冗長な指をもつロボットハンドによる 物体の把握とあやつり†

浅 田 春比古*・花 房 秀 郎*

Prehension and Handling of Objects by Robot Hands with Redundant Fingers

Haruhiko ASADA* and Hideo HANAFUSA*

This paper describes the handling of objects by artificial fingers, when they include some extra fingers which are not always needed in a simple gripping. Firstly, the number of controllable finger forces and the handling forces to manipulate objects are compared, and the redundancy of the finger control system is defined. Next when the redundant fingers are contained, there exists some freedom to select the finger forces which generate the same handling force. We derive the optimal solution of finger forces by using pseudo inverse matrices. Finally, the experiments verify the theoretical results and the utility of the redundant fingers to handle objects.

1. 緒 言

ロボットに設置される人工の指は直接対象物に働きかける部分であり、ロボットの適応性や融通性を高めるうえで重要な役割を果たす。

従来人工指の研究では把握様式や把握機構を論じたものが数多く報告された¹⁾なかで、指を単なる把握装置から把持物を操作する駆動装置として用いる試みがなされた。その端緒を開いたのは多関節構造の3本指ハンドの試作研究で、マテリアルズハンドリングへの応用を目差して対象物の掴み換えなど複雑な動作を達成した²⁾。最近では各指に主動指と従動指を割り当て、主動指には位置制御、従動指には力制御を施し物体操作を滑らかに実行する制御方式が報告されている³⁾。

物体操作に関し指を腕と比較すれば、指は局所的なアクチュエータであって、限られた範囲の細かな位置

や力の制御に適している。また構造上腕と著しく異なる点は、指は1本では十分に機能しえず、複数本の指が一体となって有意な働きをなす並列なアクチュエータ群とみなされることである。したがって各指を単独に制御するよりも全体としての動作を協調性を保ちつつ制御することが重要となる。

著者らは指の集合体と対象物とからなる把握系の力学⁴⁾を基礎に、安定な把握を達成するための指の配置を求める方式を開発し、弾性体を介して駆動される指が把握機能のうえで優れていることを示した⁵⁾。次いでこの弾性指の協調制御により把持物に作用するあやつり力や把持剛性を調節することを提案し⁶⁾、組立作業に応用して把持物を外部固定物にならわせた相対位置を合せる動作を達成した⁷⁾。

指により対象物をあやつるには確実な把握状態を保持しつつ把握姿勢の移動を計らねばならない。指の操作性をさらに高めるには指が余裕をもって対象物を把握し、あやつれるだけの自由度と柔軟性を備えることが必要となる。

本論では、把握のみに必要な指のほかいくつかの指を設置したとき、操作性の観点からはどのような利点が生じるかを明らかにする。腕の場合には冗長な自由度により障害物を回避するような運動が可能になるとされている⁸⁾が、指の場合のこれの効果を検討し、あまった自由度を生かして指力の最適な配分を論じる。

2. 指構造とあやつり力

本論で検討する指の構造と基礎式を導く。Fig. 1は水平面内でのあやつりを目的とした、独立なモータで駆動される n 本の弾性指からなる指構造を示す。指力が不平衡になるとき、把持物は指先の円筒ころにより滑って平面運動を行う。指と物体面のころがり摩擦

† 第17回計測自動制御学会学術講演会で発表(昭53・8)

* 京都大学工学部 宇治市五ヶ庄

* Faculty of Engineering, Kyoto University, Uji

(Received October 18, 1978)

Fig. 1 Fingers construction and handling force

は法線方向の力に比べ十分小さいものとする。

指力 $\mathbf{f} = \text{col.}[f_1, \dots, f_n]$ により把持物の重心にあやつり力 $\mathbf{F}$ が作用する。 $\mathbf{F}$ は平面内の並進力 F_x, F_y とモーメント M からなり、指力とつぎの関係にある⁶⁾。

$$\mathbf{F} = \mathbf{R}\mathbf{f} \quad (1)$$

ここで $3 \times n$ 行列 $\mathbf{R}$ は図に示すように指の接触位置を $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_i$ での物体面の単位法ベクトルを $\mathbf{n}_i = \text{col.}[n_{ix}, n_{iy}]$, $\mathbf{n}_i$ と指の開閉軌道のなす角を ω_i , 物体の重心を $\mathbf{x}_a$ とすれば,

