3 分力検出形触覚センサによる触覚情報処理*

大岡 昌博^{*1}, 小林 光男^{*2}
篠倉 恒樹^{*2}, 鷺沢 忍^{*1}Data Processing of Tactile Information
for Three-Axis Tactile SensorMasahiro OHKA, Mitsuo KOBAYASHI,
Tsuneki SHINOKURA and Shinobu SAGISAWA

In order to improve the intelligence of a robot with a sense of touch, we have developed a tactile sensor array which can detect the distribution of the three components of a force vector. The tactile sensor consists of a 6×15 matrix of 3×3 mm sensing sites; each site is made of two single-crystal silicon rings on which semiconductor strain gauges are formed by means of a semiconductor processing technique. In this paper, we have introduced formulas to calculate applied force/moment, a center of distributed pressure, and some parameters of slip and hardness, and then carried out sensing tests in order to validate those formulas. Experimental results show that applied force/moment and the center of distributed pressure can be detected with practical accuracy. Slipping, rolling and rotating states can be distinguished by combinations of the slip parameters. Moreover, mechanical properties can be sensed by means of combinations of the hardness parameters. A lump in a soft object can be recognized using an adequate threshold method.

Key Words: Robotics, Measurement, Sensor, Three-Axis, Data Processing, Tactile Information, Force and Moment, Center of Distributed Pressure, Slip, Hardness

1. 緒 言

壊れやすい物体を把持したり、ハンド内で物体がすべらないように安定に把持するなど、ロボットにきめ細かなマニピュレーションを実現させるためには、接触により指にかかる作用力・作用モーメントおよびそれらの時間的変化を評価する必要がある⁽¹⁾⁽²⁾。その実現には、触覚センサを手掌部に装着することが理想的であるが、接触力はベクトルとして作用しているため、スカラ値である圧力の分布しか検出できない従来の触覚センサ^{(3)~(5)}でそれらのベクトル成分をすべて抽出するには特別な工夫が必要であった。例えば作用力ベクトルについては、3個のセンサ素子の出力値を一組の情報として荷重の大きさ、方向及び位置を算出するアルゴリズム⁽⁶⁾によって一応対処できるが、センサ表面に働く偶力の検出は難しく、回転すべりとして評価する方法で代用していた⁽¹⁾。

以上の事実は、圧力分布のみの検出ではもはや限界があり、接触面に平行に発生している力をも検出できるセンサ素子が必要であることを示唆している。

そこで鷺沢らは、加わった力を3方向に分離して検出できるセンサ素子をマトリックス状に配した3分力検出形触覚センサを開発した^{(7)~(9)}。このセンサは、適当な位置に半導体ひずみゲージを設けた一対のシリコン弾性リングを検出素子とし、上述の3成分に対応して3組のホイーストンプリッジを構成することで各成分を分離して検出できることを原理としている。

この3分力の分布情報とロボット指の角度情報および時間を総合して評価すると、ロボットの制御および知能化に有用な情報を得ることができる。すなわち3分力の分布情報の時間的変化からすべり覚が、指の開角度の時間的変化と力の分布情報から硬さが、あるいは力の分布情報と指の角度情報から把持物の形状が抽出できる。これらの情報を基礎としてさらに処理を進めると、作用力・作用モーメントとすべりから把持力の制御に必要な情報を、また、形状および硬さから被把持物の同定に必要な情報を得ることができる。

本研究では、把持力制御や被把持物の同定の実現を目的とする一連の研究の最初として、上の議論からそのための基礎と言える作用力・作用モーメント、すべり覚および硬さの抽出に必要な数式を導入し、実験によってこれらの妥当性を検討する。

* 原稿受付 平成2年1月8日。

^{*1} 正員、(株)富士電機総合研究所 (〒240-01 横須賀市長坂2-2-1)。^{*2} (株)富士電機総合研究所。

2. 基礎式

2.1 標記法 図1に示すように触覚センサの表面に基底ベクトルを i, j, k とする直交デカルト座標系 $O-XYZ$ を設け、斜線を施した部分で物体が接触しているものとする。作用力および作用モーメントをそれぞれ $F = F_x i + F_y j + F_z k$ および $M = M_x i + M_y j + M_z k$ 、また圧力の重心の位置ベクトルを $R_G = X_G i + Y_G j$ で表す。

