ファジィプロダクションルールによる 三軸触覚センサ装着ロボットハンドを用いた触覚認識*

大岡 昌博^{*1}, 竹内 修一^{*2}, 三矢 保永^{*3}

Tactile Recognition Based on Fuzzy Production Rules Using Robot Hand Equipped with Three-Axis Tactile Sensors

Masahiro OHKA, Shuichi TAKEUCHI and Yasunaga MITSUYA

The tactile image resulting from touching depends on contact conditions arising between the tactile sensor and the object. Moreover, tactile recognition is usually concluded such fuzzy linguistic expressions as "This object is very hard" or "The object is rather soft," which are well adaptable to fuzzy theory. An inference system using fuzzy production rules can quantify the fuzziness involved in the tactile image data and employ the fuzzy linguistic expressions for tactile recognition. The present tactile recognition system has been implemented by utilizing fuzzy production rules and LISP functions for manipulating the fuzzy set. Two kinds of experiments of hardness and shape recognition are performed using a robot hand equipped with three-dimensional tactile sensors. One is calibration tests which adjust membership functions using seven standard specimens for hardness and five for shape, respectively. The other is verification tests using unknown specimens which are similar to standard ones. Since it is found that the present system is capable of recognizing these standard and unknown specimens, the inference method using fuzzy production rules is effective for tactile recognition.

Key Words: Mechatronics and Robotics, Fuzzy Set Theory, Expert System, Tactile Recognition Experiment, Production Rule, Three-Axis Tactile Sensor, Robot Hand

1. 緒 言

触覚による物体の硬さ・形状の認識は、ロボットの知能化を進める上で有用な情報処理の一つである^{(1)~(3)}。しかし、これまで触覚には、視覚におけるCCDカメラのような実用性の高い視覚デバイスが存在しなかったため、触覚認識の研究は視覚認識ほど進展していない⁽²⁾。しかし、感圧導電ゴム⁽⁴⁾⁽⁵⁾、シリコンウェーハ^{(6)~(8)}および光導波路^{(9)~(11)}などを用いた触覚センサが試作されるようになっており、今後、これらのセンサを用いて触覚認識の研究が進むことが期待される。

触覚認識の研究を行う場合、すでに研究の進められている視覚情報処理の手法⁽¹²⁾⁽¹³⁾を触覚情報処理にそのまま応用できれば都合がよい。しかし、触覚認識は物体とセンサとが直接接触して実行されるため、視覚とは異なった情報処理が必要になる。すなわち、取得された触覚情報は、物体の表面状態と把持状態に依存するため、視覚認識に比べて分解能や再現性に劣る。

このため情報があいまいになりやすい。さらに触覚認識の結論には“この物体は、大きい”あるいは“この物体は、硬い”などあいまいな表現を用いる場合が多い。したがって触覚認識においては、あいまいな情報とあいまいな表現を合理的に扱う認識システムが必要となる。

一方、あいまいな情報に基づく認識を計算機に実行させる方法として、最近注目されているファジィプロダクションシステム^{(14)~(16)}は、あいまいな入力データを処理できる上に、前述のあいまいな表現をファジィ述語としてルール上で表すことができるため、触覚認識との適合性が高い知識処理といえる。

しかし、これまでファジィプロダクションシステムを触覚認識に応用した例はなく、同システムがどの程度有効であるか明らかにされていない。同システムをベースにして新しい触覚認識システムを構築するためには、実際に適用してその有効性を明らかにする必要がある。

そこで本研究では、ファジィプロダクションシステムを触覚認識システムへ発展させるための第一段階として、触覚認識におけるファジィプロダクションシステムの有効性を実験的に確認することを目的とする。このため、従来の人工知能の技法が容易に適用できる

* 原稿受付 1994年9月20日。

^{*1} 正員, 静岡理科大学 (〒437 袋井市豊沢 2200-2)。

^{*2} 名古屋大学大学院 (〒464-01 名古屋市中区千種区不老町)。

^{*3} 正員, 名古屋大学工学部。

LISP 言語を用いてファジィプロダクションシステムを構築する。また触覚情報から対象物体の硬さと接触面形状を合理的に抽出するため、前報⁽¹⁷⁾で導入した特徴パラメータに加え、本報ではさらにいくつかの新しいパラメータを導入する。さらに、これらの特徴量の値と帰結言明の関係を記述した IF-THEN ルールベースを作成する。以上の認識システムの妥当性を明らかにするため、三軸触覚センサを装着したロボットハンド⁽¹⁷⁾を用い、物体の硬さと接触面形状の認識実験を実施する。実験では、硬さと接触面形状に関する基本試験片を用いてファジィ述語を表すメンバシップ関数を較正した後、基本試験片以外の未知試験片を用いてファジィ推論を行う。以上の推論結果から、触覚認識におけるファジィプロダクションシステムの有効性と適用限界を明らかにする。

