解能および圧力値スケール分解能が必要であり、かつ、高速なサンプリングレートが必要である。

そこで本稿では、上記の要求を満す触覚センサとして、感圧抵抗変化性インクを用いたセンサシートを用いる。このセンサシートは、非常に薄くて柔構造であり、高いサンプリングレートと空間分解能を持つセンサである。次節では、このセンサシートを用い、「たたく」「なでる」といった5種類の触行動の識別実験について述べる。さらに、実験によって得られたデータを基に、識別に要する特徴ベクトルとして、1) 圧力データの絶対値、2) 圧力データの時間変化を用い、それぞれの特徴ベクトルによる触行動の識別結果について述べ、「くすぐる」「なでる」といった微妙な触行動パターンが精度良く識別できることを示す。

3. 実験

3.1 実験系概略

実験で使用したセンサシート(ニッタ(株), I-SCANシリーズ)を図1に示す。センサのPCとのインタフェースはISAバスである。センサシートのセンサ部は、サイズが $16.5 \times 16.5[\text{cm}^2]$ 、厚さ約 $0.3[\text{mm}]$ であり、 $44 \times 44 = 1936$ 個のグリッドに分割されている。従って、1グリッドあたりのピッチは、縦横ともに $3.75[\text{mm}]$ である。測定圧力レンジは、 $0.2 - 2.0[\text{kgf}/\text{cm}^2]$ である。圧力値は、最大 $127[\text{Hz}]$ のフレームレートで測定でき、1フレーム当りの圧力分布は256階調の raw

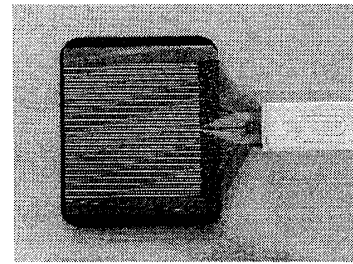


図1: センサシート (ニッタ(株), I-SCAN).

データ配列として出力される。以下では、時刻 t フレームでの圧力分布を $F_{ij}(t)$ ($1 \leq i, j \leq 44$) で表すことにする。

3.2 触行動と実験

識別の対象となる人の触行動については、「強く(平手で)たたく」「軽く(平手で)たたく」「ひっかく」「なでる」「くすぐる」の5つの行動とした。

被験者は男女11人(男性6人, 女性5人)であり、各被験者に対して、上記5つの行動をそれぞれセンサシートに対して繰り返すよう指示を与えた。各行動でのセンサ圧力データは、それぞれフレームレート $120[\text{Hz}]$ で5秒間記録された。「強くたたく」のサンプルシーケンスを図2に示す。図2から、「強くたたく」による圧力値の急峻な変化を十分検出できていることが分る。

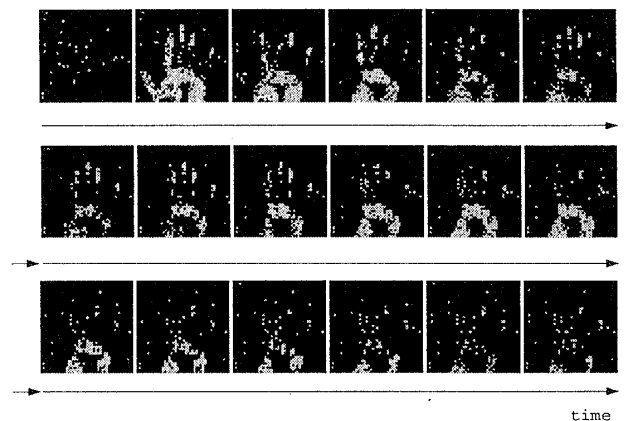


図2: 「強くたたく」の圧力データ時系列パターンの例。(1 frame = $1/120[\text{sec}] \approx 8.3[\text{msec}]$)