3分力検出形触覚センサは、各素子について X, Y, Z の3方向の力で検出できる。そこで (i, j) 番めのセンサの出力を $(T_{xij}, T_{yij}, T_{zij})$ とする。ここで i および j の添字は、センサ素子の番地を表すものである。

2.2 作用力・作用モーメントおよび重心位置力 微小面積 da に作用している単位面積当たりの力ベクトルを T とすると、全体の接触面積 A に作用している合力 F および原点まわりの合モーメント M は、次式で計算できる。

$$F = \iint_A T da, \quad M = \iint_A r \times T da \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 r は da の位置ベクトルを表す。

センサ素子が十分小さく、 r の先端が (i, j) 番地のセンサ素子を示しているとする、 $T da$ の成分は先ほどのセンサの出力 $(T_{xij}, T_{yij}, T_{zij})$ になる。したがって、センサ素子の信号から F と M の各成分を計算する式は、式(1)の積分を加算に置き換えることによって次のように計算できる。

$$F_x = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_{xij}, \quad F_y = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_{yij}, \quad F_z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_{zij} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$M_x = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{1/2 + (j-1)\} \Delta l T_{xij}$$

$$M_y = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{1/2 + (i-1)\} \Delta l T_{zij}$$

図1 標記法

$$M_z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{1/2 + (i-1)\} \Delta l T_{yij} - \{1/2 + (j-1)\} \Delta l T_{xij} \quad \dots\dots\dots (3)$$

上式中 m, n はセンサの列と行の総数、 Δl はセンサ間のピッチを表す。また圧力分布の重心位置 $G(X_G, Y_G)$ は、点 G まわりのモーメントの成分の内 X および Y 方向成分が零になることから次のように計算できる。

$$X_G = -M_y/F_x, \quad Y_G = M_x/F_x \quad \dots\dots\dots (4)$$

2.3 すべり覚 増田・鈴木⁽¹⁰⁾ は、圧力分布検出形触覚センサ用のすべり覚抽出アルゴリズムとして、①重心の移動量を評価する方法、②図形の慣性主軸の回転を評価する方法と③排他的論理和を用いる方法の三つをすでに提案している。本センサは、これらの方法も同時に用いることができるから、最初にこの三つの方法について以下にまとめる。

①重心の移動量を評価する方法

式(4)で求まる重心位置を時刻 $t - \Delta t$ と t で評価して、

$$S_\theta = [\{X_G(t) - X_G(t - \Delta t)\}^2 + \{Y_G(t) - Y_G(t - \Delta t)\}^2]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

によってすべりの絶対値を求め、

$$\tan \alpha = \frac{Y_G(t) - Y_G(t - \Delta t)}{X_G(t) - X_G(t - \Delta t)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

から分母・分子の符号に注意して逆を解くことによってすべり方向 α を求める。以上の S_θ と α の二つのパラメータによって、すべりをベクトルとしてとらえることができる。

②慣性主軸の方向 θ の変化を評価する方法

上の方法が、すべりの直線的な移動を評価するものに対し、この方法は、回転すべりを評価する。すなわち、接触パターンの慣性主軸の方向 θ を時刻 $t - \Delta t$ と t で求め、

$$S_r = \theta(t) - \theta(t - \Delta t) \quad \dots\dots\dots (7)$$

のように回転すべりを評価する。

ここで θ は、分母分子の符号に注意して次式を解くことによって計算できる。

$$\theta = (1/2) \tan^{-1} \frac{2I_{xy}}{I_{yy} - I_{xx}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 I_{xx}, I_{yy} および I_{xy} は慣性モーメントである。

③排他的論理和を用いる方法

この方法ではまず T_{zij} をしきい値 ϵ により on-off 情報に変換して得たパターン Q_{ij} を得ることから始める。すなわち、

$$Q_{ij} = \begin{cases} 1, & T_{zij} \geq \epsilon \text{ のとき} \\ 0, & T_{zij} < \epsilon \text{ のとき} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (9)$$

のように2値化する。これを、 $t - \Delta t$ と t の時間で検

出し、この間の Q_{ij} の変化量

$$S_x = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Q_{ij}(t - \Delta t) \oplus Q_{ij}(t) \dots \dots \dots (10)$$

