弾性指を有するロボットハンド制御系の 把持特性の解析とシンセシス†

花 房 秀 郎*・浅 田 春比古*

Analysis of Prehension Characteristics of Robot Hand Control System with Elastic Finger and Its Synthesis

Hideo HANAFUSA* and Haruhiko ASADA*

The force controlled robots can recognize the relations between their hands and the external objects, directly or indirectly, by measuring the elastic distortions of their wrists or arms, and can adapt themselves to unknown situations. For example, in the assembly process where the robot inserts a peg into a hole, a reaction force from the peg implies an indication of how much the peg is off the center while being pushed into the hole.

In such a case, if not only the prehension force but also the prehension stiffness are variable, the force controlled robots will be versatile. We propose a robot hand of which the prehension stiffness is adjustable, according to the shape of a work piece and the content of a job. Our robot hand has three elastic fingers, where each finger can be individually driven by a pulse motor through a coil spring. And the apparent stiffnesses of the coil springs are changeable arbitrarily, by the special control algorithm of finger forces.

After describing the algorithm, the analysis of the prehension system and the physical meaning of the system parameters are discussed. Subsequently we derive the method of the parameter adjustment in order to realize arbitrary prehension forces and stiffnesses. Finally the theoretical results and the usefulness of this control method are confirmed through the experiment by the developed robot hand.

1. 緒 言

工業用ロボットの適用範囲が拡大されるにつれて、

ロボットハンドの柔軟性と、ハンドによる物体の細かな操作が必要とされるようになってきた。たとえばロボットによる自動化が強く要請されている機械部品の組立作業では、把持部品と相手部品との接触を保ちながら相対位置を合わせる作業が行われるが、このためには接触を保持するためのハンドの柔軟性と、二つの部品の接触状態を検知して作業を進行させる制御機構が必要である。

柔軟性を有するロボットとしては、腕や手首に弾性体を用い、把持部品を相手物体に押しつけて、これより生ずるひずみもしくは力を計測し、相互の位置関係を知ることによりハンドの運動を制御するものが報告されている。このうちにはピンと穴の精密はめ合せ作業を実現した例や^{1), 2)}、2本の腕の協調制御を試みた例などがある³⁾。これらの例において、ロボットハンドに設置される弾性体は接触力の検出と、接触時の緩衝に用いられるもので、把持部品の操作はハンド全体の駆動で制御され、ばね力を恣意的に調節することは考えられていない。

本文では3本の指がコイルばねを通してそれぞれ独立のモータで駆動される、融通性の高い把持特性を有するロボットハンドを提案する。モータは指の位置、ばねの変形に関連して駆動され、作業内容に応じた把持力、把持剛性を自由に得ることができるので、組立作業など物体間の接触や押し付けを保ちながら部品の位置決めをする作業では、指による微細なあやつりと、部品相互の位置関係に応じた適当な把持剛性を得ることができて好都合である。またこのようなハンドは部品間の接触力の計測にも、腕や手首の自重など余分の荷重のかかることが少なく有利であるばかりでなく、複雑な形状の対象物を確実に把握できる利点も有している⁴⁾。

† 第19回自動制御連合講演会で発表(昭51・11)

* 京都大学工学部 宇治市五ヶ庄

* Faculty of Engineering, Kyoto University, Uji
(Received March 7, 1977)

2. 指の構造と制御方式

本論文で用いる主な記号を以下に列挙する。

$A(\theta)$	2×2 回転行列
b_{ij}	結合係数
c_i	ばねちぢみの基準量
e_i, e_i^*	基本列ベクトル
F_x, F_y, M	物体に作用する力とモーメント
f_i	指の軌道方向の力
$G_m(s)$	モータの伝達関数
$H^*(\xi)$	物体面を表す関数
k_i	ばね定数
n_i	物体面の 2×1 単位法ベクトル
P	基準力
Q	把持剛性行列
U	把持系ポテンシャル
u_i	指の軌道方向を示す単位ベクトル
V	把持系ベクトルポテンシャル
v_i	指の起点を示す 2×1 ベクトル
x_i, y_i	指の位置
x_0, y_0, θ	物体の重心位置と姿勢角
$\bar{x}_0, \bar{y}_0, \bar{\theta}$	物体の基準位置
μ_i	モータ変位
ν_i	ばねちぢみ
ν_{ri}	ばねちぢみの目標値
σ_i	指の開き
ω_i	n_i と u_i のなす角
$'$	行列の転置記号

Fig. 1 に基本的な指構造の概念図を示す。すなわち3本の指は異なる3方向に開閉し、指の物体に接触する部分 T_f はモータ M_d によりばね S_d を介して駆動される。したがって物体は3個のばねにより弾性

