

接触パラメータの同定アルゴリズム*

三村宣治*¹, 舟橋康行*², 毛利哲也*³

An Algorithm for Identification of Contact Conditions

Nobuharu MIMURA, Yasuyuki FUNAHASHI and Tetsuya MOURI

When a grasped object is in contact with the external environment, it is necessary to perform assembly tasks to identify contact conditions. In this paper a new algorithm for identifying unknown parameters using the data collected by a 6-axis force sensor is proposed. It explicitly expresses the contact conditions. We subdivide the constraint conditions and reduce the number of unknown parameters. The problems of identifying the contact conditions are nonlinear, but they can be transformed to linear problems. The necessary number of active sensing motions is clarified for identification of the unknown parameters. We establish an efficient algorithm for identification of the contact conditions.

Key Words: Robot Hand, Multifingered Hand, Contact Point, Parameter Identification, Unknown Contact Condition, Reduction of Parameters

1. 緒 言

今日、生産ラインでは多くのロボットが導入されている。現在の産業用ロボットのほとんどはプレイバック方式の位置制御であり、対象物の位置誤差を許容できない。したがって、把握対象物と外部環境との間で接触が生じ、精密な位置決めなどが要求される組立作業ではロボット化が遅れている。例えば、ロボットで把握対象物を台の上に置くという作業を考えてみる。この作業を位置制御のみで実行する場合、台と対象物との接触状態を面接触へ直接移行させなければならない。この作業で位置誤差が生じると、一般に面接触と異なる接触状態、すなわち点や線などの接触状態に陥る。しかし、位置制御のみでは、どのような接触状態にあるかは判別できず、それ以上作業は続行できない。これに対し、人間は手先の感覚(力覚)だけからでも接触の状態を認識し、作業を進めることができる。つまり、接触状態を点接触から線接触へ、さらに面接触へと移行させることにより精密な位置決めや組立を

行っている。このような人間が無意識のうちに行っている作業をロボットに応用するには、まず接触状態を検出・制御する必要があると考えられる。

これまでに、複数回のセンシング動作(アクティブセンシング)を利用し、形状が未知である対象物の接触位置を検出する方法を永田⁽¹⁾、北垣⁽²⁾、三村⁽³⁾および舟橋⁽⁴⁾らが提案している。しかし、これらの方法では、接触点が摩擦のある点であることが前提条件として仮定されており、接触状態を同定することができない。そこで著者ら⁽⁵⁾は点接触以外の接触状態を同定する問題を考察し、形状が未知である対象物の接触点位置の検出が可能であることを明らかにした。その中では、接触点でのモーメントの拘束条件を導入し接触状態を考慮した定式化を行い、その同定アルゴリズムを提案した。しかし、接触状態を表す方程式が非線形方程式である場合にはニュートンラプソン法等を用いて接触パラメータを数値的に同定していた。

本論文では、文献(5)と同じ未知接触状態の同定問題を考察する。接触点で発生するモーメントには、各接触状態に応じた特徴がある。本論文ではこの特徴を陽に表現する。この表現式により、同定すべきパラメータ数を少なくし、計算量の軽減を図ることができる。さらに、ロボットで検出可能な力覚および位置情

* 原稿受付 1996年10月24日。

¹ 正員, 新潟大学(☎950-21 新潟市五十嵐二の町8050)。² 正員, 名古屋工業大学(☎466 名古屋市昭和区御器所町)。³ 学生員, 名古屋工業大学大学院。

報のみによる未知接触状態の同定問題を線形推定問題に変換できることを示す。そして、未知接触状態を同定するための効率のよいアルゴリズムを提案する。

2. 問題の設定

2.1 仮定 図1に示すように未知形状の対象物をロボットハンドで把握し、対象物が外部環境に接触している状態を考える。そして、力覚情報に基づいて接触点の位置および接触状態を同定する問題を考察する。問題の簡単化のため次の仮定を設ける⁽⁶⁾。

(1) 対象物はロボットハンドにより完全に拘束され三次元空間を自由に操ることができる。

(2) ロボットは6自由度構造であって、センサの存在する位置での力および位置の計測・制御が可能である。

(3) 対象物と外部環境は摩擦のある点接触、ソフトフィンガ接触、線接触、または面接触を行う。ただし、接触点の位置および接触の状態は未知である。

(4) アクティブセンシングにより接触状態が変化することはない。また、接触点では滑りが生じない。

仮定(3)に挙げた接触状態は図2に示す四とおりであり、接触自由度 m により分類されている⁽⁶⁾。

- $m=0$: 摩擦のある面接触。摩擦制約の範囲内では、二つの物体が接触部において固着しているのと等価である。
- $m=1$: 摩擦のある線接触。
- $m=2$: 摩擦のあるソフトフィンガ接触。物体が変形しない剛体では発生しない。
- $m=3$: 摩擦のある点接触。