2. 特徴量の抽出方法

2.1 三軸触覚センサ装着ハンド 物体間の接触面に生じる応力はベクトルで表されることから、接触情報を正確に知るためには、三軸の力分布を検出することが理想的である。本研究では、三軸力検出が可能なセンサ素子を 6 (素子の列数: m) $\times$ 15 (素子の行数: n) 個のマトリックス状に配した三軸触覚センサを 2 本の指に装着したロボットハンド⁽¹⁷⁾を用いる。このハンドは、図 1 に示すように平行指形であり、把持した物体の硬さや物体の転がりやすさを調べることができるように両指の開閉と片指のスライド動作が可能である。指部に装着した三軸触覚センサから検出される情報の総数は、 $6 \times 15 \times 3$ (力の 3 成分) $\times$ 2 (センサの個数) = 540 個となる。視覚情報処理⁽¹²⁾⁽¹³⁾では、前処理として視覚のイメージ情報から図形の特徴パラメータを計算することが行われている。本研究においても、同様な前処理方法を採用するが、触覚の場合は

力分布をイメージ情報として検出するため、視覚で用いられている特徴パラメータそのまま用いることはできない。そこで、以下では上述の触覚のイメージ情報から硬さと接触面形状に関する特徴パラメータの関係式を導入する。

2.2 硬さ 前報⁽¹⁷⁾では、硬さのパラメータとして従来より使用されてきたばね定数に加えて、除荷・負荷時のばね定数比と相当ポアソン比を用いれば、弾性体、塑性体およびポーラス性のある物体の判別が可能であることを明らかにした。そこで本研究においても、これらの 4 種類の特徴パラメータを選定した。それぞれを表 1 に示す。ここで、 m , n は図 2 に示すようにセンサ素子の列と行の総数を表し、また T_{xij} , T_{yij} および T_{zij} は、それぞれ i 列 j 行めの素子に作用している力の X , Y および Z 方向成分を表す。力の向きは、それぞれセンサの幅、長さおよびセンサ面の下向き方向にとるものとする。以下に表 1 で定義した特徴パラメータの意味を説明する。

いま、ハンドが時刻 $t_c - 1$ において物体を把持した状態を初期状態とし、時刻 t_c において物体に最大の

表 1 硬さに関する特徴パラメータ

Parameter	Formula
Stiffness coefficient for loading, k_l	$\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{T_{xij}(t_c) - T_{xij}(t_c - 1)\}}{\Delta l_l}$
Stiffness coefficient for unloading, k_u	$\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{T_{xij}(t_c) - T_{xij}(t_c + 1)\}}{\Delta l_u}$
Ratio of loading stiffness coefficient to unloading, r_s	k_l/k_u
Equivalent Poisson's ratio, r_p	$\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (T_{xij}^2 + T_{yij}^2)^{1/2}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_{zij}}$

図 1 触覚センサ装着ハンド

図 2 センサ素子の配列

負荷を加えその後除荷するものとする。すなわち、時刻 t_c-1 から時刻 t_c の間にハンドを Δl_i だけ閉じ、ついで時刻 t_c から時刻 t_c+1 の間にハンドを Δl_u だけ開く動作を考える。完全弾性体であれば、負荷時と除荷時のばね定数 k_i , k_u は一致し、両者の比 $r_p=k_i/k_u$ は 1 になるが、非弾性特性をもつ物体の場合には 1 より小さくなる。また、相当ポアソン比 r_p は、垂直力に対する平面力の合計値であり、ポアソン比に相当する量である。