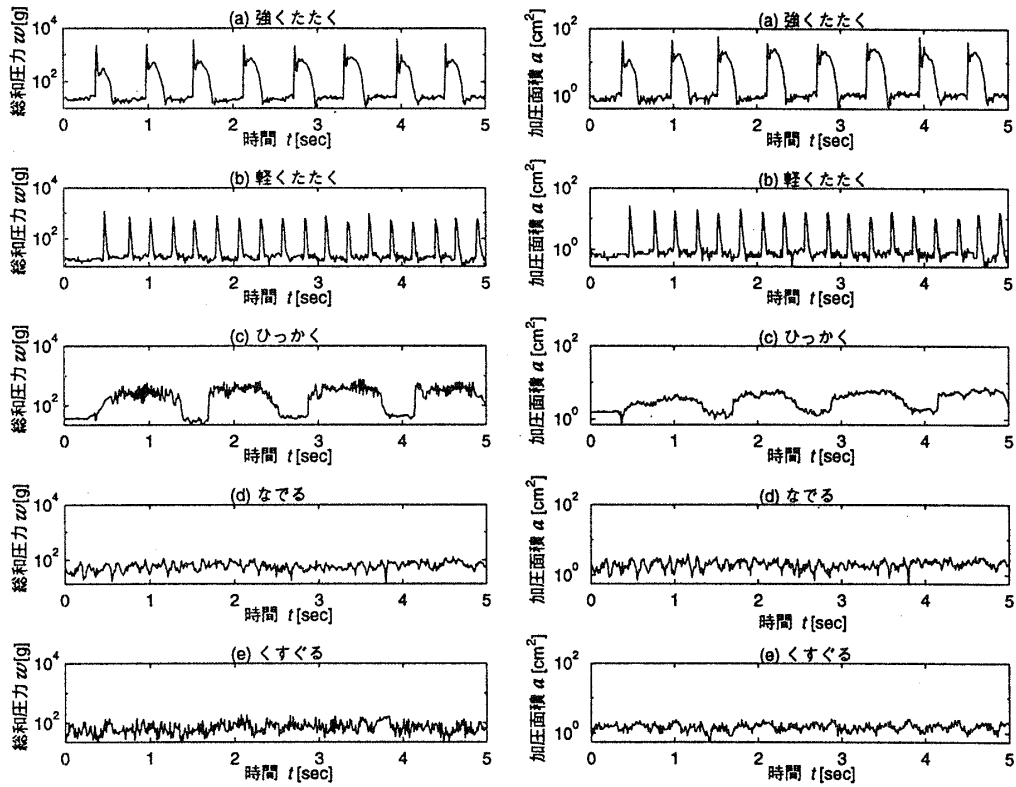


図 3: 男性の触行動による総和圧力および加圧面積の変化の例。

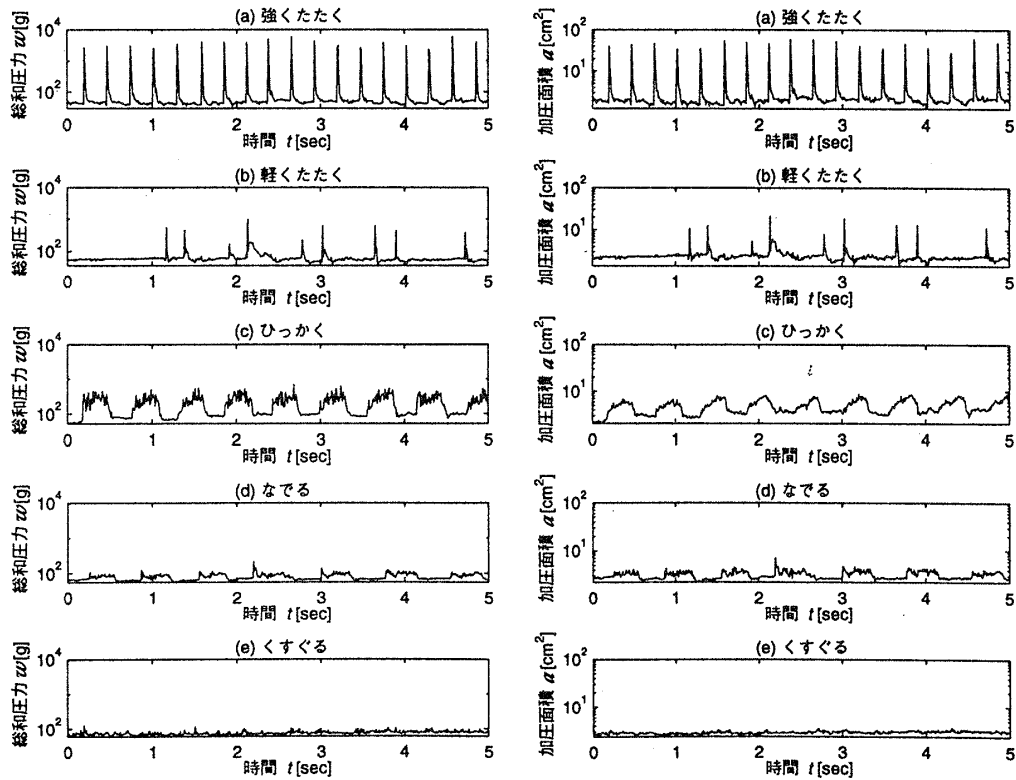


図 4: 女性の触行動による総和圧力および加圧面積の変化の例。

3.3 触行動識別のための特徴量の選択

人の触行動をリアルタイムで識別するためには、識別のために用いる特徴量を抽出するプロセスは、相関処理やパターン照合などの繰り返しによる処理ではなく、比較的単純に求められる特徴量であることが望まれる。そこで、圧力分布の基本特徴量として、以下の2つを用いる。

1. $w(t)$: 時刻 t フレームにおける総和圧力。

$$w(t) = \sum_i \sum_j F_{ij}(t) \quad (1 \leq i, j \leq 44) \quad (1)$$

2. $a(t)$: 時刻 t フレームにおける加圧面積。

$$a(t) = \sum_i \sum_j b_{ij}(t) \quad (1 \leq i, j \leq 44) \quad (2)$$

ここで、

$$b_{ij}(t) = \begin{cases} 1, & \text{for } F_{ij}(t) \geq f_{thresh} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

ここで、 $b_{ij}(t)$ は、時刻 t フレームにおける圧力分布の二値化イメージに相当する。また、 f_{thresh} は、ノイズ除去を目的とした有効圧力値を判定するための閾値であり、センサが無負荷状態での F_{ij} を測定することにより決定する。

図3および図4に、それぞれ男性・女性の触行動による総和圧力および加圧面積の時系列変化を示す。各図において、左カラムは、5種類の触行動による総和圧力の変化 $w(t)$ であり、右カラムは、各触行動に対応する加圧面積の変化 $a(t)$ である。各図において、5秒間のうちに各触行動が何度か繰り返されている。