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} -\frac{n_{1x}}{\cos \omega_1}, & \dots, & -\frac{n_{nx}}{\cos \omega_n} \\ -\frac{n_{1y}}{\cos \omega_1}, & \dots, & -\frac{n_{ny}}{\cos \omega_n} \\ -\frac{(\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_a) \times \mathbf{n}_1}{\cos \omega_1}, & \dots, & -\frac{(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_a) \times \mathbf{n}_n}{\cos \omega_n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

である。さらに図に示す指の開き $\sigma = \text{col.}[\sigma_1, \dots, \sigma_n]$ と物体の位置と姿勢をまとめたベクトル $\mathbf{z}_a = \text{col.}[x_a, y_a, \theta_a]$ を用いれば行列 $\mathbf{R}$ は次式に等しいことが示される⁶⁾。

$$\mathbf{R} = -(\partial \sigma / \partial \mathbf{z}_a)' \quad (3)$$

$\mathbf{R}$ は把持物の形状と指構造に依存した $\mathbf{z}_a$ の関数であり、これを明示するときには $\mathbf{R}(\mathbf{z}_a)$ と書く。

次いで指が物体重量 W を支え、把握を成立させるには、重力方向および Fig. 1 の x_g, y_g 軸に関する力とモーメントが釣合わねばならない。これら3条件を,

$$\mathbf{T}\mathbf{f} = \mathbf{W} \quad (4)$$

で記述する。ここで $\mathbf{T}$ と $\mathbf{W}$ は摩擦係数を μ_i とすれば,

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \frac{\mu_1}{\cos \omega_1}, & \dots, & \frac{\mu_n}{\cos \omega_n} \\ \frac{(y_1 - y_a)\mu_1}{\cos \omega_1}, & \dots, & \frac{(y_n - y_a)\mu_n}{\cos \omega_n} \\ \frac{(x_1 - x_a)\mu_1}{\cos \omega_1}, & \dots, & \frac{(x_n - x_a)\mu_n}{\cos \omega_n} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{W} = \begin{bmatrix} W \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

である。 $\mathbf{T}$ は把持物の位置 $\mathbf{z}_a$ と摩擦係数 $\mu = \text{col.}[\mu_1, \dots, \mu_n]$ に依存し、 $\mathbf{T}(\mathbf{z}_a, \mu)$ と書く。

Fig. 1 の指構造における把持剛性 $\mathbf{Q} = \Delta \mathbf{F} / \Delta \mathbf{z}_a$ の基礎式を導く⁶⁾。(1)式を基準位置 $\bar{\mathbf{z}}_a$ で近似すれば,

$$\Delta \mathbf{F} = \mathbf{R}(\bar{\mathbf{z}}_a) \Delta \mathbf{f} + \mathbf{S} \Delta \mathbf{z}_a. \quad (6)$$

ここで行列 $\mathbf{S}$ は $\bar{\mathbf{z}}_a$ での $-\sum_{i=1}^n f_i \partial^2 \sigma_i / \partial \mathbf{z}_a^2$ である。 σ の変化 $\Delta \sigma$ を計測して指力を次式のように制御する。

$$\Delta \mathbf{f} = \mathbf{K} \mathbf{B} \Delta \sigma \quad (7)$$

ここで $\mathbf{K}$ は Fig. 1 の弾性体のばね定数を要素とする対角行列で、 $\mathbf{B}$ は把持剛性を調節すべく定められる剛性ゲイン行列である。(3)式より $\Delta \sigma$ は $\bar{\mathbf{z}}_a$ の近傍で,

$$\Delta \sigma = -\mathbf{R}(\bar{\mathbf{z}}_a)' \Delta \mathbf{z}_a, \quad (8)$$

となり、(7),(8)式を(6)式に代入すれば,

$$\Delta \mathbf{F} = \mathbf{Q} \Delta \mathbf{z}_a = [\mathbf{S} - \mathbf{R} \mathbf{K} \mathbf{B} \mathbf{R}'] \Delta \mathbf{z}_a, \quad (9)$$

