

物体の形状認識と組み立て作業への応用

山本健司・塚本幸雄

岡山理科大学工学部電子工学科

(昭和63年9月30日 受理)

1. まえがき

自動組立作業では、部品相互の位置関係にあいまいさがあり、部品ごとの形状寸法のばらつきがあるなど作業条件に不確定性が存在する。また、自動組立作業に必要なことは、部品をあらかじめ定めた運動軌道に沿って移動させるだけでなく、部品の挿入位置や形状を認識しながら、一方の部品にならって他方を案内する高度な操作技術を必要とすることである。したがって、より正確に部品各部の形状を把握できることが望ましい。このような見地から導伝性ゴムをセンサとする多関節指の試作を行って来たが、今回はより情報の多くとれるロボットハンドに改良を行った。本論文では多関節指の把み情報により、どの程度の物体の形状認識を行うことができるかということ、また、これらの情報で局部的、また大域的形状を微分幾何学的手法に応用すること、および自動組立作業の基礎的応用について考察したものである。

2. システムの構成と物体の認識

多関節指の構成は図1に示すようなもので、各関節および、手のひらに相当する部分に、

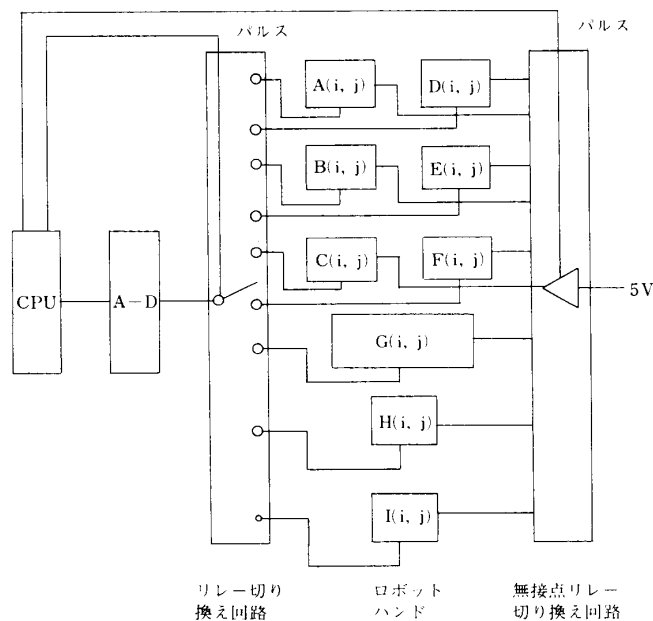


図1 システム構成図

加圧導伝性ゴムの両面に電極を格子状に配列した触覚センサを取り付ける。

そこから200~1,200ビットの接触情報を、リレーと、無接点リレーとの切り換えによって電極の交叉した部分の物体との接触圧力に応じた導伝性ゴムの抵抗値の変化としてA-Dコンバータを介してコンピュータに取り込み、得られた情報で処理を行うように設計している。

2. 1 形状認識の局所的表示法

曲面の性質を知るために Cesàro のアイデアを導入する³⁾。曲面を $X(S)$ を中心に小さい曲面片の集合に分割し、各曲面片の幾向学的挙動を Frenet 標構で表示する。いま、 R_a 座標系を無限小運動して R_{a+da} 標構に移動したとき、

$$x_i' = \sum a_{ij}x_j - \sum a_{ji}a_j \quad (2, 1)$$

より、

$$x_i'' = x_i \rightarrow \sum w_{ik}x_k + w_i \quad (2, 2)$$

に変換される。ここに

$$\begin{cases} w_{ik} = -\sum a_{ji}da_{jk} \\ w_i = \sum a_{ji}da_j \end{cases} \quad (2, 3)$$

である。これらの標構の系について、 e_1, e_2 が点 $X(u, v)$ での接平面張っていることにより、

$$\begin{bmatrix} dX \\ de_1 \\ de_2 \\ de_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & 0 \\ 0 & w_{12} & w_{13} \\ -w_{12} & 0 & w_{23} \\ -w_{13} & -w_{23} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} \quad (2, 4)$$