予想されるように、同じ触行動でも人によって触り方のパターンが異なることが図3, 4から見て取れる。例えば、「たたく」による圧力変化は、圧力値や面積変化の急峻な立ち上がりという点では共通の特徴が見られるが(図3(a)(b)と図4(a)(b))、「なでる」「ひっかく」などの行動では、人や状況によって触り方が異なり、センサに常に触れながら交互に繰

り返すか(図3(d))、1方向に触っては離す行動を繰り返すか(図4(d))といった違いがある。

図3および図4から、「強くたたく」「軽くたたく」や、「ひっかく」「なでる」のいくつかは、各行動に固有の圧力変化パターンがあるように思われる。しかしながら、同じ触行動の圧力変化においても、個人差や状況に応じて生ずる以下の違いを吸収する必要がある：

1. 各触行動の時間区間と頻度の違い
2. 各触行動の運動方向と運動の大きさの違い

従って、識別プロセスは上記の違いに影響を受けない特徴量を選択する必要がある。本稿では、そのような特徴量として、1) 総和圧力および加圧面積の絶対値と、2) 総和圧力および加圧面積の時間変化に関する特徴量を用いる。以下の節では、各特徴量に基づく触行動の識別性能について詳しく述べる。

4. 人の触行動の識別

4.1 圧力値のピークによる識別

図3, 4に示した通り、触行動ごとに、圧力値および面積のレンジがあると考えられる。そこで、一つの触行動の特徴量として、総和圧力のピーク $w_{peak}(t)$ と、その時点での加圧面積のピーク $a_{peak}(t)$ を特徴量として選択した。ピークは、時間区間を 30 frame(250[msec]) とし、その間での総和圧力の閾値 50[g] を越える点として検出した。

各被験者の各触行動に対してピークが複数検出されるため、全ピーク数の平均値を一人の被験者の一つの触行動の代表特徴点とした。結果を図5に示す。

図5において、各点が一人の被験者の一つの触行動の代表点に相当する。表1に、11人の被験者全体の各触行動の総和圧力および加圧面積の平均値および標準偏差を示す。

これらのデータを識別するために、 k -Nearest Neighbor (k -NN)法を用いた識別器を構成した。また、この識別器の識別性能を評価するために、学習用データと識別用データを構成する手法として、leaving-one-outを用いた。各触行動の識別率を表2に示す。