が得られる。右辺括弧内が可変の把持剛性を表わす。

3. 冗長指

外部物体と把持物が接触しない自然な把握状態では $\mathbf{F} = \mathbf{0}$ である。通常把持物をあやつるにはこの状態から釣合いを崩し、あやつる方向へ $\mathbf{F}$ を発生する。ここでは平面内の物体操作に関して自然な把握と任意の方向のあやつりを達成するための指力 $\mathbf{f}$ の実現可能性を検討する。

(1)式が任意な $\mathbf{F}$ について解をもつには行列 $\mathbf{R}$ が,

$$\text{rank } \mathbf{R} = 3, \quad (10)$$

である必要がある。さらに通常指は物体面を押すことはできても引くことはできないため、 $\mathbf{f} > \mathbf{0}$ なる条件が必要となる。 $\mathbf{f}_p$ と $\mathbf{f}_h$ をそれぞれ,

$$\mathbf{R}\mathbf{f}_p = \mathbf{0}, \quad \mathbf{f}_p > \mathbf{0}, \quad (11)$$

$$\mathbf{R}\mathbf{f}_h = \mathbf{F}, \quad (12)$$

を満たす一つの解とすれば次式も(1)式を満たす。

$$\mathbf{f} = t\mathbf{f}_p + \mathbf{f}_h. \quad (13)$$

$\mathbf{f}_h$ に負の要素が含まれても、正值 t を適当に大きくとれば $\mathbf{f} > \mathbf{0}$ とすることができる。任意な $\mathbf{F}$ について(12)式が解をもつことは(10)式で保証されるため、同一の位置で自然な把握と任意なあやつりが可能なための必要十分な条件は(10),(11)式が成り立つこととなる。

上式が成立するときには、(13)式のように任意な $\mathbf{F}$ に対して無数の指力の組合せが存在する。このように任意に与えられたあやつり力に関し、これを発生する実現可能な指力の組合せが無数に存在するならば、その一般解に含まれる任意定数の数を指構造の冗長度と呼ぶ。前述のハンドのように各指の自由度が1のときには、冗長度の数だけの指を冗長指と定義する。ただし(10)、(11)式における行列 $\mathbf{R}$ は指の数と配置のみならず、対象物の形状と把握位置 $\mathbf{z}_a$ に依存する。特定の対象物や特定の把握位置に対して(10)、(11)式が成り立たない場合を除き、冗長性とはほとんどすべての対象物と把握位置について成り立つ指構造の性質とする。

冗長指の効果を考えるまえに、まず冗長指がない $n=3$ の場合を検討する。(1)式より自然な把握状態では物体は、

$$\det \mathbf{R}(\mathbf{z}_a) = 0 \quad (14)$$

を満たす位置にある。なぜなら $\det \mathbf{R} \neq 0$ なら(1)式は、

$$\mathbf{f} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{F} = \mathbf{0} \quad (15)$$

なる一意な解をもち、把握不可能となるためである。一方、(14)式を満たす位置で発生可能なあやつり力は、

$$\text{rank } \mathbf{R} = \text{rank } [\mathbf{R}, \mathbf{F}] \quad (16)$$

に限られ、任意な方向へのあやつりは不可能となる。

冗長指がある場合にはこのような制約はなく、(10)、(11)式の条件は容易に達成される。また(11)、(12)式における指力を把握指力 $\mathbf{f}_p$ とあやつり指力 $\mathbf{f}_h$ と呼べば、冗長指によりあやつりとは別個に把握指力が設定できる。なお(13)式で十分大きな t を用いれば、(4)式の釣合い条件も満たされる。

4. 最適指力と最適把握位置

4.1 望ましい把握とあやつり

冗長指がある場合(1)式の解は一般に不定となった。本節ではこれらの解のうち目的とする把握とあやつりに関して最適解を導く。ここで望ましい把握とあやつりとは考えるのは、1) 対象物が確実に把持されていること、2) 過大な指力を必要とせず無理のないあやつりが可能なこと、である。また対象物を把握し、移送して組立作業など何らかのあやつりを行う一連の動作を想定した場合、対象物を把握する位置は、3) 後続の作業に適した把握位置、であることが望まれる。