Fig. 1 Basic structure of robot hand with elastic fingers

Fig. 2 Configuration of robot hand and object

的に把持され、 i 番目の指からは、

$$f_i = k_i \nu_i \quad (1)$$

の力を受けている。モータ変位を固定したときには、ばね定数 k_i により物体の把持される剛性は物理的に定まる。これを可変にするため、ばねの一端をモータにより駆動することを行う。たとえば T_f の変位に同じこれと反対方向に同じだけモータを変位させれば、ばねのちぢみは2倍になり見かけ上2倍のばね定数が得られる。さらに一つのばねのちぢみを他の2本の指の変位とも関連させることもできる。すなわち指を閉じた位置を起点 V_i として、物体面にあてがわれた位置までの距離を指の開き σ_i で表し、ばねちぢみが、

$$\nu_i = \sum_{j=1}^3 b_{ij} \sigma_j + c_i \quad (2)$$

になるようにモータのサーボ系を構成する。ここで b_{ij} および c_i は把持剛性を調節するための定数で任意に設定できる。(1)、(2)式より指の力は、

$$f_i = k_i \left(\sum_{j=1}^3 b_{ij} \sigma_j + c_i \right) \quad (3)$$

となる。

本論文では(3)式で与えられる力の制御を各指に施し、物体の平面運動を対象とし並進2方向と回転1方向の把持剛性を調節することを検討する。Fig. 2 に示すようにロボットハンドに固定された座標軸 x, y を設定し、物体の位置をその重心の位置 $x_0 = (x_0, y_0)'$ で表す。物体の姿勢は重心を原点とする物体に固定された座標軸 ξ, η の ξ 軸が x 軸となす角 θ で示す。指の位置 $x_i = (x_i, y_i)'$ で f_i の力が指の軌道方向に作用し、物体全体としては重心に F_x, F_y の並進力と重心まわりに M のモーメントが作用する。Fig. 3 は物体の位置と姿勢を入力とし、物体の受ける力とモー

Fig. 3 Block diagram of prehension system

ントを出力とする把持系のブロック図である。Block 1 は物体の位置姿勢を入力とし、各指の開き σ_i が物体形状により定まる関数 $h_i(x_0, y_0, \theta)$ で表されることを示している。次いで(2)式の演算によりばね変位の目標値 v_{ri} が求められ、実測値 v_i との差がモータ Gm_i の入力となっている。モータ変位 μ_i の原点と方向を適切にとれば、ばねちみは μ_i と σ_i の和となり、ばね定数 k_i を乗じて指の力 f_i になる。Block 2 は各指の力より物体に作用する力 F_x, F_y, M が発生することを示し、指の位置や物体面の角度に関係するため、物体の位置姿勢も入力の一つになっている。

3. 弾性把持系の特性解析とシンセシス

3.1 解析

Fig. 3 の系について $x_0 y_0 \theta$ と $F_x F_y M$ の静的な関係を明らかにする。物体に作用する力とモーメントは、指と物体間の摩擦を無視すれば⁵⁾、

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = - \sum_{i=1}^3 \frac{f_i}{\cos \omega_i} \mathbf{n}_i \quad (4)$$

$$M = - \sum_{i=1}^3 \frac{f_i}{\cos \omega_i} (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_0) \times \mathbf{n}_i \quad (5)$$

上式の $\mathbf{n}_i, \omega_i$ は物体の形状や指の構造に依存した物体変位の関数である。物体面の形状を、

$$H^*(\xi) = 0 \quad (6)$$

で表す。 $H^*(\xi)$ は区分的に $(N+1)$ 回連続微分可能でベクトル $\xi = (\xi, \eta)'$ の関数である。 xy 座標と $\xi\eta$ 座標の間には、

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{A}(\theta)\xi \quad (7)$$

の関係がある。ここに $\mathbf{A}(\theta)$ は、

$$\mathbf{A}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

(7)式の座標変換を(6)式に適用すれば、

$$H^*[\mathbf{A}'(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)] = H(\mathbf{x}) = 0 \quad (8)$$

(8)式では直交行列の性質、 $\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{A}'$ を用いている。把持状態では各指は物体面上に存在する。すなわち、

$$H(\mathbf{x}_i) = 0 \quad (9)$$

(9)式左辺を $\mathbf{x}_0$ について偏微分すると⁵⁾、

$$\frac{\partial H(\mathbf{x}_i)}{\partial \mathbf{x}_0} = \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}_i} \frac{\partial \mathbf{x}_i}{\partial \mathbf{x}_0} = \left\| \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}_i} \right\| \mathbf{n}_i' \quad (10)$$

ただし $\partial H / \partial \mathbf{x}_0$ は2次元ベクトルで、 $\|\mathbf{x}\|$ はベクトル $\mathbf{x}$ の長さを示す。