が成立する。このとき Cartan の補助定理より、

$$\begin{cases} w_{13} = aw_1 + bw_2 \\ w_{23} = bw_1 + cw_2 \end{cases} \quad (2, 5)$$

なる関係がある。

いま、点 x における接平面は X をこの平面上の点とすると、 $X-x$ は e_3 に垂直であり、

$$e_3(X-x) = 0 \quad (2, 6)$$

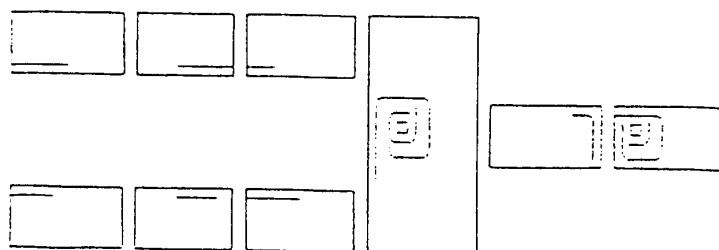


図2 計測データ (球)

が成立する。この左辺は空間の点 \mathbf{X} より $\mathbf{x}(u, v)$ における接平面へ下した垂線の長さを表わしている。すなわち \mathbf{X} を u, v のまわりでテーラ展開をし、高次の項を無視すれば点 $\mathbf{X}(u + d u, v + d v)$ より点 $\mathbf{X}(u, v)$ の接平面に下した垂線の長さ d は、(2, 5) 式の関係を用いて

$$d = aw_1^2 + 2bw_1w_2 + cw_2^2 \tag{2, 7}$$

となることが示される。ここに、

$$a = \frac{\partial^2 \mathbf{X}}{\partial u^2} \quad b = \frac{\partial^2 \mathbf{X}}{\partial u \partial v} \quad c = \frac{\partial^2 \mathbf{X}}{\partial v^2} \tag{2, 8}$$

である。これより、

$$ac - b^2 > 0, < 0 \tag{2, 9}$$

に対して楕円点、双曲点となり、

$$ac - b^2 = 0 \tag{2, 10}$$

に対しては放物的点と分類でき局所的物体形状を得ることができる。図2はこのような関係を図1のシステム構成より、ホロン素子を通して得た結果の一例で、楕球体を把握したものである。

2. 2 曲面の大域的表示法

前節で述べた方法で曲面の全体像を正確に把握することは、非常に時間を要する。このため、物体を把握したときに得られる接触情報と、指の回転角、また触覚センサの取り付け位置より、物体の表面座標を算出し、この座標点を補間することにより、その物体を表示することにする。しかし実際には、情報の誤差等により正確な形状を出力することは困難である。そこで本節では得られた表面座標を平滑化する方法について述べる⁴⁾。

ここでは、物体を得られた表面座標ごとに各区間に分割し、この区間の境界値によって区間内部の関数を表す。そこで、各区間の m 次までの微係数を用いて、

$$y(t) = \sum_{i=0}^m \left\{ y_0^{(i)}(t) p_i(m, t) + y_i^{(i)} q_i(m, t) \right\} \quad (2, 11)$$

ここで $y_0^{(i)}(t)$ と $y_i^{(i)}(t)$ は $t=0$ および $t=1$ における $y(t)$ の第 i 次の微係数である。

また、平滑化のモデルとして、弾性線のモデルを考える。ここで線の曲げ剛性を EI 、ばね定数を k_i 、測定点の座標を a_i 、平衡状態における形状を $y(x)$ とすると、系の弾性エネルギーは、

$$V = \frac{1}{2} \sum_i k_i \left\{ y(x_i) - a_i \right\}^2 + \frac{1}{2} EI \int y''^2 dx \quad (2, 12)$$

と表わされ、これを最小にするように $y(x)$ を定め、平滑化を行う。測定点に対する平滑化した曲線の区間 $(i-1, i)$ での式を (2, 11) 式より、 $m=1$ までとして、

$$y_{i-1,i} = y_{i-1} p_0(u) + y_i q_0(u) + y_{i-1}' \ell_i p_1(u) + y_i' \ell_i q_1(u) \quad (2, 13)$$