を計算する。ここで $\oplus$ は排他的論理和を表す。このパラメータ S_x は、図 2 (a) および (b) の斜線部で示した面積を表しているから、直線的移動のすべりおよび回転すべりのいずれが生じても増大する量である。

また同図には S_x の定義の他に、上に述べたすべりのパラメータ S_θ , α および S_r の定義も同時に示されている。

3分力検出形触覚センサでは、以上に加えてさらに摩擦係数、

$$\mu = (F_x^2 + F_y^2)^{1/2} / F_z \dots \dots \dots (11)$$

および偶力 M_z の時間的変化からもすべりを評価できる。この情報と上の①～③のすべりの各パラメータの値を総合して評価することにより、従来の圧力分布検出形触覚センサでは認識できなかった接触状態の評価が可能となる。

2.4 硬さ 従来、物体のバネ定数を検出し、それを硬さ H_{d1} とする方法⁽¹¹⁾ (方法④) および、与える荷重を同一にした時に生じる変位(柔らかいものほど大きい)を硬さ H_{d2} とする方法⁽¹²⁾ (方法⑤) が用いられてきた。

しかしながら、例えば図 3 のような力学的特性をもつ材料 (a), (b) および (c) が与えられた場合、方法④に従うと三者間の区別が、また、方法⑤に従うと (a) と (b) の区別ができない。

本研究では、硬さ認識を物体の力学的特性の認識として広義の意味でとらえ、上述の方法に加え、さらに二つのパラメータ H_{d3} および H_{d4} を導入し、従来のパラメータとこれらの値を総合的に評価し硬さを判定する。

$$H_{d3} = K_2 / K_1 \dots \dots \dots (12)$$

$$H_{d4} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (T_{xij}^2 + T_{yij}^2)^{1/2}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_{xij}} \dots \dots \dots (13)$$

ここで K_1 および K_2 は、それぞれ負荷および除荷時

図 2 すべりの各パラメータの定義

のバネ定数を表し、式(13)の分子分母は、それぞれ物体との接触により発生している応力ベクトルのセンサ面に対する水平成分と垂直成分の総和である。

式(12)は、材料のヒステリシス性を表現しており、特に粘土のように塑性変形を生じやすい物体 [図 3 の (b)] においては、大きな値を示す。また式(13)は、ポアソン効果の小さい材料、すなわちスポンジのような材料 [図 3 の (c)] に対しては小さな値を示す。

2.5 判別基準法 上で述べた硬さ判別法は、均質な試料の場合に有効であるが、例えばしこりのような硬い部分を含む試料の硬さを判別するにはまずしこりと母材を分離して認識する必要がある。このためには、両者をちょうど分離できるレベルにしきい値を設定できる処理が必要となり、ここでは、しこり部がなくても妥当なしきい値を算出できることから、判別基準法⁽¹³⁾を応用する。

すなわちまず、 T_{xij} の値を L 段階に分離し、レベル i の頻度数を n_i 、全頻度数を $N = n_1 + n_2 + \dots + n_L$ とする。そこで正規化ヒストグラム

$$p_i = n_i / N \dots \dots \dots (14)$$

を求める。これは、濃度の確率分布とみなすことができ、全平均レベルを次式で求める。

$$\mu_T = \sum_{i=1}^L i p_i \dots \dots \dots (15)$$

次にレベル k をしきい値として、 $S_1 = [1, \dots, k]$, $S_2 = [k+1, \dots, L]$ レベルに属するもの 2 クラス S_1 , S_2 に分類する。そこで、レベル k までの濃度分布の 0, 1 次モーメント、 $\omega(k)$ および $\mu(k)$ を用いて、各クラスの生起確率 ω_1 , ω_2 および各クラスの平均レベル μ_1 , μ_2 を求めると次のようになる。

$$\omega_1 = \sum_{i=1}^k p_i = \omega(k) \dots \dots \dots (16)$$

$$\omega_2 = \sum_{i=k+1}^L p_i = 1 - \omega(k) \dots \dots \dots (17)$$

図 3 材料の力学的特性と硬さパラメータの関係

$$\mu_1 = \sum_{i=1}^L ip_i / \omega_i = \mu(k) / \omega(k) \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\mu_2 = \sum_{i=k+1}^L ip_i / \omega_2 \\ = [\mu_T - \mu(k)] / [1 - \omega(k)] \quad \dots\dots\dots (19)$$