Fig. 2 に示すように各指は xy 平面上 $\mathbf{v}_i$ を起点とし、 $\mathbf{u}_i$ の方向に開閉する。すなわち、

$$\mathbf{x}_i = \sigma_i \mathbf{u}_i + \mathbf{v}_i \quad (11)$$

(11)式より(10)式左辺は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial H(\mathbf{x}_i)}{\partial \mathbf{x}_0} &= \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}_i} \frac{\partial \mathbf{x}_i}{\partial \sigma_i} \frac{\partial \sigma_i}{\partial \mathbf{x}_0} = \left\| \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}_i} \right\| \mathbf{n}_i' \mathbf{u}_i' \frac{\partial \sigma_i}{\partial \mathbf{x}_0} \\ &= \left\| \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}_i} \right\| \cos \omega_i \frac{\partial \sigma_i}{\partial \mathbf{x}_0} \end{aligned} \quad (12)$$

(10), (12)式より、

$$\frac{\mathbf{n}_i'}{\cos \omega_i} = \frac{\partial \sigma_i}{\partial \mathbf{x}_0} \quad (13)$$

同様に $H(\mathbf{x}_i)$ を θ について偏微分することにより、

$$(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_0) \times \frac{\mathbf{n}_i'}{\cos \omega_i} = \frac{\partial \sigma_i}{\partial \theta} \quad (14)$$

が得られる⁵⁾。(13), (14)式および(3)式より(4), (5)式は、

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = - \sum_{i=1}^3 k_i \left(\sum_{j=1}^3 b_{ij} \sigma_j + c_i \right) \left(\frac{\partial \sigma_i}{\partial \mathbf{x}_0} \right)' \quad (15)$$

$$M = - \sum_{i=1}^3 k_i \left(\sum_{j=1}^3 b_{ij} \sigma_j + c_i \right) \frac{\partial \sigma_i}{\partial \theta} \quad (16)$$

一方(8), (9), (11)式より、

$$H^*[\mathbf{A}'(\theta)(\sigma_i \mathbf{u}_i + \mathbf{v}_i - \mathbf{x}_0)] = 0 \quad (17)$$

$\partial H^* / \partial \sigma_i \neq 0$ のとき(注1)、陰関数定理より σ_i は $x_0 y_0 \theta$ の陽関数に表される。すなわち Fig. 3 の Block 1 は、

$$\sigma_i = h_i(x_0, y_0, \theta) \quad (18)$$

であって、(17)式を変形したものである。上式を(15), (16)式に用いれば物体変位 $x_0 y_0 \theta$ と力 $F_x F_y M$ の関係が得られるが、偏微分が含まれる。これを直接的に表現するため、考察すべき把持状態に基準位置 $x_0 y_0 \theta$ を設定し、この近傍での近似式を導く。表現を簡素化するため

$$\mathbf{z} = (x_0, y_0, \theta)' = (\mathbf{z}_i)$$

$$\mathbf{F} = (F_x, F_y, M)' = (\mathbf{F}_i)$$

(注1) (12)式より $\partial H^* / \partial \sigma_i = 0$ とは $\omega_i = \pm \pi/2$ を意味し、この指は把握に関係せず不適当な把持状態である。

の置き換えを行う。まず σ_i の N 次近似は、

$$\sigma_i \cong \bar{\sigma}_i + \sum_{n=1}^N \frac{1}{n!} \left(\sum_{m=1}^3 \Delta z_m \frac{\partial}{\partial z_m} \right)^n h_i(z) \Big|_{z=\bar{z}} \quad (19)$$

$$\Delta z_m = z_m - \bar{z}_m$$

$\bar{\sigma}_i$ は $\bar{z}$ での σ_i の値を示し、以後記号 $-$ をこの意味で用いる。また $h_{ii} \triangleq \partial h_i / \partial z_i$ とすれば、

$$h_{ii} \cong \bar{h}_{ii} + \sum_{n=1}^N \frac{1}{n!} \left(\sum_{m=1}^3 \Delta z_m \frac{\partial}{\partial z_m} \right)^n h_{ii}(z) \Big|_{z=\bar{z}} \quad (20)$$

(15), (16) 式に上式を代入し、 $(N+1)$ 次以上の微小量を無視すれば、

$$\begin{aligned} F_i &= \bar{F}_i - \sum_j k_{ij} \bar{h}_{ij} \sum_m \Delta z_m \frac{\partial}{\partial z_m} \left(\sum_j b_{ij} h_j \right) \Big|_{z=\bar{z}} \\ &\quad - \sum_i k_i \left(\sum_j b_{ij} \bar{\sigma}_j + c_i \right) \sum_m \Delta z_m \frac{\partial h_{ii}}{\partial z_m} \Big|_{z=\bar{z}} \\ &\quad - \sum_{n=2}^N \sum_i \frac{k_i}{n!} \left[\left(\sum_j b_{ij} \bar{\sigma}_j + c_i \right) \left(\sum_m \Delta z_m \frac{\partial}{\partial z_m} \right)^n h_{ii} \right. \\ &\quad \left. + \bar{h}_{ii} \left(\sum_m \Delta z_m \frac{\partial}{\partial z_m} \right)^n \left(\sum_j b_{ij} h_j \right) \right] \Big|_{z=\bar{z}} \end{aligned} \quad (21)$$