ここで

$$\begin{cases} p_0(u) = 1 - q_0(u) & q_0(u) = u^2(3-2u) \\ p_1(u) = u(u-1)^2 & q_1(u) = u^2(u-1) \\ \ell_i = x_i - x_{i-1} & u = (x - x_{i-1})/\ell_i \end{cases} \quad (2, 14)$$

(2, 13) 式を 2 階微分すると、

$$y_{i-1,i}'' = 6(y_i - y_{i-1})(1-2u)/\ell_i^2 + y_{i-1}'(6u-4)/\ell_i + y_i'(6u-2)/\ell_i \quad (2, 15)$$

となり、 $y = y_{i-1,i}$ を (2, 12) 式に代入し、これが最小となるように、

$$\frac{\partial V}{\partial y_i} = 0, \quad \frac{\partial V}{\partial y_i'} = 0 \quad (2, 16)$$

とすると、

$$\begin{cases} y_i - a_i + \frac{EI}{k_i} \left(12 \frac{y_i - y_{i-1}}{\ell_i^3} - 6 \frac{y_{i-1}'}{\ell_i^2} - 6 \frac{y_i'}{\ell_i^2} - 12 \frac{y_{i+1} - y_i}{\ell_{i+1}^3} + 6 \frac{y_i'}{\ell_{i+1}^2} + 6 \frac{y_{i+1}'}{\ell_{i+1}^2} \right) = 0 \\ \frac{y_{i-1}'}{\ell_i} + 2 \left(\frac{1}{\ell_i} + \frac{1}{\ell_{i+1}} \right) y_i' + \frac{y_{i+1}'}{\ell_{i+1}} = 3 \frac{y_i - y_{i-1}}{\ell_i^2} + 3 \frac{y_{i+1} - y_i}{\ell_{i+1}^2} \end{cases} \quad (2, 17)$$

を得る。

(2, 15) 式 (2, 17) 式より、 y_i' 等を消去すると y_i と y_i'' との関係が、

$$y_i = a_i - \lambda_i \delta^2 y_i'' \quad (2, 18)$$

得られる。ここで

$$\left. \begin{aligned} \delta^2 y_i'' &= (y_{i+1}'' - y_i'')/\ell_{i+1} - (y_i'' - y_{i-1}'')/\ell_i \\ \lambda_i &= \frac{EI}{k_i} \end{aligned} \right) \quad (2, 19)$$

また、(2, 15) 式, (2, 17) 式, (2, 19) 式より, y_i 等を消去すると,

$$\begin{aligned} \ell_i y_{i-1}'' + 2y_i''(\ell_i + \ell_{i+1}) + \ell_{i+1} y_{i+1}'' + (6/\ell_{i+1})(\lambda_{i+1} \delta^2 y_{i+1}'' - \lambda_i \delta^2 y_i'') \\ - (6/\ell_i)(\lambda_i \delta^2 y_i'' - \lambda_{i-1} \delta^2 y_{i-1}'') = 6\delta^2 a_i \end{aligned} \quad (2, 20)$$

(2, 20) 式を 5 項連立方程式として, y_i'' をもとめて, (2, 18) 式より y_i を定める。

これより y の形状は

$$\begin{aligned} y_{i,i+1} = y_i + (y_{i+1} - y_i)u - (2y_i'' + y_{i+1}'')(\ell_{i+1}^2/6)p_1(u) \\ + (y_i'' + 2y_{i+1}'')(\ell_{i+1}^2/6)q_1(u) \end{aligned} \quad (2, 21)$$

