包み込み把握の接触点同定*

舟橋 康行^{*1}, 楯 將博^{*2}

Contact Point Identification in Enveloping Grasp

Yasuyuki FUNAHASHI and Masahiro TATE

The enveloping grasp is a stronger grasp than others. This grasp has a disadvantage in that it is difficult to determine contact points and contact forces. In this paper we discuss the identification of unknown parameters, which are contact points and contact forces, in the enveloping grasp, and show a necessary and sufficient condition of identification. It requires more than three joints between adjoining contact points.

Key Words: Robotics, Mechanics, Whole-Arm Manipulation, Enveloping Manipulation, Contact Point, Contact Force, Identification

1. 緒 言

近年, 多品種少量生産化に伴い生産ラインにはいろいろな形状の物体が流れるようになった。そのため従来の平行グリップなどでは対応しきれなくなっている。そこで複雑な形状の物体に対しても把握が可能で, より高度な操りができる多関節形のロボットハンドが研究開発されている。

多関節ハンドで対象物体を把握するときの方法として, 次の二つの方法がある(図1)。

- (a) 指先での把握
- (b) インナーリンクでの把握

図1(a)はリンクの先端(指先)のみで物体と接触している把握である。この把握方法は対象物体を操作しやすいが, 対象物体の形状が正確にわかっていないと把握できない。また外力に対して弱い。それに対して図1(b)のインナーリンクでの把握とはリンクの腹の部分で物体と接触する把握のことであり, 対象物体の大体の形状がわかっていれば把握が可能である。さらに図1(c)のようにインナーリンクを使って対象物体

を包み込むと物体をより強固に把握でき, 外乱に対して強い。しかしインナーリンクを使った把握では, リンクのどの位置で物体と接触しているのか, またそこでどのような接触力が働いているのかがわかりにくい。

そこで本稿では図1(c)の包み込み把握の接触点, 接触力を同定する方法について考察する。一般的に, ハンドと把持物体の接触点を求める方法には2種類ある。一つは視覚センサや触覚センサなどを用いて直接的に接触点を求める方法であり, もう一つは関節トルクセンサや関節角度センサなど, 元々ロボットに内在しているセンサの情報から計算により間接的に接触点を求める方法である。後者のほうが特別な装置を必要とせず, より实际的であり本稿でもこちらの方法を用いて接触点を求める。

このように特別なセンサを用いずに間接的に接触点

図1 指先とインナーリンクによる把握

* 原稿受付 平成6年6月24日。

^{*1} 正員, 名古屋工業大学 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)。

^{*2} 学生員, 名古屋工業大学大学院。

を求める方法として三村氏の研究⁽¹⁾⁽²⁾があり、図1(b)の把握方法について接触点が同定可能な条件を明らかにしている。本稿では図1(c)の包み込み把握における接触点の可同定性について考察する。

また包み込み把握におけるリンクと物体との接触点を間接的に求める研究として金子氏の研究⁽⁵⁾⁽⁶⁾がある。これは自己姿勢変形性という概念から接触点を求めている。しかしこの検出方法ではリンクの把握形状を微小に変形させて接触点を求めるため、求めた接触点は近似的なもので必ず誤差が含まれていた。

それに対して本稿では正確な接触点を求める。そのために、まず2章において二次元平面のインナーリンクによる包み込み把握について定式化を行う。次に3章ではその定式化に基づき、関節トルク、角度センサの情報のみから接触点、および接触力を同定するための必要十分条件を示す。

2. 包み込み把握の定式化

この章では二次元平面内でのシリアルリンクによる包み込み把握における二つの基本関係式を導く。それは関節トルクと接触力との関係式と、接触力と外力/外モーメントとの関係式である。