上式が求まる物体変位と物体作用力の関係を与える。

右辺第1項から第3項までは1次近似を表す。これをつぎの列ベクトルと行列を用いて(23)式のように書きなおす。

$$\begin{aligned} B &= (b_{ij}), \quad C = (c_i) \\ \sigma &= (\sigma_i), \quad e_i = (0, \dots, 1_i, \dots, 0)' \\ K &= \begin{pmatrix} k_1 & 0 \\ & k_2 \\ 0 & k_3 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (22)$$

$$R(z) = \begin{pmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial z_1} & \frac{\partial h_2}{\partial z_1} & \frac{\partial h_3}{\partial z_1} \\ \frac{\partial h_1}{\partial z_2} & \frac{\partial h_2}{\partial z_2} & \frac{\partial h_3}{\partial z_2} \\ \frac{\partial h_1}{\partial z_3} & \frac{\partial h_2}{\partial z_3} & \frac{\partial h_3}{\partial z_3} \end{pmatrix},$$

$$S_i(z) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 h_i}{\partial z_1^2} & \frac{\partial^2 h_i}{\partial z_1 \partial z_2} & \frac{\partial^2 h_i}{\partial z_1 \partial z_3} \\ \frac{\partial^2 h_i}{\partial z_2 \partial z_1} & \frac{\partial^2 h_i}{\partial z_2^2} & \frac{\partial^2 h_i}{\partial z_2 \partial z_3} \\ \frac{\partial^2 h_i}{\partial z_3 \partial z_1} & \frac{\partial^2 h_i}{\partial z_3 \partial z_2} & \frac{\partial^2 h_i}{\partial z_3^2} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} F &= -\bar{R}K(B\sigma + C) \\ &\quad - \left[\bar{R}KB\bar{R}' + \sum_{i=1}^3 e_i' K(B\sigma + C) \cdot \bar{S}_i \right] \Delta z \end{aligned} \quad (23)$$

(23) 式の各係数行列を、

$$P = -\bar{R}K(B\sigma + C) \quad (24. a)$$

$$Q = - \left[\bar{R}KB\bar{R}' + \sum_{i=1}^3 e_i' K(B\sigma + C) \cdot \bar{S}_i \right] \quad (24. b)$$

とおくと P は基準位置 $\bar{z}$ で物体に作用する力とモーメントを表し、 Q はこの近傍での F の z に対する変化率を表す。 P を基準力、 Q は把持系の剛性に相当することから把持剛性行列と呼ぶ。

以上より Fig. 3 に示された把持系は、静的には基準力 P と把持剛性行列 Q で特徴づけられ、より厳密には(21)式第4項の N 次微小量まで考慮すればよい。

3.2 物体作用力の分解と物理的性質

(23) 式で得られた物体作用力の1次近似についてその物理的意味を考察する。

結合係数行列 B をつぎの対称行列 B_s と歪対称行列 B_a に分解する。すなわち、

$$B_s = (B + B')/2, \quad B_a = (B - B')/2 \quad (25)$$

(24. b) 式において $\bar{S}_i$ は対称であることより、把持剛性行列 Q は B_s と B_a を用いてつぎの対称行列 Q_s と歪対称行列 Q_a に分解される。すなわち、

$$Q_s = - \left[\bar{R}KB_s\bar{R}' + \sum_i e_i' K(B\sigma + C) \cdot \bar{S}_i \right] \quad (26)$$

$$Q_a = -\bar{R}KB_a\bar{R}'$$

対称行列 Q_s は適当な直交行列 T により、 Q_s の固有値 λ_i を要素とする対角行列 D に変換できる。すなわち、

$$T' Q_s T = D \quad (27)$$

一方 Q_a はつぎの三つの行列に分解できる。

$$Q_a = \gamma_1 \Gamma_1 + \gamma_2 \Gamma_2 + \gamma_3 \Gamma_3 \quad (28)$$

ここで γ_i および Γ_i は Q の要素を q_{ij} とすれば、

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &= (q_{23} - q_{32})/2 \\ \gamma_2 &= (q_{13} - q_{31})/2 \\ \gamma_3 &= (q_{12} - q_{21})/2 \\ \Gamma_1 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \Gamma_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \\ \Gamma_3 &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Q_s と Q_a による分解に着目すれば(23)式の F は、

$$F = F_s + F_a \quad (30)$$

$$\left. \begin{aligned} F_s &= P + Q_s \Delta z \\ F_a &= Q_a \Delta z \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

