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[†]

花 房 秀 郎*・浅 田 春比古*

Stable Prehension of Objects by the Robot Hand with Elastic Fingers

Hideo HANAFUSA* and Haruhiko ASADA*

In general, robot hands in industrial uses have specifically designed fingers corresponding to the shapes of work pieces to be handled. However, the more versatile hands are desirable in case of advanced jobs such as assembly process, because various types of mechanical parts must be handled.

This paper describes the design and control problem of universal robot hand which has elastic fingers and can grip various workpieces at the proper position suitable for their shapes. We propose an adaptive prehension system which consists of a newly designed universal hand, an ITV camera and a mini-computer. The universal robot hand has three elastic fingers which are driven by pulse motors through coil springs.

We discuss the adaptive prehension process by the above robot system. The workpieces are caught by the ITV camera and the data of the peripheral shapes are sent to the mini-computer. The computer determines the finger arrangement at the stable prehension based on the potential function theory of prehension system, which we've ever introduced as an criterion of stability. An effective and simple computation algorithm is proposed to meet an on-line use of the robot in the industrial application. The experiment verified the usefulness of the developed system.

1. 緒 言

工業用ロボットによる自動化の対象が、多種多様な機械部品を扱う複雑な作業にまで拡大されるにつれ、汎用性のあるハンドあるいは把握装置を、どのように設計し制御すればよいかが重要な問題になってきた。たとえば組立工程では形状の異なる部品をつぎつぎに

組付けするため、特定の形状の部品を一定の形態でのみ把握できる単能なハンドでは、頻繁なハンドの交換を要し効率が悪い。これに対してつまみやぎりなどさまざまな把握形態が可能なハンドでは、複数の作業条件に適応できて能率の向上が計れる¹⁾。

多様な把握形態をどのように実現するかについては、従来人間の手の機能を模倣する手法がとられ¹⁾、その主要な動作のみを抽出した簡単な機構のもの¹⁾から、複雑なリンク機構を用いた多関節指^{2)~4)}まで、数多くのハンドが研究開発されている。

対象物に適した把握の仕方を力学的に明らかにするには、対象物の形状や材質、指の構造、対象物との接触の仕方など数多くの要因が関係している。著者はこのうち対象物の形状と指の構造に注目した把握系の解析を行い、確実な把握がどのような基準のもとで達成されるかを考察して、安定把握の概念を導入した⁵⁾。

本論文ではこの理論を応用し、幾種類かの指構造を提案してこれに対する安定把握の条件を明らかにするとともに、ITV 画像を用いて安定把握姿勢を求める計算アルゴリズムおよび試作装置による任意形状物体の適応把握の実験結果について報告する。

2. 指の構造と安定把握の条件

2.1 指の構造

Fig. 1 に示す構造の指を考える。すなわち3本の指があり、ハンドの中心Oより異なる3方向に開閉し、

[†] 第 15 回計測自動制御学会学術講演会で発表 (昭 51・8)

* 京都大学工学部 宇治市五ヶ庄

* Faculty of Engineering, Kyoto University, Uji

(Received December 27, 1976)

とるところを求め、別に検討する z 方向の力および xy 軸まわりのモーメントのつりあい条件とともに、望ましい指の配置を決定する。

まず独立指の場合について条件 C を定式化する。Fig. 3 で $x_g=(x_g, y_g)$ は物体の重心を、 $x_i=(x_i, y_i)$ は指の位置を示す。またハンド中心 O の座標 $x_0=(x_0, y_0)$ でハンドの位置を、第1指の軌道が x 軸正方向となす角 θ でハンドの姿勢を表わす。 $\theta=0$ のときの各指の軌道方向を単位行ベクトル e_i で示すと、指の位置は、

$$x_i = x_0 + \sigma_i e_i B(\theta) \quad (6)$$

ここで $B(\theta)$ は 2×2 回転行列で、

$$B(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (7)$$

図形輪郭線関数 $G(x)=0$ で表わすと、条件 C は、

$$G[x_0 + \sigma_i e_i B(\theta)] = 0 \quad i=1, 2, 3 \quad (8)$$

(8)式よりハンドの位置と姿勢 x_0, y_0, θ を定めると σ_i が局所的に求まり、(2)式を用いて(5)式の U が定まる。すなわち平面運動に関し条件 C のもとで把握系ポテンシャルは x_0, y_0, θ の関数 $U(x_0, y_0, \theta)$ となる。

z 軸方向には物体の重力と指の摩擦力が作用している。物体重量を既知として物体を支えるに足る十分な力が発生するように、モータ変位 μ_i を設定する。ただし平面運動の把握系ポテンシャルが極小値をとる状態では、 xy 平面内において無摩擦の平衡状態にあり、摩擦力は z 軸方向にのみ作用して有効に物体重量を支える働きをする。

x および y 軸まわりのモーメントの平衡条件は指の配置に関係する。Fig. 3 の (b) に示す指の配置はこの意味で不適当であり、重心をかこむように配置された(a)のほうが選択されるべきである。そこで重心を中心とした半径 R の領域を設定し、ハンド中心 O がこの範囲内に存在しなければならないという条件を付加する。