2.2 座標系の設定 図1に示すようにロボット先端のセンサ原点を o 、点 o に固定したセンサ座標系を Σ_o とする。また、接触点(線接触等のように接触が一点でない場合には接触線上の任意の点)を c とし、

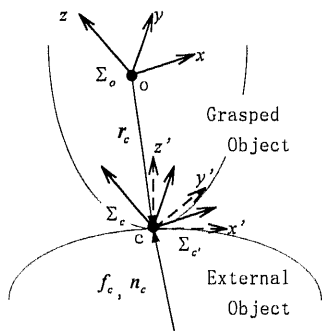


Fig. 1 Interaction between grasped object and external environment

点 c に固定した座標系を Σ_c とする。なお、座標系 Σ_c の姿勢は Σ_o のそれと同じとする。 Σ_o の原点から接触点 c までの位置ベクトルを $r_c = [r_{cx} \ r_{cy} \ r_{cz}]^T$ 、接触によって点 o および点 c に作用する力とモーメントをそれぞれ $f_o = [f_{ox} \ f_{oy} \ f_{oz}]^T$ 、 $n_o = [n_{ox} \ n_{oy} \ n_{oz}]^T$ および $f_c = [f_{cx} \ f_{cy} \ f_{cz}]^T$ 、 $n_c = [n_{cx} \ n_{cy} \ n_{cz}]^T$ とする。外積を \times で表すと、これらの物理量の間には次式が成立する。

$$f_c = f_o \dots \dots \dots (1)$$

$$r_c \times f_c + n_c = n_o \dots \dots \dots (2)$$

式(1), (2)より, f_c を消去すると

$$r_c \times f_o + n_c = n_o \dots \dots \dots (3)$$

が得られる。仮定(2)より, 式(3)における既知(検出可能)物理量は f_o, n_o , 未知物理量は n_c, r_c である。

接触状態を変えずに複数回 (k 回) の計測を行うことにより得られる基本式は

$$r_c \times f_{oi} + n_{ci} = n_{oi}, i = 1, 2, \dots, k$$

である。ただし、添字 i は i 回めのセンシングデータを意味する。ここで既知と未知パラメータを明確にするため

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & a_{i3} & -a_{i2} \\ -a_{i3} & 0 & a_{i1} \\ a_{i2} & -a_{i1} & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} a_{i1} \\ a_{i2} \\ a_{i3} \end{bmatrix} = f_{oi},$$

$$b_i = \begin{bmatrix} b_{i1} \\ b_{i2} \\ b_{i3} \end{bmatrix} = n_{oi}, \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = r_c$$

とおくと基本式は次の式で書き表される。

$$A_i x + n_{ci} = b_i, \quad i = 1, 2, \dots, k \dots \dots \dots (4)$$

したがって考察する同定問題は「 $\{A_i, b_i\}_{i=1}^k$ が与えられたとき x および n_{ci} を求めよ。」という問題に帰着された。

3. 接触点におけるモーメントの拘束条件

図2に示す四つの接触状態を考えるとき、モーメント力 n_{ci} には接触の自由度 m によって常に零となる方向がある。例えば、点接触では n_{ci} は常に零であり、線接触では接触線回りに回転する方向のモーメント成分が零である。この性質を最もよく表す座標系 Σ_c を図2のようにとる。この Σ_c の原点は接触点 c に一致し、 z' 軸は接触面の法線方向にとる。さらに線接触の場合には、接触線上に x' 軸をとる。この Σ_c から接触点でのモーメント $n'_{ci} = [n'_{cxi} \ n'_{cyi} \ n'_{czi}]^T$ を見ると、接触点の自由度 m に対応して次の成分が零になることがわかる。

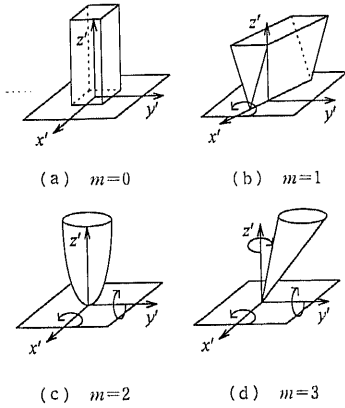


Fig. 2 Degrees of freedom of contact

- $m=0$: no constraint
- $m=1$: $n'_{cxi}=0$
- $m=2$: $n'_{cxi}=n'_{cxi}=0$
- $m=3$: $n'_{cxi}=n'_{cxi}=n'_{cxi}=0$