に分解される。

F_s と F_a の意味を Fig. 4 を用いて検討する。Fig. 4 では簡単化のために $z_1 z_2$ 平面内での F_s と F_a を $P=0$ として表示している。図中 t_1, t_2 は T による主軸変換の結果得られた座標軸で、行列 T の列ベクトル

Fig. 4 Conservative force and vortical force

t_1, t_2 の方向に設定されている。図中に矢印 ↑ で示すように力 F_c は主軸上で $\lambda_i t_i$ となることから、各主軸方向にばね定数 λ_i のばねで把持系は等価的に置き換えられる。一方、力 F_v に関し $\gamma_1=0, \gamma_2=0$ として $z_1 z_2$ 平面内の成分 $\gamma_3 \mathbf{t}_3$ を図示すれば、図中に矢印 ↺ で示すように、反時計方向に回転する渦状の力であって、 γ_3 が渦の強さを表すことがわかる。同様に $\gamma_1 \mathbf{t}_1$ は z_1 軸まわりの、 $\gamma_2 \mathbf{t}_2$ は z_2 軸まわりの渦の成分を与える。

基準位置 $\bar{z}$ の近傍の領域 $\mathcal{B}$ を考えると、(23) 式は $\mathcal{B}$ 上の各点にベクトル $\mathbf{F}$ を対応させることを意味するので、 $\mathbf{F}$ を $\mathcal{B}$ 上でのベクトル場とみなすことができる。(23) 式は点に関するベクトル場の性質であり局所的な表示である。領域 $\mathcal{B}$ 全体に関する大域的表示を以下に求める。著者はこれまでに結合行列 $\mathbf{B}$ が単位行列である把持系の大域的表示として、把持系ポテンシャルを導入した⁵⁾。以下の結果はこれの拡張である。

ベクトル場 $\mathbf{F}$ にポテンシャルが存在するには、

$$\text{rot } \mathbf{F} = \mathbf{0} \quad (32)$$

が必要十分な条件である。 $\mathbf{B}_v = \mathbf{0}$ のときには、

$$\begin{aligned} \text{rot } \mathbf{F} &= \text{rot } \mathbf{F}_c = \text{rot } \mathbf{Q}_c \Delta \mathbf{z} \\ &= [q_{32} - q_{23}, q_{31} - q_{13}, q_{21} - q_{12}]' = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (33)$$

となってポテンシャル U が存在する。今、 U を

$$U = \frac{1}{2} \sigma' \mathbf{K} \mathbf{B} \sigma + \mathbf{C}' \mathbf{K} \sigma \quad (34)$$

で与えて、これが実際にポテンシャルの定義式、

$$\mathbf{F}_c = -(dU/d\mathbf{z})' \quad (35)$$

を満たすかを調べる。すなわち、(34)、(15)、(16) 式より、

$$-\left(\frac{dU}{d\mathbf{z}}\right)' = -\left(\frac{d\sigma}{d\mathbf{z}}\right)' [\mathbf{K} \mathbf{B}_c \sigma + \mathbf{K} \mathbf{C}] = -\mathbf{R} \mathbf{f} = \mathbf{F}_c$$

が得られ、(34) 式は拡張された把持系ポテンシャルである。なお Fig. 4 に描かれた楕円は等ポテンシャル線を示し、密な部分ほど大きな力が作用する。

一方 $\mathbf{B}_v = \mathbf{0}$ のときは行列 $\mathbf{Q}$ の対角要素が 0 であることより、

$$\text{div } \mathbf{F} = \mathbf{0} \quad (36)$$

となって、 $\mathbf{F}$ にベクトルポテンシャル $\mathbf{V}$ が存在する。

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} -\gamma_3 z_1 z_3 + \gamma_1 z_3^2 / 2 \\ -\gamma_2 z_1^2 / 2 - \gamma_1 z_1 z_2 \\ \gamma_3 z_2^2 / 2 + \gamma_2 z_2 z_3 \end{bmatrix} \quad (37)$$

とすれば、 $\mathbf{V}$ はベクトルポテンシャルの定義式、

$$\mathbf{F}_v = \text{rot } \mathbf{V} \quad (38)$$

を満たすことが示される。

U と $\mathbf{V}$ が $\mathbf{F}_c$ および $\mathbf{F}_v$ の大域的表示を与える。

以上の考察から $\mathbf{F}_c$ を保存力、 $\mathbf{F}_v$ を渦力と呼ぶ。

3.3 シンセシス

作業内容に応じ物体形状 H^* 、把持すべき基準位置 $\bar{\mathbf{z}}$ および基準力 $\mathbf{P}$ と把持剛性行列 $\mathbf{Q}$ が与えられたとき、把持系のパラメータ $\mathbf{B}$ と $\mathbf{C}$ をどのように設定して、これを実現すればよいかを考える。