対象物と作業内容が与えられたとき、上記の条件を満たす把握指力 $\mathbf{f}_p$ 、あやつり指力 $\mathbf{f}_h$ と剛性ゲイン行列 $\mathbf{B}$ 、および把握位置の最適化を以下に求める。まず

4.2 および4.3節では把握位置を固定した場合の指力制御の最適化を述べ、4.4節ではこれの結果を用いて把握位置についての最適化を示す。

4.2 把握指力の最適値

最適値を求めるに際して擬似逆行列(pseudo inverse matrix)と最良近似解の性質をまとめる⁹⁾。

【定義】 方程式 $\mathcal{F}(\mathcal{X}) = \mathcal{G}$ の最良近似解 $\mathcal{X}^0$ とは、

(i) $\|\mathcal{F}(\mathcal{X}) - \mathcal{G}\| > \|\mathcal{F}(\mathcal{X}^0) - \mathcal{G}\|$, もしくは、

(ii) $\|\mathcal{F}(\mathcal{X}) - \mathcal{G}\| = \|\mathcal{F}(\mathcal{X}^0) - \mathcal{G}\|$,

かつ、 $\|\mathcal{X}\| \geq \|\mathcal{X}^0\|$ 。

が成り立つものである。ここで $\|\cdot\|$ はベクトルや行列のユークリッド・ノルムとする。

《定理》 線形行列方程式 $\mathcal{A}\mathcal{X} = \mathcal{B}$ の最良近似解は、

$$\mathcal{X}^0 = \mathcal{A}^* \mathcal{B}$$

である。ただし $\mathcal{A}^*$ は行列 $\mathcal{A}$ の擬似逆行列である。

条件1)より把握指力 $\mathbf{f}_p$ は(11)式を満たすとともに、重力方向の力の釣合い条件の(4)式を余裕をもって満足するだけの大きさでなければならない。(4)式は各摩擦係数 μ_i がその最大値 $\mu_{\max}$ 以下の値をとって満たされればよく、一つでもこれを逸脱するものがあれば把握は維持されない。そこで各摩擦係数が $\mu_{\max}$ 以下の等しい値 μ^0 をとる場合を最も安全な場合と考えて(4)式を、

$$\mathbf{T}(\mathbf{z}_a, \mu^0) \cdot \mathbf{f} = \mathbf{W}, \quad \mu^0 = \text{col.} [\mu^0, \dots, \mu^0] \quad (17)$$

とした方程式の最良近似解を理想値 $\mathbf{f}^*$ とする。

$$\mathbf{f}^* = \mathbf{T}(\mathbf{z}_a, \mu^0)^* \mathbf{W} \quad (18)$$

(17)式で $\mathbf{T}$ の第1行の各要素と $\mathbf{W}$ が正であることから $\|\mathbf{f}\|$ を最小とする解は正であり、したがって $\mathbf{f}^* > \mathbf{0}$ となる。

一方(11)式第1式の一般解は擬似逆行列 $\mathbf{R}^*$ を用い、

$$\mathbf{f}_p = (\mathbf{I} - \mathbf{R}^* \mathbf{R}) \mathbf{c} \quad (19)$$

と表わせる⁹⁾。ここで $\mathbf{c}$ は任意ベクトルである。 $\mathbf{f}^*$ と(19)式の $\mathbf{f}_p$ は一般には一致しないので、 $\mathbf{f}_p$ のうち $\mathbf{f}^*$ に最も近いものを最適把握指力 $\mathbf{f}_p^0$ とする。すなわち、

$$\|\mathbf{f}_p - \mathbf{f}^*\| \geq \|\mathbf{f}_p^0 - \mathbf{f}^*\| \quad (20)$$

$\mathbf{f}_p^0$ は $\mathbf{c}$ に関する方程式 $(\mathbf{I} - \mathbf{R}^* \mathbf{R}) \mathbf{c} = \mathbf{f}^*$ の最良近似解を(19)式に代入して得られる。

$$\mathbf{f}_p^0 = (\mathbf{I} - \mathbf{R}^* \mathbf{R})(\mathbf{I} - \mathbf{R}^* \mathbf{R})^* \mathbf{f}^* = (\mathbf{I} - \mathbf{R}^* \mathbf{R}) \mathbf{f}^* \quad (21)$$