2・3 接触面形状 センサと物体との接触面では、点、線、面の順番に、把持物体の自由度の拘束が大きくなり、把持の安定性が向上する。このような安定性の判定には、基本的な接触面形状として点、エッジ、平面、円筒面、球面を判定する必要がある。これらをより精密に判定するため、前報⁽¹⁷⁾で示した 4 種類の特徴パラメータに加えて、ここでは縦横比 r_{xy} 、分布度 b_x , b_y 、および b_x と b_y の比 r_b の 4 種類を新しく考案した。本研究で用いた特徴パラメータをまとめると表 2 の 8 種類になる。

接触面積 S は接触が点接触か、それ以外かを区別する上で必要である。なお、表中の a はセンサ素子の受圧部の面積を表す。また、 Q_{ij} は設定したしきい値より小さければ 0、それ以上であれば 1 の値を出力する関数である。

接触パターンの円形の度合を評価するため、円形度 r_d と縦横比 r_{xy} を用いる。円形度 r_d は、接触パターンの一次モーメントの最大値 $I_{\max}$ 、最小値 $I_{\min}$ および接触面積によって求まり、真円の場合に最小値 $1/2\pi$ で、形状が細長いほど大きい値となる⁽¹³⁾。縦横比 r_{xy} は、接触パターンに外接する長方形の辺の長さ l_x , l_y を用

い表中の式に従って計算する。

表中で定義されている T_{xij} と T_{yij} の分布度 b_x と b_y は、接触開始時の形状を点、エッジおよび平面の 3 種類に弁別するために新しく導入したパラメータである。軟質のゴムなどで作成された円すいの頂点が接触する場合、低い押付け力のときには点接触で、押付け力の増加に伴って接触面積が増大する。このようにして得られた接触面内に発生するせん断力の大きさは、これと同一面積の平面が接触する場合に比べて小さい。このため、点接触から接触が開始する場合には b_x と b_y ともに小さい値から増大していくことになる。エッジが接触する場合には、エッジの向きが X 軸方向に沿う場合には b_x のみが、 Y 軸方向に沿う場合には b_y のみが大きい。さらに曲率半径の大きな円筒面と平面を区別するために両者の比 r_b を用いる。曲率半径の大きな円筒面の場合には r_b の値は 1 より小さく、平面でその接触パターンが正方形の場合には $r_b=1$ である。

球面など回転の可能性のある形状を区別するため、物体を転がしたときの接触パターンの重心の移動量 s_g とそのときの摩擦係数 f_r を用いる⁽¹⁷⁾。なお、 s_g 中の X_G , Y_G は圧力重心の座標であり、次式で求まる。

$$X_G = \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{1/2 + (i-1)\} \Delta l T_{xij} \right] / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_{xij} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$Y_G = \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{1/2 + (j-1)\} \Delta l T_{yij} \right] / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_{yij} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 Δl はセンサ素子間のピッチを表す。

3. ファジィプロダクションルールによる推論方法

3・1 ファジィ集合処理システム LISP は人工知能言語として広く使用されており、従来のプロダクションシステム⁽¹²⁾⁽¹³⁾などの人工知能の技法を併せて使用できる利点がある。このため、本システムは LISP によるファジィ集合処理システム⁽¹⁸⁾を適用して構築した。このシステムでは、ファジィ集合 F を次式のように中カッコ $\{ \}$ のリスト構造を用いて表現する。

$$F = \{g_1/e_1, \dots, g_i/e_i, \dots, g_n/e_n\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで g_i と e_i ($i=1, 2, \dots, n$) はそれぞれグレード値と要素を表す。なお、 $g_i=1.0$ の場合、 g_i を省略した次の簡易表現を用いる。

$$F = \{e_1, \dots, e_i, \dots, e_n\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

このシステムでは和・積集合など約 70 種類のファジィ集合演算子が利用でき、LISP 関数の呼出し形式で

表 2 接触面形状に関する特徴パラメータ

Parameter	Formula
Contact area, S	$a \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Q_{ij}$
Degree of circular, r_d	$\frac{I_{\max} + I_{\min}}{S^2}$
Aspect ratio of rectangular pattern, r_{xy}	$\frac{\max(l_x, l_y)}{\min(l_x, l_y)}$
Degree of T_{xij} distribution, b_x	$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_{xij} $
Degree of T_{yij} distribution, b_y	$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_{yij} $
Ratio of T_{xij} distribution to T_{yij} , r_b	$\frac{\min(b_x, b_y)}{\max(b_x, b_y)}$
Displacement of contact pattern, s_g	$\frac{\{[X_G(t) - X_G(t - \Delta t)]^2 + [Y_G(t) - Y_G(t - \Delta t)]^2\}^{1/2}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_{xij} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_{yij}}$
Friction coefficient, f_r	$\frac{\{(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_{xij})^2 + (\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_{yij})^2\}^{1/2}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_{xij}}$