(24. a) 式より $\det \bar{\mathbf{R}} \neq 0$ のとき、

$$\mathbf{K}(\mathbf{B}\sigma + \mathbf{C}) = -\bar{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{P} \quad (39)$$

これを (24. b) 式に代入し整理すれば、

$$\mathbf{B} = \mathbf{K}^{-1} \bar{\mathbf{R}}^{-1} \left[\sum_i \mathbf{e}_i' \bar{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{P} \cdot \bar{\mathbf{S}}_i - \mathbf{Q} \right] (\bar{\mathbf{R}}')^{-1} \quad (40)$$

上式を (39) 式に用い、

$$\begin{aligned} \mathbf{C} &= -\mathbf{K}^{-1} \bar{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{P} \\ &\quad - \mathbf{K}^{-1} \bar{\mathbf{R}}^{-1} \left[\sum_i \mathbf{e}_i' \bar{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{P} \cdot \bar{\mathbf{S}}_i - \mathbf{Q} \right] (\bar{\mathbf{R}}')^{-1} \bar{\sigma} \end{aligned} \quad (41)$$

(40)、(41) 式により与えられた $\mathbf{P}$ と $\mathbf{Q}$ を実現する $\mathbf{B}$ と $\mathbf{C}$ が得られる。

ここで $\det \bar{\mathbf{R}} \neq 0$ であるための条件を考える。(13)、(14)、(18)、(22) 式より、

$$\det \bar{\mathbf{R}} = \prod_{i=1}^3 \frac{1}{\cos \bar{\omega}_i} \det \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{n}}_1 & \bar{\mathbf{n}}_2 & \bar{\mathbf{n}}_3 \\ (\bar{\mathbf{x}}_1 - \mathbf{x}_0) \times \bar{\mathbf{n}}_1 & (\bar{\mathbf{x}}_2 - \mathbf{x}_0) \times \bar{\mathbf{n}}_2 & (\bar{\mathbf{x}}_3 - \mathbf{x}_0) \times \bar{\mathbf{n}}_3 \end{bmatrix}$$

右辺を第 3 行に関し展開して整理すれば、

$$\begin{aligned} &(\bar{\mathbf{x}}_1 - \mathbf{x}_0) \times \bar{\mathbf{n}}_1 \cdot \bar{\mathbf{n}}_2 \times \bar{\mathbf{n}}_3 + (\bar{\mathbf{x}}_2 - \mathbf{x}_0) \times \bar{\mathbf{n}}_2 \cdot \bar{\mathbf{n}}_3 \times \bar{\mathbf{n}}_1 \\ &+ (\bar{\mathbf{x}}_3 - \mathbf{x}_0) \times \bar{\mathbf{n}}_3 \cdot \bar{\mathbf{n}}_1 \times \bar{\mathbf{n}}_2 \neq 0 \end{aligned} \quad (42)$$

(42) 式が $\det \bar{\mathbf{R}} \neq 0$ の条件であり、各指の基準位置とそこでの物体面法ベクトルにのみ依存し、指のあてがれる方向や力には関係しない。したがって指の開

閉軌道の設定 (u_i と v_i) を適切に行い、基準位置 $\bar{z}$ を(42)式が満たされるように選べばよい。

物体の形状によってはどこに基準位置を置いてても(42)式が満たされないことがある (たとえば十分細長い長方形)。この場合も含めてシンセシス問題の一般的な解法を以下に述べる。

(24. a), (24. b) 両式をあわせた連立方程式を得るために、つぎの 12×1 ベクトル b^* , q^* と 12×12 行列 J を用いる。

$$\begin{aligned} b^* &= (\bar{f}_1, \bar{f}_2, \bar{f}_3; k_1 b_{11}, k_1 b_{21}, k_1 b_{31}, \dots, k_3 b_{33})' \\ q^* &= (-p_1, -p_2, -p_3; -q_{11}, -q_{21}, -q_{31}, \dots, \\ &\quad -q_{33})' \end{aligned} \quad (43)$$

ここで p_i と q_{ij} は P と Q の各要素である。

$$J = \begin{bmatrix} \bar{R} & 0 \\ \bar{S}^* & \bar{R} \otimes \bar{R} \end{bmatrix} \quad (44)$$

ここで記号 $\otimes$ はクロネッカ積を示し、 9×3 行列 $\bar{S}^*$ は $\bar{S}_i$ の各列ベクトル $\bar{S}_{ji}$ を、 $\bar{S}^* = (\bar{S}_{ji})$ のように並べたものである。(24. a), (24. b) 式は、

$$Jb^* = q^* \quad (45)$$

と書きなおされる。rank $J = j_r$ とするとき、 J に適当な行列 E を作用させて左上隅に正則な $j_r \times j_r$ 行列 J_1 をつくれば、通常の解法により次式に示されるような一般解が得られる。

$$b^* = E \left[\begin{pmatrix} J_1^{-1} \bar{q} \\ 0 \end{pmatrix} + \sum_{i=1}^{12-j_r} \alpha_i \begin{pmatrix} J_1^{-1} d_i \\ e_i^* \end{pmatrix} \right] \quad (46)$$