上式最終式は擬似逆行列の定義式より $(\mathbf{I} - \mathbf{R}^* \mathbf{R})^* = \mathbf{I} - \mathbf{R}^* \mathbf{R}$ であることを確認し、中間式に代入して展開すれば導かれる。 $\mathbf{f}_p^0$ は平面内でのあやつり力 $\mathbf{F}$ を $\mathbf{0}$ にする解のうち、重力方向の力の釣合いに関し最も安全な指力の大きさと配分を与える。

4.3 あやつり指力と剛性ゲイン行列の最適値

あやつり力 $\mathbf{F}$ を発生する指力 $\mathbf{f}_h$ は最適把握指力 $\mathbf{f}_p^0$

に重畳される。条件 1) よりあやつり指力は把握指力をあまり変化させず、また条件 2) より過大な指力の成分を含まないことが必要である。そこで(12)式の解のうち

$$\|f_h\| \geq \|f_h^0\| \quad (22)$$

となるものを最適あやつり指力 f_h^0 に選ぶ。(12)式の解が存在するなら、 f_h^0 は同式の最良近似解であって、

$$f_h^0 = R^* F \quad (23)$$

となり、解が存在しなくとも $\|Rf - F\|$ を最小にすることが最良近似解の定義から保証される。

同様に剛性ゲイン行列 B についても、各指力を大きく変化させることなく所定の把持剛性 Q を合成することが望ましい。(6)および(9)式の間関式より、

$$R(\dot{z}_a) \Delta f = [Q - S] \Delta z_a, \quad (24)$$

を得る。上式で $\|\Delta f\|$ を最小とする解 Δf^0 は、

$$\Delta f^0 = R^* [Q - S] \Delta z_a, \quad (25)$$

である。(7),(8)式を上式左辺に代入すれば、

$$-KBR' \Delta z_a = R^* [Q - S] \Delta z_a, \quad (26)$$

を得る。すべての Δz_a に関し上式が成立するには、

$$-KBR' = R^* [Q - S] \quad (27)$$

でなければならない。上式の B に関する最良近似解を剛性ゲイン行列の最適値 B^0 とすれば、

$$B^0 = -K^{-1} R^* [Q - S] (R^*)' \quad (28)$$

を得る。 B^0 は指力の変化 $\|\Delta f\|$ を最小とする把持剛性の実現法のうち、 $\|B\|$ が最小な解を与える。

4.4 把握位置の最適化

前節までは把持物の位置 z_a を固定して最適指力を導いた。これらの結果は R および T が z_a に依存するため、 z_a の関数である。本節では条件 3) より確実な把握のもとで後続の作業に必要なあやつり力が無理なく発生できるよう、 f_p^0 と f_h^0 を z_a に関し最適化して最適把握位置を定める。すなわち評価関数として、

$$J(z_a) = \|f_p^0(z_a) - f^*(z_a)\| + \|f_h^0(z_a)\|, \quad (29)$$

を用い、 J が最小値をとる z_a を最適把握位置 z_a^0 と

する。上式第1項は把握に、第2項はあやつりに関する z_a の適合性を表す。

5. 数値計算と実験

Fig. 2 に示す3種の指構造のハンドについて数値計算を行った。冗長指のないハンド1では図中に示すように、自然な把握状態で矩形に対しては長手方向に、正三角形に対しては回転方向にあやつることが不可能で、rank $R=2$ となっている。ハンド2の場合には矩形に対し回転力が発生不可能となるが、相対する2本の指をずらせて設置したハンド3ではこのような例は見当たらず、構造上操作性に優れていると考えた。

Photo. 1 はハンド3の指構造をもつハンドを試作したもので、相対する指の軌道を30 mm ずらせた。各指の機構は文献 6) で報告したものと同様、保持トルクの大きなパルスモータとねじりコイルばねを用い、ばねのねじれ角と指の開きを計測する2種類のポテンシオメータとともに、各指力が独立に制御される。