ここで、座標系 Σ_c に対する Σ_c' の姿勢を回転行列

$$R = [r_x \quad r_y \quad r_z] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

で表すと、 n_{ci} は次のように表される。

$$n_{ci} = R n'_{ci} = r_x n'_{cxi} + r_y n'_{cxi} + r_z n'_{cxi} \dots\dots\dots (6)$$

式(5)、(6)を考慮すると、モーメントは次のように一般性を失うことなく8種類に分類して考察すればよいことがわかる(詳しくは付録を参照)。

[n_{ci} の表現]

点接触 ($m=3$):
 $n_{ci} = 0 \dots\dots\dots (7)$

ソフトフィンガ接触 ($m=2$):

① $n_{ci} = [1 \ 0 \ 0]^T z_i \dots\dots\dots (8)$

② $n_{ci} = [y \ 1 \ 0]^T z_i \dots\dots\dots (9)$

③ $n_{ci} = [y_1 \ y_2 \ 1]^T z_i \dots\dots\dots (10)$

線接触 ($m=1$):

① $n_{ci} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} z_{i1} \\ z_{i2} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (11)$

② $n_{ci} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & y & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} z_{i1} \\ z_{i2} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (12)$

③ $n_{ci} = \begin{bmatrix} y_1 & 1 & 0 \\ y_2 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} z_{i1} \\ z_{i2} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (13)$

面接触 ($m=0$):

$n_{ci} = [z_{i1} \ z_{i2} \ z_{i3}]^T \dots\dots\dots (14)$

以上より、未知パラメータ同定問題は次のように定式化された。「 n_{ci} が式(7)~(14)のいずれかで表さ

れるとき、式(4)を満たす x, y (または y_1 と y_2) および z_i (または z_{i1} と z_{i2}) を求めよ。」

4. 接触状態の判定

本章では、式(4)の非線形パラメータ推定問題を線形推定問題に変換し、未知物理量および接触状態を同定する手法を考える。また、同定に要する最小限の計測回数も明らかにする。

4.1 点接触の判定法 式(4)、(7)より次の線形方程式を満たすパラメータ x が存在すれば点接触と判定できる。

$$A_i x = b_i, \quad i=1, 2, \dots, k \dots\dots\dots (15)$$

式(15)において未知パラメータは x_1, x_2, x_3 の3個である。これに対し、 $\text{rank}(A_i) = 2$ であるため $k=1$ のとき有効な方程式の数は2個であり、パラメータを同定できない。 $k \geq 2$ のとき式(15)を連立すれば

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_k \end{bmatrix} x = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} \dots\dots\dots (16)$$

行交換による掃き出し操作により次式の形にする。

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \\ \xi_4 \\ \vdots \\ \xi_{3k} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (17)$$

このとき
 $\xi_4 = \dots = \xi_{3k} = 0 \dots\dots\dots (18)$

であれば点接触であり、推定値 \bar{x} は

$$\bar{x} = [\xi_1 \ \xi_2 \ \xi_3]^T$$

と決定される。

4.2 ソフトフィンガ接触の判定法

4.2.1 ソフトフィンガ接触①の場合 式(4)、

(8)より、ソフトフィンガ接触①では次の線形方程式になる。

$$A_i x + [1 \ 0 \ 0]^T z_i = b_i, \quad i=1, 2, \dots, k \dots\dots\dots (19)$$

ここで、

$$A_{i1} = [0 \ a_{i3} \ -a_{i2}], \bar{A}_i = \begin{bmatrix} -a_{i3} & 0 & a_{i1} \\ a_{i2} & -a_{i1} & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{b}_i = \begin{bmatrix} b_{i2} \\ b_{i3} \end{bmatrix}$$