ここで d_i は、

$$E'JE = \begin{pmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{pmatrix}, \quad -J_2 = (d_1, d_2, \dots, d_{12-j_r})$$

であり、 $\bar{q}$ は 12×1 ベクトル $E'b^*$ の最初の j_r 個の要素からなる $j_r \times 1$ ベクトルで、 α_i は任意定数である。

(43) 式の b^* で最初の3要素が $\bar{f}$ を、残りが行列 KB の各要素を表したことから、(46) 式で得られた解の各要素を並びかえれば、もとの(24)式の解が導かれる。

つぎに連立方程式(45)の解が存在するためには、

$$\text{rank } J = \text{rank } (J|q^*) = j_r \quad (47)$$

すなわち q^* が行列 J の各列ベクトルと1次従属である必要があり、 P と Q に含まれる12個の要素のうち j_r 個だけは任意に与えても実現可能である。一方(47)式を満たす P と Q については、(46) 式で $(12-j_r)$ 個の任意定数が含まれたことより、 B と C を用いた実現法に $(12-j_r)$ の自由度がある。なお(2)式においてパラメータ b_{ij} と c_i を合計12個用意したことは、 $\det \bar{R} \neq 0$ の基準位置で任意の把持力 P と剛性 Q を実現するのに必要十分な条件となっている。

Fig. 5 Developed robot hand with elastic fingers

4. 実験

4.1 試作ハンド

Fig. 5 に試作したハンドを示す。3本の指は中心より120度ずつ開いた3方向に開閉する。すなわちハンドの中心を原点とする座標系で、

$$\begin{aligned} u_1 &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad u_2 = \begin{bmatrix} -1/2 \\ \sqrt{3}/2 \end{bmatrix}, \\ u_3 &= \begin{bmatrix} -1/2 \\ -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}, \quad v_i = 0, \quad i=1, 2, 3 \end{aligned} \quad (48)$$

各指はねじりコイルばねを介してパルスモータにより駆動される。コイルばねのばね定数は指先での力と変位 (σ_i) に換算して、 $k_i = 2.09 \text{ N/cm}$ ($i=1, 2, 3$) で、指の物体面に接触する部分 T_f にはローラが用いられ、摩擦が小さくなるように工夫されている。また指の力の最大値は40 N以上で、1パルスでモータは1/400回転する。

指の回転軸には指の開きを計測するためのポテンシヨメータ P_o が取付けられ、コイルばねの内部にも一端がモータ側に他端が指側に固定されたポテンシヨメータ P_v が取付けられ、ばねのねじれ角、すなわち指の力を計測してモータのサーボ系を構成する。

4.2 実験結果

i) Fig. 6 は図中に示す正三角形 (object 1) を把持させて、姿勢を変えずに ξ 軸より角度 β の方向へ d だけ変位させたときに、物体作用力 F_x, F_y を測定した結果である。基準位置は $\bar{z}=0$ 、すなわち図中の●印で示す指の配置状態で、 B と C は、

$$B = \begin{pmatrix} 2, & 0, & 0 \\ 0, & 0.5, & 0 \\ 0, & 0, & 0.5 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} -3.65 \text{ cm} \\ 0.85 \text{ cm} \\ 0.85 \text{ cm} \end{pmatrix} \quad (49)$$

としている。したがって第1指は k_1 の2倍のばね定数に、第2, 第3指は1/2になるように設定されている。図中の $\bar{z}$ 印は測定値のばらつきの範囲を示す。これは主に指と物体面間や軸受、ギヤなどの摩擦、ば

Fig. 6 Experiment of F_e for object 1

ねの残留応力が原因となってヒステリシスをもつためである。図中の直線は理論値を示す。(49)式を(24)式に代入し、

$$P = (0 \text{ N}, 0 \text{ N}, 0 \text{ Ncm})'$$

$$Q = \begin{pmatrix} -4.70 \text{ N/cm}, & 0 \text{ N/cm}, & 0 \text{ N/rad} \\ 0 \text{ N/cm}, & -1.57 \text{ N/cm}, & 0 \text{ N/rad} \\ 0 \text{ N/rad}, & 0 \text{ N/rad}, & -44.1 \text{ Ncm/rad} \end{pmatrix} \quad (50)$$

上式より $\beta = 0$ 度, 45 度, 90 度の方向の変位 d に対し, F_x と F_y はそれぞれ,

$$\left. \begin{aligned} F_{x0} &= -4.70d, & F_{y0} &= 0 \\ F_{x45} &= -3.32d, & F_{y45} &= -1.11d \\ F_{x90} &= 0, & F_{y90} &= -1.57d \end{aligned} \right\} \quad (51)$$