Fig. 3 より最適な把握位置と指力の配分を求めた結果を示す。Fig. 3 は物体 a を把握し移送して後、物体 b に挿入する作業を示す。このとき両物体の接触を保ちつつ相対位置を合わせるよう、文献 7) による方法で反力 λ をともにほぼ 1N に保って位置合せを進行させるあやつり力を求め、Table 1 の結果を得た。ここで F は Fig. 3 の位置において必要とされるあやつり力で、 Q_2 は位置合せの進行に応じてこれを変化させるための把持剛性行列である。

この作業をハンド2で行うには Fig. 3 に示す把握

Fig. 2 Fingers construction used in numerical calculation

Photo. 1 Developed robot hand with one redundant finger

Fig. 3 Example assembly job and optimal prehension position for hand 2

Table 1 Handling force and rigidity matrix

F'	-0.860 N	-3.521 N	24.65 Ncm
Q_1	-10.0 N/cm	0	0
	0	-10.0 N/cm	0
	0	0	-30.0 Ncm/rad
Q_2	0	0	-3.51 N/rad
	0	0	0.86 N/rad
	-3.51 N/rad	0.86 N/rad	-2.91 Ncm/rad

位置が最適となった。計算手順は、まず物体 a の図心上にハンドがある状態を z_a の初期値として与え、(2) および (5) 式の $R(z_a)$, $T(z_a)$ を構成し、その擬似逆行列より $f_p^0(z_a)$, $f^*(z_a)$, $f_h^0(z_a)$ を求めて (29) 式の J を評価する。次いで J が減少する方向へ z_a を更新し、上記の手順を繰り返して J の最小値を見出し、その位置を最適把握位置、また指力を最適指力とした。

Fig. 4 は把握位置と (29) 式の評価値 J の無次元量との関係を求めたもので、Fig. 3 に示すハンド中心の位置 X, Y をパラメータとし、姿勢角 θ を横軸とした。図中破線で示す計算値の不連続性は指の接触点が物体の角に当たり、作用力の方向が急変することによる。なお 4.2 節で述べたように理想値 f^* の各要素はすべて正であるが、 f_p^0 についての保証はない。図中 2 点鎖線で示す区間では f_p の要素に負のものが含まれ、実現不可能な指力を与えているが、 J が小さくなる場所ではすべて正であり、把握位置の最適化を行う過程で実現可能な解 f_p^0 に到達している。

最適把握位置での指力の最適値を Table 2 に示す。ここで指力は摩擦係数 μ^0 で物体重量を支えるのに必要な力 W/μ^0 で正規化されている。重力方向の釣合い条件に関し均等な余裕をもつ理想値 f^* に、最適把握指力 f_p^0 はきわめて近い。Table 1 の F は指力を f_p^0

Fig. 4 Performance index J v.s. prehension position

Table 2 Optimal finger forces and rigidity gain matrices at z_a^0 for hand 2 (finger forces are normalized by W/μ^0)

f^{*0}	0.0942	0.2235	0.3278	0.2083
f_p^{*0}	0.0871	0.2021	0.3398	0.2124
f_h^{*0}	-0.0602	0.0876	-0.0186	-0.0289
B_1^0	-0.1969	0.6738	-0.6402	0.6193
	0.6738	0.3144	0.1070	-0.7901
	-0.6402	0.1070	2.5673	-3.8301
	0.6193	-0.7901	-3.8301	6.3849
B_2^0	-0.9659	0.5615	-0.2480	0.2587
	0.5615	-1.6013	0.7367	0.1145
	-0.2480	0.7367	-0.5824	0.3326
	0.2587	0.1145	0.3326	-0.7473

より f_h^0 だけ変化させて発生できる。また (13) 式の重量を行うときの $f > 0$ を判定すれば、 $t=1$ で $f > 0$ となる。

Table 1 に掲げた把持剛性のうち Q_1 は物体 a を移送する際安定に把握^{4),5)}されているように設定したもので、(9)式で Q を負定値にすれば把持物のずれをもとに復帰させる方向にあやつり力が作用して安定となる。把持剛性を Q_1 とするには剛性ゲイン行列を Table 2 の B_1^0 にするのが最適で、指力の f_p^0 からの変化は最小である。また位置合せの過程であやつり力を変化させる Q_2 に関しては同表の B_2^0 を得た。