実行できる。

3.2 ファジィプロダクションルール 図3にファジィプロダクションルールの基本単位を示す。図のように、IF節とTHEN節で構成され、それぞれ前提言明と帰結言明が記述されている。以下ではこの基本単位をルール要素と呼ぶことにする。前提言明には、硬さと接触面形状の推論に必要な特徴パラメータとそのファジィ述語の関係を記述する。帰結言明には、接触面から取得した情報によって得られる硬さと接触面形状を示す結論を記述する。

作成したルールの概要を以下にまとめる。まず、硬さ認識用として以下の2種類を構築した。

ルールA：ばね定数比 r_s と相当ポアソン比 r_p からゴム、油粘土およびスポンジの3種類の材質を判定する。

ルールB：ばね定数 k_t の値とルールAの結果から7種類の基本試験片の材質を判定する。

また、接触面形状用として、以下の4種類を構築した。
ルールC：分布度 b_x 、 b_y および縦横比 r_{xy} から、接触の開始が点、エッジおよび面のいずれかであるかを判定する。

ルールD：接触面積 S 、円形度 r_d および分布比 r_b と、ルールCの結果から接触面形状を点、エッジおよび平面の3種類に判定する。

ルールE：接触パターンの重心の移動量 s_g と摩擦係数 f_r から接触面の転がり状態を判定する。

ルールF：ルールC、DおよびEの結果から5種類の基本的な接触面形状を判定する。

以上6種類のルールに含まれるルール要素の総計は約60である。

次に、具体例として硬さ判定用のルールAと接触面形状判定用のルールCを図4に示す。まず、前述の硬さの特徴パラメータであるばね定数比 r_s と相当ポアソン比 r_p からゴム、油粘土およびスポンジの3種類の材質を判定するルールAを図4(a)に示す。これらの材質は、ばね定数比によって弾性体と非弾性体に弁別でき、さらに非弾性体の場合、相当ポアソン比によって油粘土とスポンジに弁別できる。例えば、 a_1 番のルール要素は、“ r_s が約1であれば、物体はゴムで

ある”を意味している。同様に a_2 番のルール要素は、“ r_s が約1でなくかつ r_p が小さければ、物体はスポンジである”を意味している。

次に、接触面形状の特徴パラメータである b_x 、 b_y および r_{xy} から、点、エッジおよび面の接触状態を判定するルールCを図4(b)に示す。例えば b_1 番のルール要素では、“ b_x が小さくかつ b_y が小さければ、力分布は点接触の開始を意味している”となる。

3.3 推論方法

2章で導入した特徴パラメータ

```
(a1 (IF (r_s about-1))
      (THEN (object is rubber)))
(a2 (IF (r_s not-about-1)
      (r_p small))
      (THEN (object is sponge)))
(a3 (IF (r_s not-about-1)
      (r_p medium))
      (THEN (object is oily clay)))
(a4 (IF (r_s not-about-1)
      (r_p large))
      (THEN (object is oily clay)))
(a) 材質判定用ルールA
```

```
(c1 (IF (b_x small)
      (b_y small))
      (THEN (force distribution implies initiation of point contact)))
(c2 (IF (b_x small)
      (b_y medium))
      (THEN (T_y distribution implies initiation of edge contact)))
(c3 (IF (b_x medium)
      (b_y small))
      (THEN (T_x distribution implies initiation of edge contact)))
(c4 (IF (b_x large)
      (b_y large))
      (THEN (force distribution implies initiation of flat contact)))
(c5 (IF (b_x large)
      (b_y small))
      (THEN (T_x distribution implies initiation of edge contact)))
(c6 (IF (b_x small)
      (b_y large))
      (THEN (T_y distribution implies initiation of edge contact)))
(c7 (IF (b_x medium)
      (b_y medium))
      (THEN (force distribution implies initiation of flat contact)))
(c8 (IF (b_x medium)
      (b_y large)
      (r_xy about0))
      (THEN (T_y distribution implies initiation of edge contact)))
(c9 (IF (b_x medium)
      (b_y large)
      (r_xy not-about0))
      (THEN (force distribution implies initiation of flat contact)))
(c10 (IF (b_x large)
      (b_y medium)
      (r_xy about0))
      (THEN (T_x distribution implies initiation of edge contact)))
(c11 (IF (b_x large)
      (b_y medium)
      (r_xy not-about0))
      (THEN (force distribution implies initiation of flat contact)))
(b) 力分布判定用ルールC
```