以上より柱体に対する望ましい把握姿勢としてつぎの条件を考える。

- ① $U(x_0, y_0, \theta)$ が極小値をとる
- ② $|x_0 - x_g| \leq R$

連動指の場合は(8)式の σ_i を δ_{ij} にかえ、(4)式を用いることにより同様の結果が得られるが、①②の条件だけでは1本の指が物体に接触しない不十分な把握姿勢が選択されうる。これを除くためにつぎの条件を付加する。

- ③ すべての指が物体に接触する

3. ITV 画像より安定把握姿勢を求めるアルゴリズム

3.1 1M-1S 形ハンドの場合

2.1 節で述べた指構造の分類のうち、1個のモータを有するものは構造上比較的簡単であり、(2)式の第2項に見られるモータ変位 μ_i の配分を考えなくてよい点で、2M, 3M 形ハンドより制御上でも簡単である。本節では 1M-3S 形ハンドについて条件①②を満たす把握姿勢を効率よく求めるために、つぎの2段階の計算アルゴリズムを考え、①の3変数についての極小化の問題を、②を含めて1変数と2変数に関する問題に分解する。1M-2S あるいは 1M-3S 形ハンドの場合には、以下の手法を一部修正して同様に適用できる。

[Step 1] 物体の重心 x_g を求め、Fig. 4(a) のようにハンド中心 x_0 を重心上に置いて、ハンドを x_g のまわりに1回転させたときの U の変化(同図(b))を調べる。このとき U が極小値をとる角度 θ_k を求め記憶する。ただし Fig. 4 の例のように $U(\theta; x_0 = x_g)$ が多価なときには、すべての連続した区間について極小値を調べる。

θ_k の姿勢にあるときはモーメントがつりあい、およそどの位置に指を配置すべきかがわかる。しかし x, y 方向の並進力はつりあっていない。

[Step 2] Step 1 で求めた θ_k の一つをとり、この姿勢での指位置の近傍で図形輪郭を円弧で近似し、モーメントのつりあいを保ちながら x_0, y_0 に関し U を極小化する。

ここで円弧近似を用いた理由は、(1)直線近似では問題の意味が損われる、(2)モーメントのつりあい条件が容易に導かれる、の2点である。(1)については対象図形として円と三角形を考えればよい。円を直線近似すれば三角形になるが、円では不安定で三角形では安定なことがあり⁵⁾、矛盾が起こる。

Fig. 5 に近似円弧とハンドの関係を示す。各円弧の中心を (a_i, b_i) 、半径を r_i とし、指の位置が円弧上

Fig. 4 $U(\theta; x_0=y_g)$

Fig. 5 Approximation of contour by arc and fingers arrangement

どこに存在するかを求めるため、図中の角度 α, β, γ を用いる。たとえば $x_1 = (x_1, y_1)$ は、

$$(x_1, y_1) = (a_1, b_1) + r_1(\cos \alpha, \sin \alpha) \quad (9)$$

$$\tan \gamma = \frac{(b_2 - b_3) \tan \alpha + (b_3 - b_1) \tan \beta + (a_1 - a_2) \tan \alpha \tan \beta}{(a_1 - a_3) \tan \alpha + (a_3 - a_2) \tan \beta - b_1 + b_2} \quad (10)$$

一方ハンド中心 x_0 は指位置 x_i とつぎの関係にある。

$$\frac{1}{\sigma_2} \cdot (x_2 - x_0) = \frac{1}{\sigma_1} \cdot (x_1 - x_0) B(\psi_{12}) \quad (11)$$

$$\frac{1}{\sigma_3} \cdot (x_3 - x_0) = \frac{1}{\sigma_1} \cdot (x_1 - x_0) B(\psi_{13}) \quad (12)$$

ここで、

$$\psi_{12} = \cos^{-1}(\mathbf{e}_1 \mathbf{e}_2'), \quad \psi_{13} = \cos^{-1}(\mathbf{e}_1 \mathbf{e}_3')$$