同様にハンド3を用いた場合の最適把握位置は Fig. 5 に実線で示す結果となり、最適指力および最適剛性ゲイン行列は Table 3 に示される。ハンド2と

Table 3 Optimal finger forces and rigidity gain matrices at z_a^0 for hand 3 (finger forces are normalized by W/μ^0)

f^{*0}	0.2447	0.1744	0.2383	0.3123
f_p^{*0}	0.2525	0.1717	0.2286	0.3146
f_h^{*0}	-0.0430	0.1048	-0.0418	0.0077
B_1^0	1.5603	0.1618	-1.7992	-0.0294
	0.1618	1.4361	0.9878	-1.6272
	-1.7992	0.9878	3.3611	-1.5343
	-0.0294	-1.6272	-1.5343	2.0192
B_2^0	-0.8338	0.4379	-0.1196	0.5171
	0.4379	-1.3997	0.7503	-0.1325
	-0.1196	0.7503	-1.3528	0.6639
	0.5171	-0.1325	0.6639	-0.8289

Fig. 5 Optimal prehension position for hand 3

比較すれば評価値 J でハンド 3 のほうが小さく、この作業に適しており、特に f_h^0 が小さく、 f_p^0 による把握状態を大きく変えることなく F が発生できる。

Fig. 6 はハンド 3 による位置合せの過程で、指先に歪ゲージを装着して指力の変化を測定した結果であり、横軸は、Fig. 5 に示す両物体の姿勢角の差 θ_1 、縦軸は各指力を示す。指力の伝達機構における摩擦のため実験値に多少ばらつきはあるが、実線で示す Table 3 から得た理論値とよく一致している。図中破線で示す指力は比較のためハンド 1 を用いた場合の指力の変化で、把握位置は Fig. 5 に鎖線で描かれている。この場合冗長指がないため最適解が得られず、厳密な比較はできないが、図では第 1, 第 2 指の負担が大きく第 3 指との差が大きい。また F を変化させるのに指力を大きく変えねばならず、 $\theta > 15^\circ$ で f_3 が 0 になるなど把握の維持が難しい。ハンド 3 では四つの指力の差が小さくほぼ均等な負担であり、指力の変化も小さくて済んだ。

Fig. 6 Experiments of finger forces

6. 結 言

各指が独立な駆動源をもつロボットハンドにおける平面内の物体操作に関し、あやつり力と指力の関係から冗長指を定義し、確実な把握状態を維持しつつ任意な方向へ把握物を操作するには冗長指が必要なことを示した。冗長指を設置した場合、あやつり力を発生する指力の組合せに自由度が生じることに着目し、これから実現可能な最適値を擬似逆行列を用いて導き、あわせて剛性ゲイン行列および把握位置の最適化を行った。また数値計算と試作したハンドにより理論結果を検証し、冗長指を 1 本付加すれば無理のない物体操作が可能であることを示した。

参 考 文 献

- 1) 花房：ロボットハンドの制御、システムと制御、22-7, 393/401 (1978)
- 2) 山下：機械で操作される人工の手の指とそのマテリアルズハンドリングへの応用、計測と制御、3-6, 429/439 (1964)
- 3) T. Okada and S. Tsuchiya: On a Versatile Finger System, Proc. 7th ISIR, 345/352 (1977)
- 4) 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)
- 5) 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)
- 6) 花房、浅田：弾性指を有するロボットハンド制御系の把握特性の解析とシミュレーション、計測自動制御学会論文集、13-6, 587/594 (1977)
- 7) 花房、浅田：拘束のある物体の能動弾性指によるあやつりとその組立作業への応用、計測自動制御学会論文集、15-1, 61/66 (1979)
- 8) 中野：多関節マニピュレータの機構と制御、計測と制御、15-8, 637/644 (1976)
- 9) T. Bouillon and P. Odell: Generalized Inverse Matrices, 1/19, 42/49, Wiley (1971)