図4 推論ルールの例

```
(rule number (IF (assertion of premise 1)
                  (assertion of premise 2)
                  :
                  (assertion of premise N))
              (THEN (assertion of conclusion)))
```

図3 IF-THENルール

の値をもとに、ファジィプログラミングルールを用いて推論を行う方法を以下に示す。

図4(a)に示したゴム、油粘土およびスポンジの3種類の材質を判定するルールAを用いて推論手順を説明する。図5(a)の上図は、硬さの特徴パラメータであるばね定数 r_s のファジィ述語 about-1(約1)および not-about-1(1でない)、および下図は相当ポアソン比 r_p のファジィ述語 huge, large, medium および small の各メンバシップ関数である。なお、他の特徴パラメータについても同様に定義する。

例えば、図5(a)に示すように、入力として $r_s=0.95$ および $r_p=0.21$ が与えられたとする。この場合 r_s の値は、ファジィ述語“about-1”に対して確信度{1.0}、“not-about-1”に対して{0.0}となる。同様に r_p では、“large”に対し{1.0}、“medium”に対し{0.4}、“huge”および“small”に対し{0.0}となる。なお、特徴パラメータの入力値としてファジィ集合を用いることも可能なようにプログラミングされているが、この例では確定値入力に対しての演算であるため、{ }の中の要素は一つだけとなっている。

(a) ファジィ述語と入力値

a_1	$(r_s, \text{about-1})$	$\rightarrow \{1.0\}$	$\{1.0\}$
a_2	$(r_s, \text{not-about-1})$	$\rightarrow \{0.0\}$	$\{0.0\}$
	(r_p, small)	$\rightarrow \{0.0\}$	
a_3	$(r_s, \text{not-about-1})$	$\rightarrow \{0.0\}$	$\{0.0\}$
	(r_p, medium)	$\rightarrow \{0.4\}$	
a_4	$(r_s, \text{not-about-1})$	$\rightarrow \{0.0\}$	$\{0.0\}$
	(r_p, large)	$\rightarrow \{1.0\}$	

(b) IF節での確信度の値

((object is rubber) {1.0}))

(c) 出力結果

図5 推論方法の説明

次に、上で求めた特徴パラメータのファジィ述語に対する確信度の値から、IF節の前提言明の確信度の値をルール要素 $a_1 \sim a_4$ についてそれぞれ同定する。例えば、図5(b)中の a_3 では、 r_s の not-about-1の値が{0.0}、 r_p の mediumの値が{0.4}である。これらの値について min 演算し、その結果をIF節の確信度の値とする。以上の min 演算をルール要素のIF節ごとに行うと図5(b)中の右端の列に示すような確信度が求められる。その値を帰結言明の確信度として帰結言明とともにリスト形式で出力する。図5(b)の場合には、ルール要素 a_1 のみ確信度が零でないため、図5(c)に示すようにルール要素 a_1 の THEN 節の帰結言明とその確信度の値が表示されている。なお、同一内容の帰結言明が存在した場合、確信度の値の大きいものを表示する。この表示内容が本システムの結論となる。本手法は、従来のプログラミングシステム⁽¹³⁾と異なり、帰結言明とその確信度の値を同時に出力できる。

以上の演算と処理を実現するため、以下の四つの機能を持つプログラムを構築した。すなわち、(1)三角状、台形状および釣り鐘状のファジィ集合を定義する、(2)ルールが定義されているリストの要素の一つずつ取り出す、(3)特徴パラメータの値とファジィ集合の間のファジィ演算を行う、(4)IF節内で最小の確信度を有する前提言明を取り出す。これらの機能を実現するため、馬野⁽¹⁸⁾が開発した LISP 関数を基礎にして、80 に及ぶ LISP 関数を新たに作成し認識システムを構成した。