まず図2に示すように記号を定義する。

Σ_b : リンク根元においた基準座標系

Σ_o : 対象物体に固定された座標系

θ_i : 第 i 番めの関節角

τ_i : 第 i 番めの関節トルク

図2 記号の説明

図3 包み込み把握の分解

l_i : 第 i 番めのリンクの長さ

l'_i : 第 i 番めのリンクの接触点の関節からの距離

f_i : 第 i 番めのリンクの接触点に発生する力

r_i : 第 i 番めのリンクの接触点の位置ベクトル

r_o : Σ_o から見た Σ_o の原点の位置ベクトル

f_e : 対象物体(Σ_o)に働く外力

m_e : 対象物体(Σ_o)に働く外モーメント

n : リンクまたは関節の総数

m : 接触点の総数

$\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)^T$: 関節角度ベクトル

$\tau = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)^T$: 関節トルクベクトル

$F_e = (f_e^T, m_e^T)^T$: 外力/外モーメントベクトル

2.1 関節トルクと接触力との関係式

図3(a)のように包み込み把握が完了して静止した状態を考える。このとき関節トルクと接触力は釣合っている。この状態は図3(b)のように1点で接触して釣合っている状態の重ね合せとして考えることができる。つまり、図3(a)の関節トルクと接触力の釣合い式は、図3(b)のそれぞれの釣合い式の重ね合せで表現できる。

そこでまず図3(b)のようにハンドが対象物体と i 番めのリンクの1点でのみ接触している場合を考える。仮想仕事の原理から関節トルクと接触力との間には次の式が成立する⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

$$\tau = J_i^T f_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで J_i はヤコビ行列であり、リンク根元からの接触点の位置ベクトルを $r_i = (x_i(\theta), y_i(\theta))^T$ とすると、

$$J_i = \frac{\partial r_i}{\partial \theta^T} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_i}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x_i}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial x_i}{\partial \theta_n} \\ \frac{\partial y_i}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y_i}{\partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial y_i}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{2 \times n} \quad \dots\dots\dots (2)$$

与えられる。

シリアルリンクのハンドでは接触点の位置ベクトルは次式で与えられる。

$$r_i = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 c_1 + l_2 c_2 + \dots + l_{i-1} c_{i-1} + l'_i c_i \\ l_1 s_1 + l_2 s_2 + \dots + l_{i-1} s_{i-1} + l'_i s_i \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし

$$s_i = \sin\left(\sum_{k=1}^i \theta_k\right), \quad c_i = \cos\left(\sum_{k=1}^i \theta_k\right)$$

したがって式(1)中のヤコビ行列の転置は、

$$\mathbf{J}_i^T = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 - l_2 s_2 - \cdots - l'_i s_i & l_1 c_1 + l_2 c_2 + \cdots + l'_i c_i \\ -l_2 s_2 - \cdots - l'_i s_i & l_2 c_2 + \cdots + l'_i c_i \\ \vdots & \vdots \\ -l_{i-1} s_{i-1} - l'_i s_i & l_{i-1} c_{i-1} + l'_i c_i \\ -l'_i s_i & l'_i c_i \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここで $\mathbf{J}_i^T$ が特殊な形になっていることに注目し、ある行からその一つ下の行を引くと式(1)は次のように簡単になる。

$$\tilde{\boldsymbol{\tau}} = \tilde{\mathbf{J}}_i^T \mathbf{f}_i \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし

$$\tilde{\boldsymbol{\tau}} = \begin{bmatrix} \tau_1 - \tau_2 \\ \vdots \\ \tau_{i-1} - \tau_i \\ \tau_i - \tau_{i+1} \\ \vdots \\ \tau_{n-1} - \tau_n \\ \tau_n \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{J}}_i^T = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 & l_1 c_1 \\ \vdots & \vdots \\ -l_{i-1} s_{i-1} & l_{i-1} c_{i-1} \\ -l'_i s_i & l'_i c_i \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

これがハンドと対象物体が1点で接触しているときの関節トルクと接触力の釣り合い式である。この式を各接触点について立て、足し合わせることで包み込み把握の釣り合い式を求めることができる。

$$\tilde{\boldsymbol{\tau}} = \sum \tilde{\mathbf{J}}_i^T \mathbf{f}_i \quad \dots\dots\dots (6)$$

これが包み込み把握における関節トルクと接触力との基本関係式である。

2.2 接触力と外力/外モーメントとの関係式

2.1節と同様に系が静止した状態を考える。このとき接触力 $\mathbf{f}_i$ と物体に働いている外力/外モーメント $\mathbf{F}_e$ は釣り合っているので、次の関係式が成立する。

$$\mathbf{F}_e + \sum \mathbf{G}_i \mathbf{f}_i = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし

$$\mathbf{G}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -(y_i - y_o) & x_i - x_o \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{3 \times 2}$$