(11), (12) 式を解くと、

$$x_0 = \frac{-q_2 + \sqrt{q_2^2 - 4q_1q_3}}{2q_1}, \quad y_0 = q_4x_0 + q_5 \quad (13)$$

$q_1 - q_5$ は Table 1 に示す手順で求められる。

以上より α, β を与えると (10) 式から γ が定まり、(9) 式で x_i がさらに (13) 式で x_0 が求まる。すなわち x_0 と x_i が α, β で表わされ σ_i が求まる。

$$\sigma_i = |x_0(\alpha, \beta) - x_i(\alpha, \beta)| \quad (14)$$

(14) 式を (2), (5) 式に代入して、モーメントがつりあったときの把握系ポテンシャル U^* が α, β について求められる。

$$U^* = U^*(\alpha, \beta) \quad (15)$$

$\alpha\beta\gamma$ と $x_0y_0\theta$ の間には 1:1 の関係があり(注1), $x_0y_0\theta$ に関する U の極小化を $\alpha\beta\gamma$ について行うことができる。結局 Step 2 の操作は (15) 式を $\alpha\beta$ に関し極小化することに帰着される。

(注1) 各円弧上に指の位置 3 点を与えたとき、ハンドの位置と姿勢は一意に作図でき、逆にハンドの位置と姿勢を与えたときに各指軌道は円弧と 1 点で交わり、指位置が一意に定まる。これが可能なための条件は各指が物体にあてがわれるためにあらかじめ必要な仮定であって、変数変換を行うために必要なものでない。

Table 1 Calculation of q_i

q_{11}	$-(x_1 - x_2) \cos \psi_{12} + (y_1 - y_2) \sin \psi_{12}$
q_{10}	$(x_1 + x_2) \sin \psi_{12} + (y_1 - y_2) \cos \psi_{12}$
q_9	$x_2(x_1 \sin \psi_{12} + y_1 \cos \psi_{12}) - y_2(x_1 \cos \psi_{12} - y_1 \sin \psi_{12})$
q_8	$(x_3 - x_1) \cos \psi_{13} + (y_3 + y_1) \sin \psi_{13}$
q_7	$(x_3 + x_1) \sin \psi_{12} - (y_3 - y_1) \cos \psi_{13}$
q_6	$x_3(x_1 \sin \psi_{13} + y_1 \cos \psi_{13}) - y_3(x_1 \cos \psi_{13} - y_1 \sin \psi_{13})$
q_5	$(q_6 \sin \psi_{12} - q_9 \sin \psi_{13}) / (q_8 \sin \psi_{12} - q_{11} \sin \psi_{13})$
q_4	$(q_{10} \sin \psi_{13} - q_7 \sin \psi_{12}) / (q_8 \sin \psi_{12} - q_{11} \sin \psi_{13})$
q_3	$q_5^2 \sin \psi_{12} - q_{11} q_5 + q_9$
q_2	$2q_4 q_5 \sin \psi_{12} - q_{10} - q_4 q_{11}$
q_1	$(1 + q_4^2) \sin \psi_{12}$

モーメントのつりあいが成り立つためには、三つの力の作用線が 1 点で交わらねばならない。このために、

以上の計算アルゴリズムを含めて全体の処理手順を Fig. 6 に示す。最初基準位置へロボットが駆動され、画像データが入力される。物体重心を計算した後データを xy 座標へ変換し、さらに反時計方向に輪郭をたどる順序にサンプル点を抽出する。

以上の前処理の後に前述の Step 1 と 2 の計算を実行する。 θ に関し U が極小値をとる姿勢 θ_k の一つを選び、輪郭の円弧近似を行って U^* の極小点を探索す

Fig. 6 Flow chart

Fig. 9 Developed robot hand with elastic fingers

し、ミニコンにより位置と速度の制御が行われる。制御モードには常時ミニコンの管理下にあるものと、ハードウェアの閉ループ系により一度位置の指令を受けた後、ミニコンと独立に作動する2種類のモードがある。

Z軸摺動部には ITV カメラが取付けられ、作業台上の柱体の断面形状がとらえられる。インタフェースでは画像信号を2値化し、図形輪郭の計測を行ってミニコンへ出力する。すなわち画面左端から図形輪郭線に到るまでの距離が、一定周波数のパルスを計数することにより測られる。このためミニコンに読まれるデータの数は、水平走査線が輪郭線と交わる点の数に等しくなり、多くのメモリーを必要とせずすんだ。