4. 実験方法

4.1 較正実験 ファジィプログラミングルールによる推論結果を較正するためには、まず、ルール中で用いるファジィ述語のメンバシップ関数を最適化する必要がある。そこで、硬さや接触面形状が既知である基本試験片を使用し、較正実験を実施した。

本実験で用いる触覚センサは単結晶シリコンで製造されているため⁽¹⁷⁾、センサ面が極めて硬く、硬い物体と接触させると部分的に接触する現象が生じ正確な計測が不可能となる。そこで適度な硬さを有するシリコンゴムを中心に基本試験片の材質を選定した。硬さ認識には、材質の判断を行わせるため弾性体だけでなく、力学的特性の異なる塑性体および気泡を含む材料も対象とし、結果として硬質(JIS K 6301に規定されているゴムのスプリング硬さで評価した場合、44 Hs程度の硬さ)、中程度の硬さ(同36 Hs)および軟質(同19 Hs)のゴム、油粘土、導電スポンジ、スポンジおよび独

立気泡ゴムの7種類を用いた。なお、形状はすべて20×20×15 mmの直方体とした。接触面形状認識については、把持状態の安定性に関係する点、エッジ、平面、および回転形状である球面、円筒面から、球(球面)、円筒(円筒面)、円すい(点)、三角柱(エッジ)および立方体(平面)の5種類を選定した(カッコ内はそれぞれの立体のうち接触面形状として選出した部分を表す)。なお、材質はすべてシリコンゴム(58 Hs)である。

硬さ認識の場合、硬さの特徴パラメータであるばね定数と相当ポアソン比を求めるため、試験片をロボットハンドに把持させ、それを圧縮変形させた。さらに、負荷・除荷時のばね定数の比を求めるため、以下のような試験片の圧縮負荷を解放する動作を行った。すなわち硬さ認識の場合には、指の開閉運動を1回行った。接触面形状の認識の場合には、上述の開閉運動に加えて、接触面が回転形状であるか否かを判断するために摩擦係数と接触パターンの重心の移動量を算出する必要があり、このため、試験片に対し水平方向から負荷を加えるスライド運動を1回行った。

5. 認識実験の結果と検討

5・1 較正実験 硬さと接触面形状に関する基本試験片を認識させたときの出力結果を図6に表示する。ここで()と{ }内はそれぞれ帰結言明の内容と確信度の値である。それらをさらに()で閉じたりスト形式はルールの推論結果である。上述の6種類のルールA~Fに対応する結果であることを示すため、図中にA~Fの記号を付す。なお、推論結果は確信度が零になるものを除外して表示している。

図6(a)は、硬質ゴムの直方体試験片を把持させた結果である。この場合ばね定数比 r_s が1に近いため、Aでは“ゴム”を示す帰結言明が確信度1.0で出力されている。また、Bではばね定数 k_t を含めて推論を行った結果、“硬質ゴム”、“独立気泡ゴム”がそれぞれ1.0、0.2となっている。

((object is rubber){1.0})) A
 (((object is porous rubber){0.2})
 ((object is hard rubber){1.0})) } B
 (a) 硬さ

((force distribution implies initiation of point contact){1.0})) C
 (((contact surface has likely medium size and flat shape){1.0})) D
 (((object rolls){1.0})) E
 (((surface is spherical){1.0})) F
 (b) 接触面形状

図6 硬さと接触面形状に関する較正実験の出力表示例

次に図6(b)は、硬質の球面を把持した結果である。対象が球面の場合には、点接触から開始し、圧縮負荷の増大に伴って接触面積も増大する。被測定面が球面であるか平面であるかの相違は、相当ポアソン比の大きさによって判別でき、前者の場合には相当ポアソン比は小さい。このためCとDでは、それぞれ“接触の開始は点である”および“接触面が中程度の面積を持った平面である”と推論している。

接触面形状の実験では、転がり摩擦とすべり摩擦を判別するため、ロボットハンドの指部をスライド動作させる。この結果からEでは、“接触面が転がる”と推論している。上述の結果をまとめてFでは、“接触面は球面である”と結論づけている。

較正の精度を評価するため、ファジィ述語を表すメンバーシップ関数の最適化を行った後の基本試験片に関する確信度を表3に示す。ここで、(a)、(b)はそれぞれ硬さと接触面形状の確信度の値であり、図6のBとFの確信度の結果をまとめたものである。表からわかるように、基本試験片に関する確信度の値を0.8~1.0、