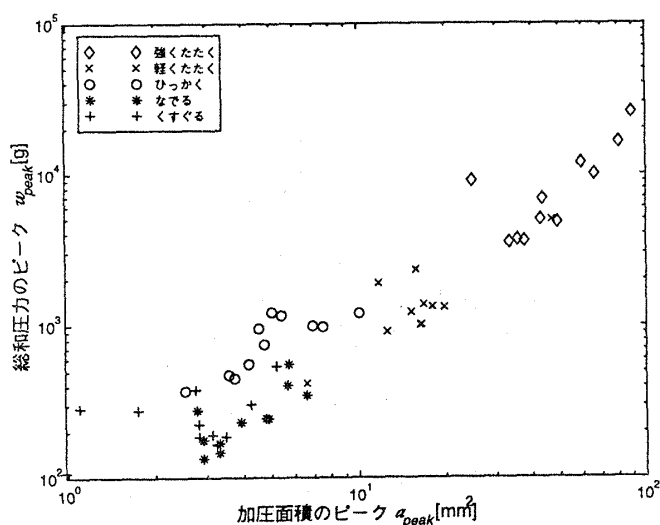


図 5: 総和圧力および加圧面積を特徴量とした場合の5つの触行動の特徴空間上での分布。

触行動	\bar{w} [g]	σ_w [g]	\bar{a} [mm ²]	σ_a [mm ²]
強くたたく	9112.3	6879.0	51.3	20.4
軽くたたく	1608.2	1210.9	17.9	10.3
ひっかく	828.0	318.1	5.3	2.0
なでる	266.5	127.0	4.3	1.3
くすぐる	259.0	121.0	2.9	1.3

表 1: 各触行動の総和圧力・加圧面積の平均値および標準偏差。

触行動	強くたたく	軽くたたく	ひっかく	なでる	くすぐる
識別率(%)	100.0	81.8	90.9	36.4	27.3

表 2: 各触行動の k-NN 法による識別率。

図 5 および表 2 より明らかなように、「強くたたく」「軽くたたく」「ひっかく」の3つの行動に関しては比較的精度良く識別できているが、「なでる」「くすぐる」の2つの行動に関しては、総和圧力のピーク、および加圧面積のピークの特徴量を用いた場合、特徴空間上で両者は非常に似通った分布となり、識別率が低くなっている。

「なでる」と「くすぐる」を比較した場合、「なでる」の場合は、1回の「なでる」動作の開始時において、総和圧力および加圧面積の変化は比較的大きいと考えられるが、「くすぐる」の場合、総和圧

力および加圧面積の変化は少ないと予想される。この両者を識別するためには、時間変化を用いた特徴量を導入する必要がある。

4.2 圧力値の時間変化を用いた識別

圧力データの時間変化として、総和圧力および加圧面積の時間変化を以下のように定義する。

- $\delta w_{peak}(t)$: 時刻 t および $t-1$ の間での正規化した総和圧力変化

$$\delta w_{peak}(t) = \frac{\sum_i \sum_j |F_{ij}(t) - F_{ij}(t-1)|}{\sum_i \sum_j F_{ij}(t)} \quad (3)$$

ここで t は、総和圧力 $\sum_i \sum_j F_{ij}(t)$ がピークとなる時刻とする。

- $\delta a_{peak}(t)$: 時刻 t および $t-1$ の間での正規化した加圧面積変化

$$\delta a_{peak}(t) = \frac{\sum_i \sum_j |b_{ij}(t) - b_{ij}(t-1)|}{\sum_i \sum_j b_{ij}(t)} \quad (4)$$

ここで t は、式(3)と同様、総和圧力 $\sum_i \sum_j F_{ij}(t)$ がピークとなる時刻である。

総和圧力および加圧面積の時間変化は、それぞれピーク時の値で正規化することにより、絶対値による変動を吸収している。

図 6 に、上記の総和圧力変化および加圧面積変化を特徴量とした場合の、11人の「なでる」と「くすぐる」の特徴空間上での分布を示す。Fisher の線形識別手法により、これらの2つの触行動が 100% 識別できた。この結果、上記2段階の特徴量による識別手法を組み合わせることにより、5クラスの触行動で平均 94.5% の識別率が得られた。