ここで対象物体の任意の位置を $\mathbf{r}_o = (x_o, y_o)^T$ とした。

3. 可同定性

3.1 仮定 この章では2章で定式化された二つの基本関係式を用いて、接触点、接触力、外力/外モーメントを同定することを考える。

次の仮定のもとで議論を進める。

(1) 包み込み把握はシリアルリンクにより二次元平面内で行われる。

(2) 対象物体には未知外力が加わっているが、未知外力と接触力とは釣り合っており系全体は静止している。

(3) 各リンクの接触点は多くても1点とする。

(4) 各関節角と関節トルクは測定可能である。

(5) 対象物体とハンドがどのリンクで接触しているかはあらかじめわかっているものとする。

仮定(1)、(2)は2章で導いた基本関係式(6)、(7)を成立させる条件である。仮定(3)の必要性は、一つのリンクに二つ以上の接触力が働いていると、それらを関節トルクの情報のみから別々に同定することはできないのでこの仮定を設けた。この仮定は対象物体の形状を円やだ円のような凸形物体とするならば容易に満たされる。また凸多角形の場合でもリンクと辺接触を行わない限り満たされる。仮定(5)は包み込み把握を行うとき、リンクの動かし方と関節トルクの変化からどのリンクに接触点があるかはわかるので、この仮定は妥当である。

3.2 可同定性 はじめに未知数と既知数を明確にしておく。

未知数 $\dots l'_i, \mathbf{f}_i, \mathbf{F}_e$

既知数 $\dots l_i, \tau_i, \theta_i$

ここで外力/外モーメント $\mathbf{F}_e$ は式(7)にしか含まれていない。式(7)(式の総数:3)を使い $\mathbf{F}_e$ (未知数:3)を求めるには、式(7)に含まれるほかの未知数 $l'_i, \mathbf{f}_i$ を式(6)から決定しておく必要がある。逆にいえば $l'_i, \mathbf{f}_i$ が決定されれば $\mathbf{F}_e$ は求めることができる。以上から同定の手順は、まず関節トルクと接触力の関係式である式(6)を用いて接触点位置 l'_i と接触力 $\mathbf{f}_i$ を同定し、次にそれらを式(7)に代入して外力/外モーメント $\mathbf{F}_e$ を決定するという手順である。以降では接触

点位置 l_i と接触力 f_i の可同定性について考える。

3・3 接触点と接触力の可同定性 未知数 l_i, f_i が求めるべき接触パラメータである。各接触点 l_i と $f_i = (f_{ix}, f_{iy})^T$ の三つの未知数があり、 m 個の接触点があったとすると未知数は $3m$ 個になる。それに対して式(6)の式の総数はリンクの数、もしくは関節の数である n 個になる。式(6)を未知数について解くためには式の数未知数の数より多くないといけないので、まず次の式が必要条件として得られる。

$$m \leq \frac{n}{3} \dots\dots\dots (8)$$

つまり接触点の数がリンクの数の $1/3$ 以上では接触点の同定が不可能なことを意味する。しかしこの関係を満たせば必ず同定できるわけではない。なぜならこの条件は式が独立か従属かについて考えていないからである。そこで3・4節からは式の独立性も考慮した可同定性について考察する。議論の見通しをよくするために、まず接触点が1点の場合、2点の場合について考え、最後に m 点の場合に一般化する。

3・3・1 接触点が1点の場合 一つの接触点が i 番めのリンク ($1 \leq i \leq n$) にあるとき、式(6)は次のようになる。

$$\bar{\tau} = \bar{J}_i^T f_i \dots\dots\dots (9)$$

この式の $i+1$ から n 番めの式は $0=0$ となり意味がないので省略する。また1から $i-1$ 番めの式が未知数 l_i, f_i について線形の式で、最後の i 番めの式のみ非線形である。そこで式(9)を線形な式と非線形な式に分離して書き直すと次のようになる。

$$\tau_A = A f_i \dots\dots\dots (10)$$

$$\tau_i = [-l_i s_i \quad l_i c_i] f_i \dots\dots\dots (11)$$

ただし

$$\tau_A = \begin{bmatrix} \tau_1 - \tau_2 \\ \vdots \\ \tau_i - \tau_{i-1} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 & l_1 c_1 \\ \vdots & \vdots \\ -l_{i-1} s_{i-1} & l_{i-1} c_{i-1} \end{bmatrix} \in R^{(i-1) \times 2}$$