表3 較正実験結果

(a) 硬さ

Sample	Output values						
	R _H	R _N	R _S	O _N	S _C	S _N	R _P
Hard rubber	1.0	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.4
Normal rubber	0.4	1.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
Soft rubber	0.2	0.2	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Normal oily clay	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.1
Conductive sponge	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.4	0.0
Normal sponge	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	1.0	0.0
Porous rubber	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	1.0

R_H: hard rubber; R_N: normal rubber; R_S: soft rubber;
 C_N: normal oily clay; S_C: conductive sponge;
 S_N: normal sponge; R_P: porous rubber.

(b) 接触面形状

Sample	Output values				
	S	C	P	E	F
Spherical	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cylindrical	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
Pointed	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
Edged	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
Flat	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0

S: spherical; C: cylindrical; P: pointed; E: edged; F: flat.

((object is rubber){1.0})
 (((object is porous rubber){0.4})
 ((object is hard rubber){0.8})) } G

図7 発泡スチロールを用いた硬さ認識

それ以外は0.0～0.4に出力するように調整できていることがわかる。

5・2 実証実験 ここでは基本試験片以外の未知試験片を用いた場合の推論結果を示す。まず図7は発泡スチロールを把持して硬さ認識を行った場合の推論結果である。図中のGでは“独立気泡ゴム”と“硬質ゴム”を示す帰結言明がともに表示されており、とくに“硬質ゴム”の確信度が0.8と大きくなっている。表3(a)中の基本試験片である硬質ゴムの結果1.0と比べても、帰結言明とその確信度の値について“硬質ゴム”に極めて近い結果を示していることがわかる。このことは、本システムで使用したばね定数などの特徴パラメータで評価した場合、発泡スチロールの表面上の力学的特性は、“硬質ゴム”に近い材質であることを意味している。

ソフトキャンディを用いた硬さ認識の結果を次の図8に示す。図中のHでは“独立気泡ゴム”、“スポンジ”、“導電スポンジ”および“油粘土”の4種類の材質を示す帰結言明が表示されており、とくに“油粘土”の確信度が0.9と大きい。表3(a)中の基本試験片である油粘土の結果1.0と比べると、図8では“スポンジ”と“ゴム”の確信度が0.2と0.1である点については若干の差が認められるが、“油粘土”に極めて近い結果となっている。実際に実験者がソフトキャンディを指で潰してみると、硬めの油粘土のような感触がある。したがって“油粘土”に類似した材質であるという結果は、我々の主観によく対応している。

最後に、シリコンゴムの20面体を用いた接触面形状の認識結果を図9に示す。図中のIでは“円筒面”、“球面”および“平面”の3種類の帰結言明が表示され、“円筒面”と“球面”の確信度が0.5と大きい。その結果、接触面は“円筒面”、“球面”および“平面”の3種類の特徴を併せ持つ面であると判別している。

以上のように、本システムは、未知試験片についても、基本試験片を示す帰結言明とその確信度の値を出力できるので、あらかじめ設定された基本的な硬さおよび接触面形状との類似性が評価できる。

6. 結 言

可能な限り人間の感覚に近い認識機構をロボットに実現させることを目的に、あいまいな触覚情報を合理的に処理する手段として、算出された特徴パラメータの値に基づき、ファジィプロダクションルールによる推論を実行する触覚認識システムを構築した。これを用いて触覚認識システムと三軸触覚センサを装着したロボットハンドを組合せて硬さと接触面形状の認識実

```
((object is oily clay){0.9})((object is sponge){0.2})
((object is rubber){0.1}))
(((object is porous rubber){0.1})
((object is normal sponge){0.2})
((object is conductive sponge){0.2})
((object is normal oily clay){0.9}))) } H
```

図8 ソフトキャンディを用いた硬さ認識

```
((Tx distribution implies initiation of edge contact){0.5})
((force distribution implies initiation of point contact){0.5}))
(((contact surface has likely large size and flat shape){0.2})
((contact surface has likely medium size and flat shape){0.1}))
(((object does not roll){0.6})((object rolls){0.4}))
(((surface is cylindrical){0.5})
((surface is spherical){0.5})
((surface is flat){0.2}))) } I
```