ただし,

$$\ell_{i+1} = x_{i+1} - x_i \quad u = (x - x_i)/\ell_{i+1} \quad (2, 22)$$

である。

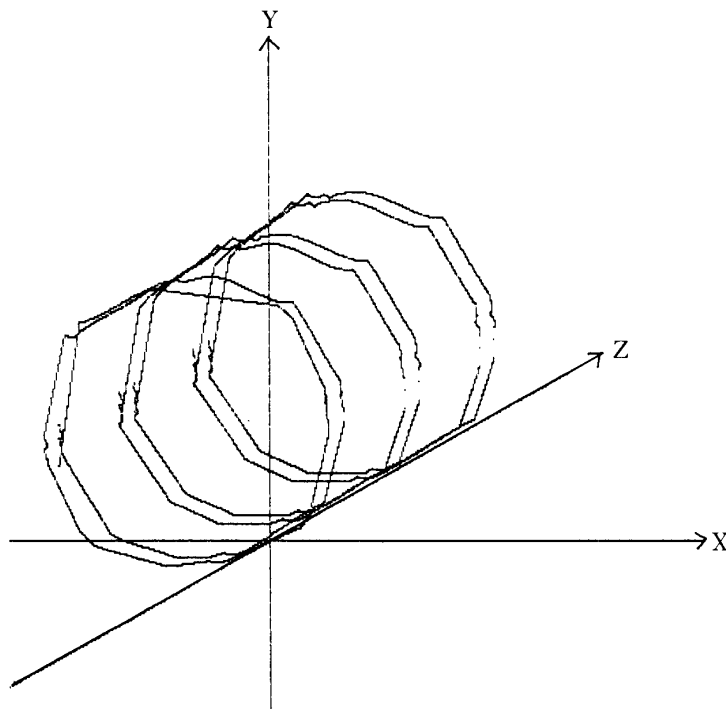


図3 円柱を補間した計算結果

まず、測定点 a_i より(2, 20)式を用いて、 y_i'' をもとめ、(2, 18)式より、測定点 a_i を平滑化した y_i を得る。この y_i の値をもとにして(2, 22)式より、各区間において、補間をおこない、把握物体の表示を行う。ここで述べた手法により得られた結果の一例を図3に示した。

3. 物体の最適把握問題

曲面を二つの媒介変数 u, v を用いて

$$\mathbf{X} = \mathbf{x}(u, v) \quad (3, 1)$$

と曲面の方程式を表示する。曲面上の1点 $\mathbf{x}(u, v)$ において、 u, v 方向の接線ベクトルを

$$\mathbf{x}_1 = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial u}, \quad \mathbf{x}_2 = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial v} \quad (3, 2)$$

と表示する。曲面上において、点 $\mathbf{x}(u, v)$ を通る曲線を考えて、その曲線に沿って u, v を t の関数とすれば、その曲線の単位接線ベクトルは

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = (\mathbf{x}_1 \frac{du}{dt} + \mathbf{x}_2 \frac{dv}{dt}) / \|\mathbf{x}_1 \frac{du}{dt} + \mathbf{x}_2 \frac{dv}{dt}\| \quad (3, 3)$$

と表示され、その点での単位法線ベクトルは

$$\mathbf{n} = \frac{1}{\sqrt{g}} \mathbf{x}_1 \times \mathbf{x}_2 \quad (3, 4)$$

で、ここに、 $\sqrt{g} = |\mathbf{x}_1 \times \mathbf{x}_2|$ であり、 u, v は互に曲線が直交するものとする。

いま、物体を把握するとき、3本の多関節指中その1本に力 f_1 が供給され、他の指は物体の振れに相当する抗力 f_2, \dots, f_6 が存在するものとする。このとき、

$$\Psi(f_i) = G\mathbf{f} \quad (3, 5)$$

なる関数を定義する。ただし、 $\mathbf{f} = (f_1, f_2, \dots, f_6)$ なるベクトルである。 G は

$$G = \begin{bmatrix} \mathbf{n}(p_1) & \frac{d\mathbf{x}(p_1)}{dt} & \mathbf{n}(p_2) & \frac{d\mathbf{x}(p_2)}{dt} \\ \mathbf{n}(p_1) \times (p_1 - 0) & \frac{d\mathbf{x}(p_1)}{dt} \times (p_1 - 0) & \mathbf{n}(p_2) \times (p_2 - 0) & \frac{d\mathbf{x}(p_2)}{dt} \times (p_2 - 0) \\ \mathbf{n}(p_3) & \frac{d\mathbf{x}(p_3)}{dt} & & \\ \mathbf{n}(p_3) \times (p_3 - 0) & \frac{d\mathbf{x}(p_3)}{dt} \times (p_3 - 0) & & \end{bmatrix} \quad (3, 6)$$