(a) 同定可能 (b) 関節数が足りない (c) 特異姿勢

図4 接触点が1点の場合の可同定性

いま行列 A のランクが2であれば、 $\tau_A = A f_i$ より f_i について解くことができる。求められた f_i を非線形の式(11)に代入すると l_i を求めることができる。逆に行列 A のランクが2より小さいときは、独立な式の数は線形式が1以下、非線形式が1になり合計2以下である。それに対して未知数は l_i, f_i の三つであり、未知数のほうが独立な式の数より多くなって解くことはできない。

つまり $\text{rank}(A)=2$ であることが式(9)を未知数 l_i, f_i について解くための必要十分条件である。

それでは $\text{rank}(A)=2$ がリンクのどのような状態を表しているのかについて考える。 $\text{rank}(A)=2$ であるためには、まず行列 A が二つ以上の行をもたなければいけない。行列 A の行数は接触点のないリンクの数に対応しているので、リンクの根元から接触点までに対象物体に接触していないリンクが二つ以上必要である。しかし接触していないリンクが二つ以上あればそれだけでよいというわけではない。例えば k 番めの関節が一直線 ($\theta_k=0^\circ$) や折返している ($\theta_k=180^\circ$) と、この状態は特異姿勢と呼ばれ、行列 A は以下のようになる。

$$A = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 & l_1 c_1 \\ \vdots & \vdots \\ -l_{k-1} s_{k-1} & l_{k-1} c_{k-1} \\ -l_k s_k & l_k c_k \\ \vdots & \vdots \\ -l_{i-1} s_{i-1} & l_{i-1} c_{i-1} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{cases} \begin{bmatrix} -l_1 s_1 & l_1 c_1 \\ \vdots & \vdots \\ -l_{k-1} s_{k-1} & l_{k-1} c_{k-1} \\ -l_k s_{k-1} & l_k c_{k-1} \\ \vdots & \vdots \\ -l_{i-1} s_{i-1} & l_{i-1} c_{i-1} \end{bmatrix} & (\theta=0^\circ) \\ \begin{bmatrix} -l_1 s_1 & l_1 c_1 \\ \vdots & \vdots \\ -l_{k-1} s_{k-1} & l_{k-1} c_{k-1} \\ l_k s_{k-1} & -l_k c_{k-1} \\ \vdots & \vdots \\ -l_{i-1} s_{i-1} & l_{i-1} c_{i-1} \end{bmatrix} & (\theta=180^\circ) \end{cases}$$

いずれの場合も k 番めと $k-1$ 番めの式は従属になる。つまり、関節が一直線や折り返されているとき、独立な式は1つしか出てこない。

以上から接触点と接触力が同定可能であるための条件 $\text{rank}(A)=2$ を具体的にリンクの状態で言い直す

(a) 同定可能 (b) 関節数が足りない (c) 特異姿勢

図5 接触点が2点の場合の可同定性

と次のようになる。「接触点の一つのとき、その接触点、接触力を同定するためには、シリアルリンクの根元から接触点のあるリンクまでに特異姿勢でないリンクが二つ以上必要である(図4)」また関節数に着目して「根元から接触点までに特異姿勢でない関節が三つ以上必要である」と表現することもできる。

この接触点が1点の場合は、図1(b)のようにそれぞれの指が基準座標系に固定されていて、各指に一つの接触点がある場合に相当し、ここで求めた条件は三村氏が文献(2)で示した条件と本質的に一致する。