ハンドの部分を Fig. 9 に示す。3本の指が中心より120度ずつ開いた3方向に開閉し、各指の回転軸はモータ側の出力軸とねじりコイルばねで連結されている。したがってばね変位 μ_i は指側とモータ側の2軸のねじれ角に相当し、ばね定数は3個とも $k_i = 50$ Ncm/rad., また指先とばねの間の伝達機構では $h_i = 0.4$ rad/cm となっている。このハンドは3個のモータと3個のばねを有するため 3M-3S 形であるが、3個のモータを同時に駆動するため、機能的には 1M-3S

Fig. 10 Shape of test work piece

形である。

4.2 実験結果

Fig. 10~Fig. 12 に 1M-3S 形ハンドの場合の実験結果を示す。Fig. 10 の実線で描かれた断面形状の物体について、画像の前処理を行った結果図中のドットのサンプル点を得た。すなわち ITV の水平走査の順に入力された画面左端から輪郭線までの距離データを、輪郭線の順序に並びかえ、等間隔なサンプル点を抽出し、これを xy 座標へ変換した。

Fig. 11 は Step 1 の θ に関する U の変化を調べた結果である。図中のドットはほぼ120度間隔にある3サンプル点をとってポテンシャル U を計算したもので、実線はオフラインでの厳密な計算結果である。この場合の計算誤差はサンプル点の間隔に依存している。3本の指は120度ごとの等間隔に配置されているため、 $U(\theta; x_0 = x_s)$ は同じパターンを3回繰返し、111度、153度、168度の3点で極小値をとっている。図中の番号はこれらの極小点に対応する、Fig. 10 のサンプル点番号である。

三つの極小点のうち U の小さいものを優先してつぎ

Fig. 11 Experimental result of Step 1 for 1M-3S hand

Fig. 12 Minimizing process of U^* for 1M-3S hand $k_i = 50$ Ncm/rad. $h_i = 0.4$ rad/cm $\mu_i = 0$ $i = 1, 2, 3$

Fig. 13
Minimizing
process of
 U^* for 1M-
2S hand k_1
 $=50$ Ncm/
rad. $k_2=$
 100 Ncm/
rad. $\mu_i=0$
 $i=0.4$ rad./
cm $i=1,2$

の Step 2 の処理を行った。この場合 4, 27, 52 番のサンプル点の近傍で円弧近似を行い、Fig. 10 に示す三つの円弧を得た。円弧の半径はサンプル点間の曲率を調べて、これが 4, 27, 52 番のおおのの曲率と比べて所定の誤差範囲内にある区間で平均をとり、その逆数から求めた。図中の扇形の範囲内で平均がとられ、これを近似有効範囲とし、指位置が極値探索の過程でこの範囲を外れたなら、その点で円弧近似がやりなおされる。Fig. 12 は Step 2 の $\alpha\beta$ に関する極小化の過程を示したもので、オフラインで求めた U^* の等ポテンシャル線に対し、図中の矢印の経路をたどって中央の極小点に到達している。極値探索の初期値は Step 1 の結果を用い、サンプル点 4, 27 番の角度を α と β の出発点とした。求められた極小点に対応するハンドの姿勢は Fig. 10 に示され、○印の位置が安定な指の配置である。

Fig. 13 は 1M-2S 形ハンドについて同じ Fig. 10 の図形に対し Step 2 の処理を行ったもので、 P_0 より出発し P_1 で境界線 E に達し、 E の接ベクトル A_1 の方向に進んで P_3 で極小点に到達している。これを通常のこの配法で行うと、一部が図中の細線で示されるようなジグザグな経路になり、収束が大きく遅れた。求まった極小点に対応する指の配置は Fig. 10 で ▼ と ▽ 印で示され、▽印の 2 本の指が連動指である。同様に 1M-1S 形ハンドの安定な指の配置は Fig. 10 に ◆ 印で示されている。この場合境界線 E は 3 本でき、これらが 1 点で交わったところが極小点になっている。

プログラムは ITV およびロボットとの入出力部がアセンブラ (約 1 kw) で、計算部がフォートラン (約 10 kw) で書かれ、他に画像データの記憶を主とする作業領域として 6 kw を要した。処理時間は図形の前処理に 1.8 秒、Step 1 に 2.0 秒、Step 2 に 1M-3S 形ハン