クラス間の分散 σ_B は,

$$\sigma_B^2 = \omega_1 \omega_2 (\mu_1 - \mu_2)^2 \quad \dots\dots\dots (20)$$

によって計算できる。式(20)に式(16)～(19)を代入すると,

$$\sigma_B^2(k) = \frac{\{\mu(k) - \mu_T \omega(k)\}^2}{\omega(k) \{1 - \omega(k)\}} \quad \dots\dots\dots (21)$$

となる。

最適しきい値 ε を求めるには, $k=1 \sim L$ について σ_B を計算し, 最大の σ_B を与える k を求め, この k に対応する T_{zij} の値を, 求めるしきい値とする。

3. 実験条件

3・1 触覚情報処理システム^{(7)～(9)} システムは触覚部, 信号処理部, 認識部から構成されている。まず触覚部は, 図4に示すようにシリコン半導体ストレインゲージを検出素子とするセンサモジュールを 6×15 のマトリックス状に配列して構成されており, その内部にはアンプやマルチプレクサ等のICが埋設されている。ここでモジュールの受圧面の大きさは $3 \times 3 \text{ mm}$, またモジュール1個当たりの荷重検出範囲は, F_x および F_y について $0.006 \sim 6 \text{ N}$, F_z について $0.02 \sim 20 \text{ N}$ である。信号処理部は, センサのスキニング, センサ出力信号の温度補償および直線性の補正演算を90モジュールあたり 30 ms の速度で行う。最後の認識部は, 前章で示した基礎式に基づき信号処理部からの信号を計算処理する計算機である。

3・2 実験方法 用いた実験装置を図5に示す。ま

図4 3分力検出形触覚センサ

ず作用力・作用モーメントおよび重心位置の検出精度を確かめるため, 図5(a)に示す負荷装置を用いた。下から順にXYステージ(各方向につき最大 25 mm のストローク), ゴニオステージ(最大 20° の傾斜)およびシータステージ(360° の回転)を組合せ, その上に触覚センサが取付けてある。これらの各ステージの可動範囲内で, XおよびYの2方向の移動, 鉛直方向を軸にした回転および水平方向を軸にした傾きの三つの動きを組合せれば, センサは任意の姿勢がとれる。同時に重りを受け皿にのせることによって既知の荷重ベクトルおよびモーメントをセンサに作用させることができる。

前述した触覚情報処理システムとこの負荷装置を組合せることによって次の実験を実施した。

(A) 作用力の成分 F_z の検出試験 センサを水平方向に保ち, 垂直荷重を 5 N ステップで 30 N まで増加させた後, 再び段階的に除荷した。

(B) 荷重方向の検出試験 触覚センサの上に 1 kg の重りをのせた状態で, ゴニオステージによりセンサの姿勢を 0 度から順に 2.5 度ずつ 20 度まで傾け

(a) 作用力・作用モーメント用実験装置

(b) 硬さ試験用実験装置

図5 実験装置

る実験を行った。Y および X 軸に平行な軸を中心にして傾ける実験をそれぞれケース A および B と呼ぶことにし、検出した作用力ベクトルの各成分の値から、

$$\beta = \begin{cases} \tan^{-1}(F_x/F_z), & \text{ケース A} \\ \tan^{-1}(F_y/F_z), & \text{ケース B} \end{cases} \quad (22)$$

を計算して与えた荷重方向と比較した。

(C) 重心の位置検出試験 XY ステージを用いることによって接触位置を X および Y 方向に 2 mm ずつ動かし、既知の移動量と検出値を比較した。

(D) 作用モーメントの成分 M_x の検出試験 センサを水平方向に保ち、受け皿に重りをのせることによって 1.8 N-cm ずつ順に 12.6 N-cm までモーメントを増加させ、既知量と検出値を比較した。

なお、式(4)から明らかなようにモーメントの成分 M_x と M_y は、重心位置および F_z と関連づけることができるから、上の(A)～(D)の実験は、作用力・作用モーメントのすべての成分の精度を議論するのに十分である。