図9 20面体を用いた接触面形状の認識

験を行い、その有効性を確認した。得られた結論を以下に要約する。

(1) 触覚情報処理ではあいまいな情報を処理することが重要であり、このためにファジィプロダクションルールによる触覚認識システムを構築した。本システムは、人工知能言語のLISPを用いて構築したために、従来の人工知能の処理技法も扱える点で応用性に優れている。

(2) 触覚認識システムと三軸触覚センサを装着したロボットハンドを組合せた実験システムを用いて、硬さと接触面形状認識を可能にするため、新しい特徴パラメータを導入するとともに、推論用のルールを考案した。

(3) 新しく導入した特徴パラメータが適切であることを検討するため、基本試験片を用いて硬さと接触面形状の認識実験を行った結果、その認識事実の確信度の値として0.8～1.0を得た。これより、それらの特徴パラメータで硬さと接触面形状を判別できることを確認した。

(4) 未知試験片を用いて同様な実験を行った結果、基本試験片とほぼ同一の性質を有する物体に関しては、適切な帰結言明とその確信度の値を出力することができた。これより、本システムは基本試験片に類似した物体の認識に適していること、および触覚認識においてファジィ的な取扱いが有効であることを確認した。

最後に、本研究にあたり(株)富士電機総合研究所が開発した三軸触覚センサおよび大阪大学馬野元秀助教授が開発したファジィ集合処理システムを利用したことを付記し感謝する。また、本研究の遂行の一部に、(財)堀情報技術財団の研究助成を活用したことを付記

し謝意を表する。

文 献

- (1) Harmon, L. D., Automated Tactile Sensing, *Int. J. Robotics Research*, 1-2(1984), 3.
- (2) 石川, 触覚センサとは何か, 省力と自動化, 13-3(1987), 25.
- (3) Nicholls, H. R. and Lee, M. H., A Survey of Robot Tactile Sensing Technology, *Int. J. Robotics Research*, 8-3(1989), 3.
- (4) 石川・下条, 感圧導電性ゴムを用いた2次元分布荷重の中心の位置方法, 計測制御学会論文集, 18-7(1982), 730.
- (5) 石川, マトリクス状センサからの出力分布の中心の位置の総和の検出方法, 計測制御学会論文集, 19-5(1983), 381.
- (6) Raibert, H. M. and Tanne, J. E., Design and Implementation of a VLSI Tactile Sensing Computer, *Int. J. Robotics Research*, 1-3(1982), 3.
- (7) 小林・鷺沢, シリコンゴムを構造材料とする3軸触覚センサ, 電子情報通信学会論文誌, C-2, J74-C-2(1991), 427.
- (8) Sagisawa, S., ほか2名, Three Direction Sensing Tactile Sensor. *Proc. of IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, (1988), 47.
- (9) Tanie, K., ほか4名, A High Resolution Tactile Sensor, *Robot Sensors vol.2: Tactile and Nonvision*, Kempston, UK: IFS(Pubns), (1986), 190.
- (10) 前川・谷江・金子・鈴木・堀口・菅原, 半球面光導波路を用いた指先搭載型触覚センサの開発, 計測自動制御学会論文集, 30-5(1994), 499.
- (11) 大岡・三矢・竹内・亀川, 有限要素法による接触変形解析に基づく光導波形3軸触覚センサの設計, 機論, 61-585, C(1995), 195.
- (12) Winston, P. H., *ARTIFICIAL INTELLIGENCE*, 2nd ed., (1984), 339, Addison Wesley.
- (13) Winston, P. H. and Horn, B. K. P., *LISP*, 2nd ed., (1984), 269, Addison Wesley.
- (14) 馬野, ファジィプロダクションシステムにおけるファジィパターンマッチングについて, 第6回ファジィシステムシンポジウム, (1990-9), 251.
- (15) W. M. Siler(崔訳, 廣田監修), ファジィ・エキスパートシステム 理論と実践, (1990), 11, 電機書院.
- (16) 日本ファジィ学会編, ファジィ・エキスパート・システム, 講座ファジィ, 8(1993), 44, 日刊工業新聞社.
- (17) 大岡・小林・篠倉・鷺沢, 3軸触覚センサ付き平行指ハンドを用いた触覚エキスパートシステム, 機論, 57-544, C(1991), 3855.
- (18) 馬野, ファジィ集合論とソフトウェア, 情報処理, 30-8(1989), 922.