なる写像行列とする。また、 $(p_i - 0)$ は原点を中心としてモーメントを計測することを意

味し、 $p_i (i=1, \dots, 3)$ は接触点での位置座標である。このとき、最適把握位置を決定する規範として

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \quad \mu(\Psi(p_i, f_j)) \quad (j=1, 2, \dots, 6) \quad (3, 7) \\ & \left\{ (p_i) \in R^3, \mathbf{x}(p_i) = 0 \right\} \end{aligned}$$

なる問題を考える⁵⁾。(3, 7)式は $\Psi(p_i, f_j)$ の体積測度と呼ばれるものである。(3, 5)式より $\Psi(f_i)$ は f_i に基づく $f_{x_1}, f_{x_2}, f_{x_3}, \tau_{x_1}, \tau_{x_2}, \tau_{x_3}$ なる力およびトルクの成分を表わすものであるから、これらの力、トルクの空間領域を次式のように設定する。

$$A_\beta = \left\{ \mathbf{y} \in R^6, \langle \mathbf{y}, Q\mathbf{y} \rangle + \langle a, \mathbf{y} \rangle \leq \beta^2 \right\} \quad (3, 8)$$

ここに、 $\mathbf{y} = (f_{x_i}, \tau_{x_i})'$ なるベクトルである。また、 $Q (6 \times 6)$ は与えられた定数行列、 a は定数ベクトルである。これらの Q, a は装置の処理し得る値、把握条件より決定されるべき値である。問題は、 A_β 領域内の f_{x_i}, τ_{x_i} を満たし、かつ、(3, 7)式を最大とする p_i, f_j を決定する問題に帰着される。ここで、簡単な2列について考察することにする。形状として、長さ1の正方形物体で、原点は中心に存在する場合を考える。このとき、変換行列 G を

$$\begin{bmatrix} \mathbf{n}(p_1) & \mathbf{t}(p_1) & \mathbf{n}(p_2) & \mathbf{t}(p_2) \\ m_1^1 & m_2^1(p_1) & m_1^2(p_2) & m_2^2(p_2) \end{bmatrix} \quad (3, 9)$$

とする。ここに

$$\begin{cases} \mathbf{n}(p_i) = \left(\frac{\partial \bar{\mathbf{x}}}{\partial x_1}, \frac{\partial \bar{\mathbf{x}}}{\partial x_2} \right)', \mathbf{t}(p_i) = \left(\frac{\partial \bar{\mathbf{x}}(p_i)}{\partial x_2}, \frac{\partial \bar{\mathbf{x}}(p_i)}{\partial x_1} \right)' \\ m_1^i(p_i) = p_{x_2}^i \frac{\partial \bar{\mathbf{x}}(p_i)}{\partial x_1} - p_{x_1}^i \frac{\partial \bar{\mathbf{x}}(p_i)}{\partial x_2} \\ m_2^i(p_i) = p_{x_2}^i \frac{\partial \bar{\mathbf{x}}(p_i)}{\partial x_2} + p_{x_1}^i \frac{\partial \bar{\mathbf{x}}(p_i)}{\partial x_1} \end{cases} \quad (3, 10)$$

であり、 $\bar{\mathbf{x}}(p_i)$ は $\mathbf{x}(p_i)$ を正規化したものである。いま、(3, 8)式の領域は

$$A_\beta = \left\{ (f_{x_1}, f_{x_2}, \tau) \in R^3, f_{x_1}^2 + (f_{x_2} - c)^2 + \tau^2 \leq \beta^2 \right\} \quad (3, 11)$$

とする。このとき、 p_1, p_2 点を $x_1 = 0$ に対応する点としたとき、 $m_1^1(p_1) = 0, m_1^2(p_2) = 0$ となり x_2 軸方向の f_{x_2} の供給は最適であるが、他の軸方向への供給力は好まない。これより、最適把握点は