3.3.2 接触点が2点の場合 次に接触点が2点の場合について考える。

いま i 番めと j 番めのリンク ($1 \leq i < j \leq n$) に接触点があるとすると式(6)は次のようになる。

$$\hat{\tau} = \hat{J}_i^T f_i + \hat{J}_j^T f_j \quad \dots\dots\dots (12)$$

3.3.1 項と同様に未知数 l_i, f_i, l_j, f_j に対して線形の式と非線形の式に分解すると、次のようになる。

$$\begin{bmatrix} \tau_A \\ \tau_B \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} f_i \\ f_j \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_i - \tau_{i+1} \\ \tau_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_i s_i & l_i c_i & -l_j s_j & l_j c_j \\ 0 & 0 & -l_j s_j & l_j c_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_i \\ f_j \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ただし

$$\tau_A = \begin{bmatrix} \tau_1 - \tau_2 \\ \vdots \\ \tau_{i-1} - \tau_i \end{bmatrix}, \quad \tau_B = \begin{bmatrix} \tau_{i+1} - \tau_{i+2} \\ \vdots \\ \tau_j - \tau_{j-1} \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} A & A \\ 0 & B \end{bmatrix} \in R^{(j-2) \times 4}$$

$$A = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 & l_1 c_1 \\ \vdots & \vdots \\ -l_{i-1} s_{i-1} & l_{i-1} c_{i-1} \end{bmatrix} \in R^{(i-1) \times 2}$$

$$B = \begin{bmatrix} -l_{i+1} s_{i+1} & l_{i+1} c_{i+1} \\ \vdots & \vdots \\ -l_{j-1} s_{j-1} & l_{j-1} c_{j-1} \end{bmatrix} \in R^{(j-i-1) \times 2}$$

式(13)が未知数に対して線形の式で、式(14)が非線形の式である。ここで $\text{rank}(L)=4$ ならば式(13)より f_i, f_j について解ける。さらに求められた f_i, f_j を式(14)

に代入すれば l_i, l_j を求めることができる。逆に $\text{rank}(L) < 4$ のときは、独立な式の数が未知数の数よりも小さくなり、同定することはできない。

つまり $\text{rank}(L)=4$ であることが二つの接触点、接触力を同定するための必要十分条件である。しかし $\text{rank}(L)$ を変形すると、

$$\begin{aligned} \text{rank}(L) &= \text{rank} \begin{bmatrix} A & A \\ 0 & B \end{bmatrix} = \text{rank} \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & B \end{bmatrix} \\ &= \text{rank}(A) + \text{rank}(B) \quad \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

$\text{rank}(L)$ は $\text{rank}(A)$ と $\text{rank}(B)$ の和になっている。さらに行列 A, B は2列の行列なのでランクが2より大きくならないことを考えると、 $\text{rank}(L)=4$ になるためには $\text{rank}(A)=\text{rank}(B)=2$ でないといけないことがわかる。行列 A, B のランクが2であるためには、3・3・1 項の議論から、特異姿勢にない二つ以上のリンクが必要である。

以上をまとめると「接触点が二つのとき、その接触点、接触力を同定するためには、シリアルリンクの根元から一つめの接触点のあるリンクまでに特異姿勢でないリンクが二つ以上必要で、さらに一つめの接触点から二つめの接触点の間に特異姿勢でないリンクが二つ以上必要である(図5)」関節の数に着目すれば、「二つ以上のリンク」は「三つ以上の関節」といい直せる。

3.3.3 接触点が m 点の場合 この項ではこれまでの議論をもとに接触点が m 個の一般的な場合の可同定性について考察する。

いま $i, j, \dots, k$ 番めの m 個のリンクにおいて、ハンドと対象物体が接触しているとする。このとき系の釣合い式である式(6)は次のようになる。

$$\hat{\tau} = \hat{J}_i^T f_i + \hat{J}_j^T f_j + \dots + \hat{J}_k^T f_k \quad \dots\dots\dots (16)$$

この式から未知数に対して線形式だけ取出すと、

$$\begin{bmatrix} \tau_A \\ \tau_B \\ \vdots \\ \tau_C \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} f_i \\ f_j \\ \vdots \\ f_k \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (17)$$

となる。ただし

$$M = \begin{bmatrix} A & A & A & \dots & A \\ 0 & B & B & \dots & B \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & C \end{bmatrix} \in R^{(k-m) \times 2m}$$