とおくと、式(19)は

$$A_{i1} x + z_i = b_{i1}, \quad i=1, 2, \dots, k \dots\dots\dots (20)$$

$$\bar{A}_i x = \bar{b}_i, \quad i=1, 2, \dots, k \dots\dots\dots (21)$$

となる。式(21)は x について線形であり、点接触の式(15)と同じ形をしている。したがって、点接触と同様の方法により、接触状態の判定および x の推定値 \bar{x} が求められる。最後に、 \bar{x} を用いて式(20)より

$$\bar{z}_i = b_{i1} - A_{i1}\bar{x}$$

として \bar{z}_i が決まる。

4・2・2 ソフトフィンガ接触②の場合 式(4)，(9)より、ソフトフィンガ接触②では次の非線形方程式になる。

$$A_i x + [y \ 1 \ 0]^T z_i = b_i, \quad i=1, 2, \dots, k \quad (22)$$

式(22)は非線形部分と線形部分に分けて考えることができる。第3成分に注目すれば

$$a_{i2}x_1 - a_{i1}x_2 = b_{i3}, \quad i=1, 2, \dots, k$$

すなわち、

$$\begin{bmatrix} a_{12} & -a_{11} \\ a_{22} & -a_{21} \\ \vdots & \vdots \\ a_{k2} & -a_{k1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{13} \\ b_{23} \\ \vdots \\ b_{k3} \end{bmatrix} \quad (23)$$

を得る。一般に $k \geq 3$ とすれば点接触と同様の方法により接触状態の判定および推定値 \bar{x}_1, \bar{x}_2 が得られる。

また、式(22)の第1，第2成分は

$$a_{i3}\bar{x}_2 - a_{i2}x_3 + yz_i = b_{i1} \quad (24)$$

$$-a_{i3}\bar{x}_1 + a_{i1}x_3 + z_i = b_{i2} \quad (25)$$

である。式(24)，(25)より z_i を消去すれば

$$-a_{i2}x_3 + (b_{i2} + a_{i3}\bar{x}_1)y - a_{i1}x_3y = b_{i1} - a_{i3}\bar{x}_2$$

すなわち、

$$\begin{bmatrix} -a_{12} & b_{12} + a_{13}\bar{x}_1 & -a_{11} \\ -a_{22} & b_{22} + a_{23}\bar{x}_1 & -a_{21} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -a_{k2} & b_{k2} + a_{k3}\bar{x}_1 & -a_{k1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3 \\ y \\ x_3y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} - a_{13}\bar{x}_2 \\ b_{21} - a_{23}\bar{x}_2 \\ \vdots \\ b_{k1} - a_{k3}\bar{x}_2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

が得られる。式(26)は x_3, y, x_3y を未知変数とする線形推定問題とみなすことができる。 $k \geq 3$ において $n_{cyl} \neq 0$ であれば左辺の行列の階数は3になり、掃き出し操作を行うと、

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3 \\ y \\ x_3y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \\ \xi_4 \\ \vdots \\ \xi_k \end{bmatrix}$$

に変形できる。ここで

$$\xi_1\xi_2 - \xi_3 = 0, \quad \xi_i = 0, \quad i \geq 4 \quad (27)$$

を満たしていれば x_3 と y が決められる。したがって、式(23)および(27)を満たせば、未知の接触状態はソフトフィンガ接触②であると判定でき、 $\bar{x}_3 = \xi_1, \bar{y} = \xi_2,$

$$\bar{z}_i = b_{i2} + a_{i3}\bar{x}_1 - a_{i1}\bar{x}_3$$

として未知パラメータが決定される。以上より、4回のセンシングでソフトフィンガ接触②は判別可能である。

4・2・3 ソフトフィンガ接触③の場合 式(4)，(10)より、ソフトフィンガ接触③では次の非線形方程式になる。

$$A_i x + [y_1 \ y_2 \ 1]^T z_i = b_i, \quad i=1, 2, \dots, k \quad (28)$$

式(28)を成分で書き直すと

$$a_{i3}x_2 - a_{i2}x_3 + y_1z_i = b_{i1}, \quad (29)$$

$$-a_{i3}x_1 + a_{i1}x_3 + y_2z_i = b_{i2} \quad (30)$$

$$a_{i2}x_1 - a_{i1}x_2 + z_i = b_{i3} \quad (31)$$

式(31)を用いて式(29)，(30)の z_i を消去すれば

$$a_{i1}x_2y_1 - a_{i2}(x_3 + x_1y_1) + a_{i3}x_2 + b_{i3}y_1 = b_{i1}$$

$$a_{i1}(x_3 + x_2y_2) - a_{i2}x_1y_2 - a_{i3}x_1 + b_{i3}y_2 = b_{i2}$$

$$\dots \dots \dots (32)$$

すなわち、

$$\begin{bmatrix} a_{11} & -a_{12} & a_{13} & b_{13} \\ a_{21} & -a_{22} & a_{23} & b_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{k1} & -a_{k2} & a_{k3} & b_{k3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2y_1 \\ x_3 + x_1y_1 \\ x_2 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ \vdots \\ b_{k1} \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & -a_{12} & -a_{13} & b_{13} \\ a_{21} & -a_{22} & -a_{23} & b_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{k1} & -a_{k2} & -a_{k3} & b_{k3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3 + x_2y_2 \\ x_1y_2 \\ x_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{12} \\ b_{22} \\ \vdots \\ b_{k2} \end{bmatrix} \quad (34)$$