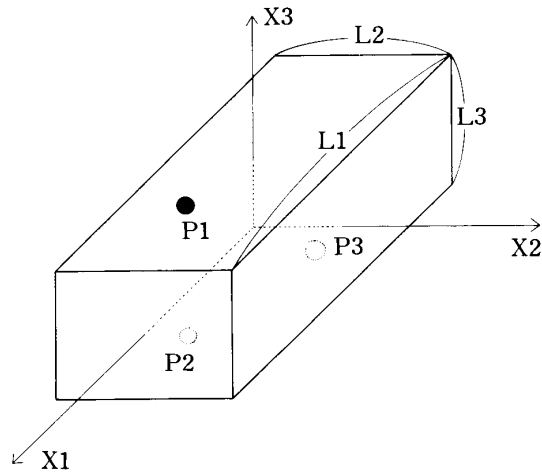


図4 三本指での面把握

$$p_1 = (0, -1), \quad p_2 = (0, 1)$$

である。

次に、図4の挿入物体の把握問題を考える。接触点 p_i を図4のように配列して変換行列 G を求めれば

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ -p_{1x_2} & p_{1x_3} & p_{2x_2} & -p_{2x_3} & p_{3x_2} & p_{3x_3} \\ p_{1x_1} & -p_{1x_3} & -p_{2x_2} & -p_{2x_3} & -p_{3x_1} & p_{3x_3} \\ 0 & p_{1x_2} - p_{1x_1} & 0 & p_{2x_2} + p_{2x_1} & 0 & -p_{3x_2} - p_{3x_1} \end{bmatrix} \quad (3, 12)$$

となる。また、この場合妥当な力、トルク空間領域 A_β は

$$A_\beta = \left\{ (f_{x_1}, \dots, f_{x_3}, \tau_{x_1}, \dots, \tau_{x_3}) \in R^6, f_{x_1}^2 + f_{x_2}^2 + (f_{x_3} - c)^2 + \tau_{x_1}^2 + \tau_{x_2}^2 + \tau_{x_3}^2 \leq \beta^2 \right\} \quad (3, 13)$$

であり、 p_1, p_2, p_3 の位置座標は

$$p_1 = (0, \ell_2/2, \ell_3/2), \quad p_2 = (\ell_1/4, \ell_2/2, -\ell_3/2) \\ p_3 = (-\ell_1/4, \ell_2/2, -\ell_3/2)$$