の力が発生する。図中の直線は(51)式のうち F_{x0} , F_{x45} , F_{y45} , F_{y90} を図示したものである。なお多角形の場合には $n \geq 2$ に対し $(\partial/\partial x_0 + \partial/\partial y_0) \cdot h_i = 0$ となり、一定の姿勢を保った状態では 1 次近似が厳密解となる。

$x_0 = 0$ の状態での回転角 θ とモーメントの関係を Fig. 7 に示す。この場合 1 次近似式は、

$$M = -44.1\theta \quad (\text{Ncm}) \quad (52)$$

となり図中に実線で、また厳密解は 1 点鎖線で示されている。 $|\theta| < 15^\circ$ の範囲では実験値および 1 次近似値ともに厳密解によく一致している。

シンセシス問題を考察すると、(42)式より $\bar{z} = 0$ の基準位置では $\det \bar{R} = 0$ となり、実際 Fig. 6 の指位置ではモーメントは指の力に依存せず 0 になっている。また $\text{rank } J = 7$ となり、 c_i は定まるが b_{ij} は不

Fig. 7 Experiment of M for object 1 and 2

定で、

$$\left. \begin{aligned} b_{11} &= b_{12} + b_{13} - b_{32} + 2 \\ b_{21} &= b_{12} - b_{13} + b_{23} + b_{31} - b_{32} \\ b_{22} &= b_{12} - b_{13} + b_{23} + 0.5 \\ b_{33} &= -b_{12} + b_{13} + b_{32} + 0.5 \end{aligned} \right\} \quad (53)$$

の関係を満たせばすべて(50)式の基準力と把持剛性になり、(49)式も解の一つであることが確かめられる。

ii) Fig. 8 の図形 (object 2) について、

$$\bar{z} = 0$$

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -0.5 \\ 0 & 1 & -0.5 \\ -0.5 & -0.5 & 1.5 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1.00 \text{ cm} \\ 0.45 \text{ cm} \\ 0.69 \text{ cm} \end{pmatrix} \quad (54)$$

と設定した場合、丸印で示す F_x , F_y の実験値 (平均値) を得た。理論基準力および把持剛性行列は、

$$P = (-2.11 \text{ N}, -2.76 \text{ N}, 12.31 \text{ Ncm})'$$

$$Q = \begin{pmatrix} -4.39 \text{ N/cm}, & -3.34 \text{ N/cm}, & -42.1 \text{ N/rad} \\ -3.34 \text{ N/cm}, & -6.75 \text{ N/cm}, & 39.9 \text{ N/rad} \\ -42.1 \text{ N/rad}, & 39.9 \text{ N/rad}, & -74.6 \text{ Ncm/rad} \end{pmatrix} \quad (55)$$

となり、図中の直線で F_{x0} , F_{y0} , F_{y90} の 1 次近似値が示され、破線で 2 次近似値が示されている。図の範囲では 1 次近似で良好な結果となっている。また θ と M の関係は Fig. 7 で $\square$ 印で表され、1 次および 2 次近似の理論値が実線と破線でそれぞれ描かれている。

Fig. 8 Experiment of Fe for object 2

$\bar{z}=0$ では (42) 式が成り立ち, $\det \bar{R} \neq 0$ より (40), (41) 式を用いたシンセシスが可能で, 実際 (55) 式より (54) 式が導かれる。

5. 結 言

本論文の主な結果を列挙する。

- 1) 把持力と把持剛性の調節できるロボットハンドの制御方式を提案した。
- 2) 把持系の解析を行い, 物体変位と物体作用力の関係を明らかにし, 把持剛性行列を導入した。
- 3) 物体作用力を保存力と渦力に分解し, その大域的表示を求めた。
- 4) 任意の基準力と把持剛性を実現するパラメータの設定法を示した。
- 5) 試作ハンドでの実験により, 2) および 4) の結果を検証した。

今後作業内容に応じてどのような把持剛性が望ましいかを明らかにし, ロボットによる汎用組立装置へと応用したい。

参 考 文 献

- 1) K. Takeyasu, T. Goto, et al.: Precision Insertion Control Robot and Its Application, Trans. ASME, Series B, **98**-4, 1313/1318 (1976)
- 2) J.L. Nevins and D.E. Whitney: Exploratory Research in Industrial Modular Assembly, Proc. 4th ISIR, 65/78 (1974)
- 3) E. Nakano, T. Ishida, et al.: Cooperational Control of a pair of Arthropomorphous Manipulators, Proc. 4th ISIR, 251/260 (1974)
- 4) 花房, 浅田: 弾性指を有するロボットハンドによる物体の安定な把握, 計測自動制御学会論文集, **13**-4, 370/377 (1977)
- 5) 花房, 浅田: 人工指による物体把握の力学, 計測自動制御学会論文集, **12**-5, 536/542 (1976)