ドのとき 2.8 秒、1M-2S 形で 3.4 秒、1M-1S 形で 3.2 秒を要した。

なおロボットの駆動には約 4 秒を要するので、Fig. 6 に示すように、重心が計算された後すぐに物体重心上への移動を始め、正確な極小点が計算された時点で重心からの位置修正を行った。前節で述べたようにハードウェアの閉ループ系により、ミニコンはロボットの移動中にこれと独立に重心計算以降の処理を行い、数値計算のみを行う時間は全体を通じ約 3 秒になった。

4.3 考察

(1) 円弧近似について Step 2 の計算精度は図形輪郭をどのように近似するかに依存する。正確な近似を行うには、一つの円弧の近似有効範囲を狭くして、多くの円弧をあてはめる必要があるが、処理時間が長くなる。逆に広い範囲を一つの円弧で表現すれば誤差が大きくなる。

極値探索の過程で指位置がどれだけ移動して安定な位置へ到ったかを調べると、Fig. 10 の例からわかるように曲率の小さなところほど移動量大きい。文献 6) では自由曲線を円弧で近似するとき、曲率の小さなところほど長い区間にわたって一つの円弧で近似できることが指摘されている。したがって指の移動量大きいところでは近似有効範囲が広くとれ、少ない個数の円弧を用いても満足な計算精度があげられた。

機械部品の場合には円と直線で形づけられていることが多い。本近似方式では直線は十分大きな半径の円弧で、また尖った部分は十分小さな半径の円弧で近似

object number	0S	1M-1S	1M-2S	1M-3S
1				
2				
3	—			
4	—			
5	—			—
6				
7				

Fig. 14 Finger structure and possibility of stable prehension

される。これらの近似の計算誤差に及ぼす影響は無視できることが確認でき、本方式は特に機械部品の場合に有効である。

(2) 指構造と安定点の存在性について **Fig. 14** はさまざまな形状の物体について、各指構造のハンドの安定把握姿勢を求めた結果である。図中空白欄は安定点が存在しなかったことを意味し、*印は矢印の方向に把握系ポテンシャルが変化しない中立安定なものを示し、また③と書いたものは2本の指だけが物体に接触可能で、条件③を満たさないことを示している。

保持機能を有するパルスモータとばねを用いることにより、力 f_i が指の開き量 σ_i に比例する指機能が実現できた。これの効果を調べるために f_i が σ_i に依存せず一定値をとるもの (0S) を比較のため考えた。Fig. 14 の1番の図形ではいずれのハンドも安定点をもつが、3番では0Sだけが安定点をもたず、他の物体についても不満足な結果が得られた。

連動指の効果を調べると、5番の楕円で独立指の1M-3S形は不安定である⁵⁾。1M-2Sと1M-3S形を比較すると、7番の図形で1M-1S形は条件③を満たさず順応性に乏しい。以上より1M-2S形ハンドが安定性と順応性の両方に優れていることがわかる。

2個以上のモータをもつハンドでは各指の力の比を任意に設定できる。このことは各対象物について把握したい箇所を与えて、そこで安定になるよう指の駆動系を調節できる可能性を意味し、さらに適応性に富む機能が得られるものと考えられる。

5. 結言と謝辞

3本指のロボットハンドにITVカメラを用い、さまざまな形状の柱状物体を安定に把握することを実現した。最初指構造とその機能を分類し、各ハンドの把握系ポテンシャルを求め、柱体に対する安定な把握状態を定めた。ついで柱体断面の形状から安定な把握のための指の配置を求める計算アルゴリズムを示し、ミニコンを用いた安定把握ロボットを試作して、その実験結果から本方式を検討し、安定点の存在性とハンドの指構造の関係を考察した。

最後に実験装置の製作に多大のご協力をいただいた、新明和工業(株)開発センター所長 清水三郎氏、今北勝氏、小山英夫氏ならびに京都大学工学研究科大学院(精密工学専攻)糸井康氏に深謝する。

参 考 文 献

- 1) F. Skinner: Multiple Prehension Hands for Assembly Robots, Proc. of 5th Int. Sym. on Industrial Robots, 77/87 (1975)
- 2) M. Rakic: The 'Belgrade Hand Prosthesis', Proc. of Instn. Mech. Engrs, **183** Pt. 3F, 60/67 (1968-69)
- 3) 伊藤: 握み手の動作機能解析, バイオメカニズム, **3**, 133/144, 東京大学出版会 (1975)
- 4) 岡田: 指の運動と手作業の分析, 3)に同じ 145/154
- 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)
- 6) 金江, 小杉: 円弧による曲線の近似表現, 情報処理, **12-12**, 754/760 (1971)