が最適であると云える。

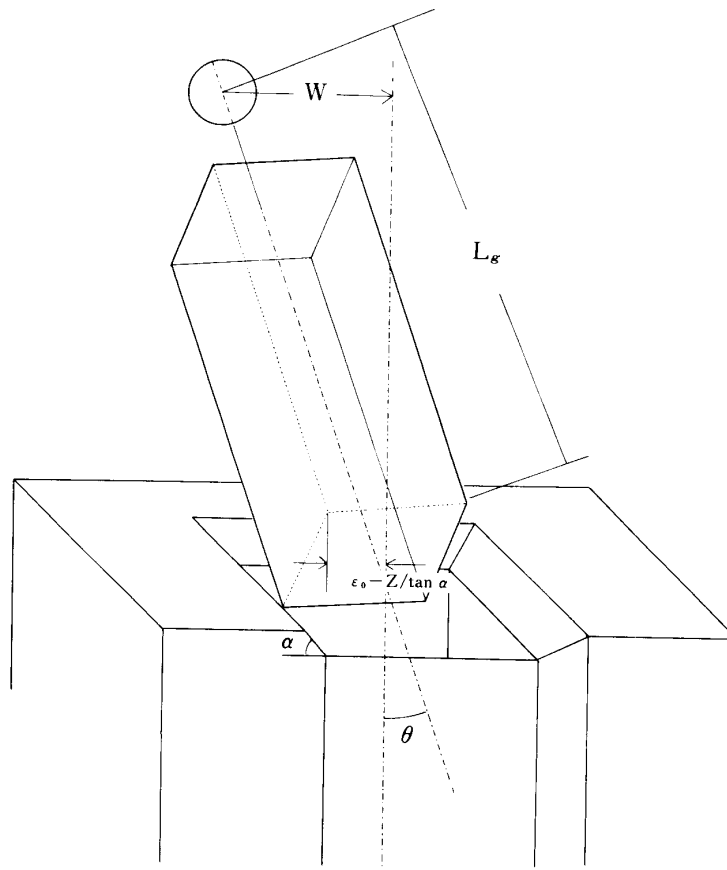


図5 挿入口での幾何学的解析の定義

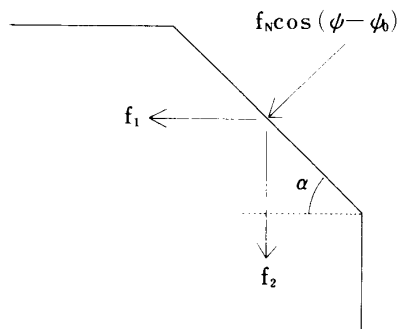


図6 挿入口での力の分解

4. 自動組立の力学的考察

図5に示すように直方体を相手部品に自動挿入することを考える。まず、相手部品の穴の位置をパターン認識で確認し、相手部品の位置を参照して相互の位置関係をきめる。直方体の初期位置を穴の中より平面 $x-y$ に対して θ_0 、その微小振れ角 ϕ_0 の傾きをもつものとする。このとき、挿入直方体上部に角度、変位センサが装填されているものとする。まず、図5に示すように、相手部品の縁に一点初期接触したときのセンサの角、変位に対す

る静力学的関係を考察する。図5の記号を用いて

$$\begin{cases} W_0 = \epsilon_0 + Lg\theta_0 \\ W = Lg\theta - Z/\tan \alpha + \epsilon_0 \end{cases} \quad (4, 1)$$

また、接触力 F_x , F_z およびモーメント M は

$$\begin{cases} F_x = -f_1 \cos(\varphi - \varphi_0) \\ F_z = f_2 \cos(\varphi - \varphi_0) \\ M = f_2 r \cos(\varphi - \varphi_0) \end{cases} \quad (4, 2)$$

なる関係が成立する。ここに

$$\begin{aligned} f_1 &= f_N(\sin \alpha - \mu \cos \alpha) \\ f_2 &= f_N(\cos \alpha + \mu \sin \alpha) \end{aligned}$$

である。また、変位に伴う力、およびモーメント M は

$$\begin{cases} F_x = -K_x(W_0 - W) \\ M = K_x L_g(W_0 - W) - K_\theta(\theta - \theta_0) \end{cases} \quad (4, 3)$$

で与えられる。これらの関係より、 $\theta - \theta_0$, $W_0 - W$ を除く各変数を消去して

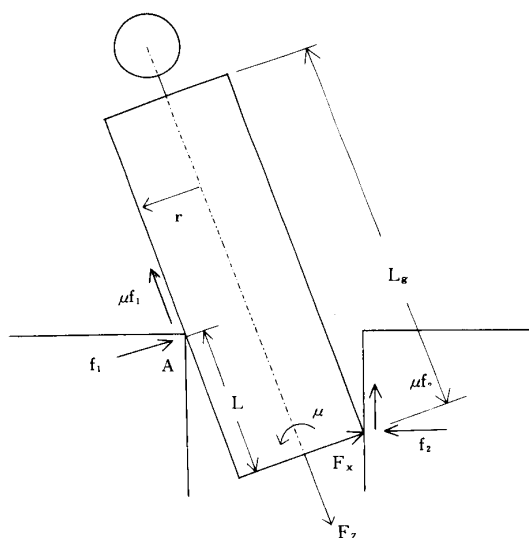


図7 二点接触の力の関係

$$\begin{cases} \theta - \theta_0 = \frac{K_x L_g Z / \tan \alpha}{(K_x L_g^2 + K_\theta) + K_\theta r A / (L_g B - r A) \cos(\varphi - \varphi_0)} \\ W - W_0 = \frac{\{K_\theta (A r - L_g B) \cos(\varphi - \varphi_0) - K_\theta A r\} Z / \tan \alpha}{(K_x L_g^2 + K_\theta)(L_g B - A r) \cos(\varphi - \varphi_0) + K_\theta A r} \end{cases} \quad (4, 4)$$