以上の実験に引続き、次の(E)すべり覚の検出試験と(F)硬さの検出試験を行った。(F)については、各種の大きさの試料を用いることから、図5(b)に示すように各ステージの配置が図5(a)の場合とは異なる

図 6 F_z の検出精度

図 7 荷重方向の検出精度

試験装置を用いた。

(E) すべり覚の検出試験 直径 20 mm、長さ 20 mm の円柱状シリコンゴムをセンサ表面に沿ってすべらせ、前述の各すべりのパラメータを計算しそれらの特性を評価した。

(F) 硬さの検出試験 同一の大きさ (25×25×10 mm) の試料の硬さを測定する実験、およびスポンジ材中の異物を検出する実験を行った。

4. 実験結果と考察

4.1 作用力・作用モーメントおよび重心位置

十分な精度で作用力の成分 F_z が検出できることを確かめるため、図6に負荷・除荷したときの検出値を縦軸に、与えた荷重の値を横軸にとって示す。また精度を把握するため、与えた荷重と検出値が正確に一致した場合の関係を直線で示す。

図からわかるようにこの試験では、負荷・除荷を一サイクル行っているにもかかわらず、 F_z の検出結果は重なり合っており、ヒステリシス性は認められない。また、線形性も十分満足していることがわかる。

次に感度について評価すると、 $F_z=30$ N で誤差が 3.6% であり、十分な精度が確保できている。また、 F_z および F_y 成分への干渉出力は、 $F_z=30$ N の時 0.5 N 程度で、 F_z の値に対して約 2% である。

続いて荷重方向の精度を検討するため、図7に式(22)で計算した値とゴニオステージの傾き角の関係を示す。図中の直線は両者の値が一致した場合の関係を示しており、実験結果は約 12.5% 低い値を示している。

図8は、基本荷重 5 N を加えた状態で負荷装置の XY ステージを 2 mm ずつ動かし、各々のステップで算出した重心位置を●で示す。この図からわかるように、センサのピッチが 3 mm にもかかわらず、それ以下の重心位置の移動を検出している。このことは、多少密度が粗であるセンサであっても、対象物がある程度大きな面で接触すればセンサのピッチより細

図 8 重心移動の検出精度

かい重心位置の変化をセンシングできることを意味している。

M_x の精度を評価するため、図9に検出した M_x と実際に与えたモーメントの関係を示す。原点に関して点対称になっている関係から、与えたモーメントの正負による感度の差はないが、その絶対値は、 $M_x=12.4\text{ N-cm}$

表1 すべり覚の検出結果

	S _x	S _g mm	α deg	μ	S _r deg
SLIPPING	20	6.9	96.9	0.80	3.7
ROLLING	18	14.5	98.4	0.12	6.3
ROTATING	21	1.7	-	0.19	20.1

図9 M_x の検出精度

図10 すべり覚検出試験

図11 圧力パターンの変化

cmで17.7%低い値を示している。

4.2 すべり覚の検出 図10に示すように円筒形のシリコンゴムを(a)すべらせる、(b)ころがす、(c)回転させる実験を行った。それぞれに対応して、図11(a)~(c)にある瞬間 t とその前の $t-\Delta t$ の圧力分布を重ね合わせて示す。これらをよく調べると、onからoffあるいはその逆になった素子の数は、各ケースとも20個前後であることがわかる。これらの数は、式(10)の排他的論理和を用いるパラメータ S_x による評価値に対応しており、事実、この3種類の実験で得られたすべりのパラメータの計算結果をまとめた表1からわかるように、3者の S_x はほぼ等しい。このことは、ただ一つのパラメータですべりの評価を行うと、正確に状態を同定できないことを意味している。

この問題を解決するため、導入したパラメータを組合せて状態を同定する方法を試みる。表1をみると、排他的論理和によるすべりの評価値 S_x に差がなくても、摩擦係数 μ の値は、ころがりの場合が最も小さい。また、図心の回転により評価するパラメータ S_r に着目すると、回転の場合が最も大きな値を示している。したがって S_x 、 μ および S_r の3種類のパラメー

(a) シリコンゴム(Hs 36) (b) シリコンゴム(Hs 48)