5. おわりに

本稿では、将来の家庭用ロボットに必要不可欠と思われる触覚コミュニケーション能力において、ロボット用触覚センサを用いた人の触行動の識別実験について述べた。

実験は、触覚センサとして感圧抵抗変化性インクシートを用い、男女合わせて11人の被験者に対して、

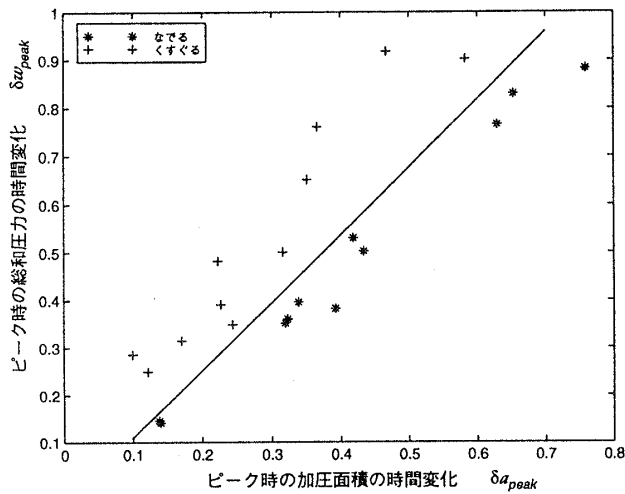


図 6: 総和圧力変化および加圧面積変化を特徴量とした場合の「なでる」と「くすぐる」の特徴空間上での分布。

「強くたたく」「軽くたたく」「ひっかく」「なでる」「くすぐる」の5つの触行動を取ってもらい、圧力データを収集した。次に、これらの5種類の触行動に対して、実時間で識別するための特徴量を定義し、各特徴量による識別結果を示した。

「強くたたく」「軽くたたく」「ひっかく」の3種の行動に関しては、粗い特徴量として、圧力センサに加わる総和圧力および加圧面積のピーク値を選択することにより、精度良く識別できることを示した。また、「なでる」「くすぐる」のような、より微妙な触行動に対しては、上記総和圧力および加圧面積の時間変化を特徴量とすることにより、識別できることを示した。これらの特徴量は計算コストが少ないため、実時間での識別が可能である。

われわれは現在、物理的なインタラクションを通して、ヒトと自然なコミュニケーションを取ることができるコミュニケーションロボット(図7)の研究を行っている。今後、本ロボットの全身にセンサシートを実装し、人の触行動を識別させることにより、その識別結果と人の感情との対応の評価、および、ロボット自身の行動生成における強化学習などの研究を行っていく予定である。

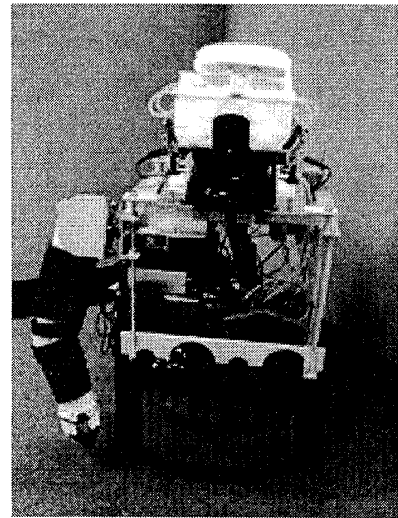


図 7: コミュニケーションロボット(Kenzo)。

参考文献

- [1] 「進化するロボットとの共生」, NTT ICC 「共生する/進化するロボット展」, Workshop 2, 2/23-2/28, 1999.
- [2] 石井, 鈴木, 岡田, “ユーザにあわせるインタラクションの学習”, 第14回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム, pp.83-88, Sep 1998.
- [3] E. Cheung and V. Lumelsky, “Development of sensitive skin for a 3D robot arm operating in an uncertain environment,” *Proceedings of the IEEE International Conference on Robots and Automation, (ICRA '89)*, pp. 1056-1061, 1989.
- [4] M. Inaba, Y. Hoshino, K. Nagasaka, T. Ninomiya, S. Kagami, and H. Inoue, “A Full-Body Tactile Sensor Suit Using Electrically Conductive Fabric and Strings,” *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (IROS'96)*, pp. 450-457, 1996.
- [5] T. Shibata, M. Yoshida, and J. Yamato, “Artificial Emotional Creature for Human-Machine Interaction,” *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'97)*, pp. 2269-2274, 1997.
- [6] J. Son, E. A. Monteverde, and R. D. Howe, “A tactile sensor for localizing transient events in manipulation”, *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '94)*, pp. 471-476, 1994.