が成立する。ただし

$$A = \cos \alpha + \mu \sin \alpha, \quad B = \sin \alpha - \mu \cos \alpha$$

であり、 μ は摩擦係数である。つぎに、さらに挿入されて、図 7 に示すように 2 点で接触したときの A 点での平衡状態を考える。

$$W_2 = L_g \theta_2 - C R \quad C = \frac{R - r}{R} \quad (4, 5)$$

および、(4, 2), (4, 3) 式より

$$\begin{cases} \theta_2 - \theta_0 = \frac{K_x \epsilon_0'' (L_g - \ell_2 - \mu r \cos(\varphi - \varphi_0))}{K_x L_g^2 + K_\theta - K_x L_g (\ell_2 + \mu r \cos(\varphi - \varphi_0))} \\ W_2 - W_0 = -\frac{K_\theta \epsilon_0''}{K_x L_g^2 + K_\theta - K_x L_g (\ell_2 + \mu r \cos(\varphi - \varphi_0))} \end{cases} \quad (4, 6)$$

を得る。ここで

$$\ell \theta_2 = C D \quad (4, 7)$$

とにおいて、(4, 5), (4, 6) および (4, 7) 式より

$$\alpha \ell_2^2 - \beta \ell_2 + \gamma = 0 \quad (4, 8)$$

なる関係が成立する。ただし

$$\begin{aligned} \alpha &= K_x (\epsilon_0'' + L_g \theta_0) \\ \beta &= (L_g - \mu r \cos(\varphi - \varphi_0)) \alpha + K_x L_g C D + K_\theta \theta_0 \\ \gamma &= C D (K_x L_g^2 + K_\theta - K_x L_g \mu r \cos(\varphi - \varphi_0)) \end{aligned}$$

である。これより、(4, 8) 式の正の根 ℓ_2 は

$$\ell_2 = (\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}) / 2\alpha \quad (4, 6)$$

であり、 α , γ を小さくするようなパラメータを設定することが、より早く相手部品に挿入することが可能となる。

5. あとがき

センサをもつ多関節指と数学的対応について論じたが、問題は各関節指の自由度が低く物体に接触する面が小さく、充分なる情報を取得しがたい難点がある。今後、この面での改良が望まれる。また、最適把握問題については複雑な形状についての解析が必要である。

終りに、ロボットハンドの製作を手伝ってくれたゼミ生に深謝します。

参考文献

- 1) 塚本, 山本: 自己組織系を用いた把握形状認識, 第2回生体・生理工学シンポジウム pp. 25-29 (1987)
- 2) 塚本, 山本: 触角を持つ多関節指による物体の形状認識, 岡山理科大学紀要A 別刷 pp. 167-175 (1988)
- 3) 大森英樹: 力学的な幾何学, 日本評論社, (1980)
- 4) 穂坂 衛: 曲線, 曲面の合成および平滑化理論, 情報処理 Vol. 10 No. 3 pp. 121-131 (1969)
- 5) D.E. Whitney: Quasi-Static Assmby of Compliantly Supported Rigid Parts, ASME J. Dynamic Syst, Meas., Contr., Vol. 104 pp. 65-77 (1982)
- 6) L.Zexiang, S.Shankar: Task-Oriented Optimal Grasping by Multifingered Robot Hands, IEEE J. Robotics, Automation Vol. 4, No. 1 pp. 32-44 (1988)

Pattern Recognition by Grasping an Object and Applications to an Assembly Operations

Kenji YAMAMOTO* and Sachio TUKAMOTO*

**Department of Electronic Engineering*

Okayama University of Science

Ridai-cho 1-1 Okayama 700, Japan

(Received September 30, 1988)

A new method to recognize three-dimensional patterns and the problem of optimal grasping of an object by a multifingered robot hand is discussed.

Using differential geometry the surface of grasp is formalized, and geometric and force equilibrium conditions for successful transition of a state of contact between an assembly object and constraint points are presented.