ここで $\text{rank}(M)=2m$ のとき式(17)は接触力について解くことができ、求められた接触力を非線形の式に代入することで、接触点の位置を求めることができる。逆に $\text{rank}(M) < 2m$ とすると、未知数の数 $>$ 式の数になってしまい接触点、接触力を求めることはできない。つまり $\text{rank}(M)=2m$ であることが m 点の接

触点, 接触力を同定するための必要十分条件である。

また $\text{rank}(\mathbf{M})$ は

$$\begin{aligned} \text{rank}(\mathbf{M}) &= \text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{A} & \mathbf{A} & \cdots & \mathbf{A} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B} & \mathbf{B} & \cdots & \mathbf{B} \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{C} \end{bmatrix} \\ &= \text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{C} \end{bmatrix} \\ &= \text{rank}(\mathbf{A}) + \text{rank}(\mathbf{B}) + \cdots + \text{rank}(\mathbf{C}) \\ &\cdots \cdots \cdots (18) \end{aligned}$$

上の式のように $\text{rank}(\mathbf{A}), \text{rank}(\mathbf{B}), \cdots, \text{rank}(\mathbf{C})$ との和になっている。行列 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \cdots, \mathbf{C}$ それぞれのランクは 2 より大きくなることはないので, $\text{rank}(\mathbf{M}) = 2m$ であるためには $\text{rank}(\mathbf{A}) = \text{rank}(\mathbf{B}) = \cdots = \text{rank}(\mathbf{C}) = 2$ である必要がある。行列 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \cdots, \mathbf{C}$ のランクが 2 であるためには, $2 \cdot 3 \cdot 2$ 項までの議論から, 特異姿勢にない二つ以上のリンクが必要である。

つまり m 個の接触点の位置と接触力を求めるための必要十分条件 $\text{rank}(\mathbf{A}) = \text{rank}(\mathbf{B}) = \cdots = \text{rank}(\mathbf{C}) = 2$ を物理的にいい直すと「包み込み把握の接触点, 接触力を求めるためには, 接触点と接触点の間に特異姿勢にないリンクが二つ以上(関節が三つ以上)必要である。ただしシリアルリンクの根元も接触点とみなす」

これが包み込み把握の接触点, 接触力を同定するための必要十分条件である。

4. 結 言

本稿では, まず二次元平面内での包み込み把握における関節トルクと接触力との関係式を定式化した。次にその式から接触点, 接触力を同定するための条件について考察し, 以下の結論を得た。

「包み込み把握を行ったとき, 対象物体とハンドの接触点を求めるためには, 接触点間に特異姿勢にないリンクが二つ(関節なら三つ)以上必要である」

本研究について熱心に御討論いただいた(株)豊田中央研究所 三村宣治氏, 名古屋工業大学 荒川和己技官および大学院生 山田貴孝氏に感謝の意を表する。

文 献

- (1) 三村・舟橋, 二次元平面における 2 本指ロボットハンドの把握パラメータ同定, 機論, 58-554, C(1992), 175-181.
- (2) 三村・舟橋, 冗長トルクセンサを用いた多自由度ロボットハンドの把握パラメータ同定, 機論, 59-564, C(1993), 62-66.
- (3) 金子・谷江, 自己姿勢変形性を利用した多指ハンドと未知対象物体との接触点検出, 日本ロボット学会誌, 8-6(1990), 652-661.
- (4) 金子・谷江, ロボットと凸対象物との接触点算出のための隣接近似度等値法, 日本ロボット学会誌, 10-7(1992), 976-982.
- (5) 金子・本川, 接触点, 接触力の可センシング性を考慮した Power Grasping, 第 11 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1993), 89-90.
- (6) Kaneko, M. and Honkawa, K., Contact Point and Force Sensing for Inner Link Based Grasps, *Proc. of the 1994 IEEE Int. Conf. on Robotics and Autom.*, (1994), 2809-2814.
- (7) 吉川, ロボット制御基礎論, (1988), 65, コロナ社.
- (8) 川崎, ロボット工学の基礎, (1991), 70, 森北出版.