(c) スポンジ (d) 独立気泡ゴム

(e) 油粘土 (f) ポリイソブチレン樹脂

図12 材料と硬さパラメータの関係

表 2 異物検出に対する硬さパラメータの値

	$H_{d1}/A \text{ N/mm}^3$	$H_{d4}/A \text{ N/mm}^2$
Threshold	8.1×10^{-3}	3×10^{-3}
Non Threshold	0.9	0.3

タの値からこれら三つの状態を判別できる。

4.3 硬 さ 図 12 に、6 種類の材料に対する測定結果をレーダチャートにして示す。各軸は、前述の硬さパラメータ $H_{d1} \sim H_{d4}$ の大きさに対応している。(a), (b), (c) および (f) については従来のパラメータ H_{d1} でも判別が可能であるが、(c), (d) および (e) については、その値がほぼ同一であるため、 H_{d1} のみでは硬さを判定することが困難である。

しかしながら、各材料間でポアソン効果特性および塑性特性等の力学的特性について差があるため、 $H_{d2} \sim H_{d4}$ の値に顕著な相違が認められる。このことは、複数のパラメータを組合せれば、硬さの同定精度が向上することを意味している。

最後に内部に硬い異物を含むスポンジを試験片として用い、しきい値処理の有効性を検討する。このとき得られた T_{xy} の分布に対してしきい値処理を行わない場合と行った場合を図 13 に示す。図中の黒色の正方形は、その面積が圧力の大きさに比例している。この図からわかるように、しきい値処理を行えば異物の存在位置を強調することができる。

また表 2 は、硬さパラメータ H_{d1} および H_{d4} の検出結果を示す。しきい値処理を行うと 10 倍近く硬い値を示すので、この処理により母材の影響を除くことができる。

なお以上の処理は、将来均質な製品中に存在する異物および青果物の欠陥の検出、並びにしこりのような病巣の発見に役立てることができると考えている。

5. 結 言

ロボットにきめ細かなマニピュレーションを実現させることを目的として、3 分力検出形触覚センサの触覚情報処理のための基礎式を導き、それを用いて基本的な接触実験を行った。その結果、以下のことがわかった。

(1) 本触覚センサによれば、作用力・作用モーメントおよび重心位置が精度良く検出できる。

(2) すべり覚については、パラメータを複数組合

(a) 処理なし (b) 処理あり

図 13 異物を含む場合の垂直力の分布

せて判断することで、これまで判断できなかったすべり状態を検出できる。

(3) ここで導出した硬さパラメータを組合せることによって、これまで判定が難しかった材質の判定ができる。

(4) 適当なしきい値処理により、異物を含む場合の認識ができる。

今後、ここで議論したパラメータを基本的な触覚情報として位置づけ、それらの基本的触覚情報を組合せて判断することで、把持物体の質感認識や把持状態の認識のようなより高度な情報処理の実現を図る予定である。

最後に本研究は、大型工業技術研究開発の一環として極限作業ロボット技術研究組合が新エネルギー・産業技術総合開発機構から委託を受けて、実施したものである。

文 献

- (1) 鈴木・増田, 第 4 回ロボット学会学術講演会, (1986-12), 311.
- (2) 増田・長谷川, 計測自動制御学会論文集, 10-4(1974), 500.
- (3) 石川・ほか 2 名, 第 28 回自動制御連合講演会, (1985-11), 429.
- (4) Kinoshita, G., ほか 2 名, *Int. Conf. Adv. Rob.* (1983), 195.
- (5) 木下, 日本ロボット学会誌, 2-5(1984), 430.
- (6) Fearing, R. S. and Hollerbach J. M., *The Int. J. of Rob. Research*, 4-3(1985), 40.
- (7) 小林・ほか 2 名, SICE 第 4 回センシングフォーラム, (1987), 39.
- (8) Sagisawa, S., ほか 2 名, *Proceedings 1988 IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems*, (1988), 47.
- (9) Sagisawa, S., ほか 2 名, *Int. Advanced Robotics Programme*, (1988), 26.1.
- (10) 増田・鈴木, バイオメカニズム予稿集, 6 (1985), 101.
- (11) 大野・ほか 3 名, 機械技術研究所所報, 35-5(1981), 257.
- (12) Stansfield, S. A., *Proc. 1986 IEEE Int. Conf. Rob. Autom.* (1986), 1274.
- (13) 大津, 電総研研究報告, (1981), 157.