が得られる。式(33)，(34)は

$$x_{s31} = [x_2y_1 \ x_3 + x_1y_1 \ x_2 \ y_1]^T,$$

$$x_{s32} = [x_3 + x_2y_2 \ x_1y_2 \ x_1 \ y_2]^T$$

を未知変数とする線形推定問題とみなすことができる。式(33)，(34)は式(16)と同じ形であり、点接触と同様にして接触状態の判定および推定値が求められる。式(33)，(34)の式(17)に対応する右辺をそれぞれ $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_1, \xi_2, \dots$ とすると

$$\xi_1 - \xi_3\xi_4 = 0, \quad \xi_i = 0, \quad i \geq 5 \quad (35)$$

$$\xi_2 - \xi_3\xi_4 = 0, \quad \xi_i = 0, \quad i \geq 5 \quad (36)$$

$$(\xi_1 - \xi_3\xi_4) - (\xi_2 - \xi_4\xi_3) = 0 \quad (37)$$

を満たせば、未知の接触状態はソフトフィンガ接触③であると判定でき、 $\bar{x}_1 = \xi_3, \bar{x}_2 = \xi_3, \bar{y}_1 = \xi_4, \bar{y}_2 = \xi_4,$

$$\bar{x}_3 = \xi_1 - \xi_3\xi_4 \quad (38)$$

として未知パラメータが求められる。したがって、5

回のセンシングによりソフトフィンガ接触③は判別可能である。

4.3 線接触の判定法

4.3.1 線接触①の場合 式(4), (11)より, 線接触①では次の線形方程式になる。

$$A_i x + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} z_{i1} \\ z_{i2} \end{bmatrix} = b_i, \quad i=1, 2, \dots, k \quad \dots\dots\dots (39)$$

式(39)において未知物理量は, $x_1, x_2, x_3, z_{i1}, z_{i2}$ の $3 + 2k$ 個となる。それに対して有効な方程式の数は $k = 1$ のとき3個, $k \geq 2$ のとき $2k + 2$ 個となる。したがって, 未知物理量の数が方程式の数より多くなるので, センシングの回数を増やしても未知物理量を一意には決定できない。これは接触線上の任意の位置に接触点 c を設定できることに対応している。そこで, 各未知物理量の依存関係を明らかにし, 同定手法を考える。

まず, 式(39)の第3成分は

$$a_{i2}x_1 - a_{i1}x_2 = b_{i3}, \quad i=1, 2, \dots, k$$

でソフトフィンガ接触②の式(23)と同じである。したがって, $k \geq 3$ であれば接触状態の判定および推定値 \bar{x}_1, \bar{x}_2 が得られる。

式(39)の第1, 第2成分は

$$\begin{aligned} a_{i3}\bar{x}_2 - a_{i2}x_3 + z_{i1} &= b_{i1} \\ -a_{i3}\bar{x}_1 + a_{i1}x_3 + z_{i2} &= b_{i2} \end{aligned}$$

である。したがって z_{i1}, z_{i2} は x_3 に依存する形で決まる。

$$\begin{bmatrix} z_{i1} \\ z_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{i1} - a_{i3}\bar{x}_2 \\ b_{i2} + a_{i3}\bar{x}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{i2} \\ -a_{i1} \end{bmatrix} x_3$$

ここで, x_3 は接触点の任意性を意味している。したがって, 接触線は x_3 をパラメータとして表現される。

$$x = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} x_3$$

4.3.2 線接触②の場合 式(4), (12)より, 線接触②では次の非線形方程式になる。

$$A_i x + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & y & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} z_{i1} \\ z_{i2} \end{bmatrix} = b_i, \quad i=1, 2, \dots, k \quad \dots\dots\dots (40)$$

式(40)を成分で書き直すと

$$a_{i3}x_2 - a_{i2}x_3 + z_{i1} = b_{i1} \quad \dots\dots\dots (41)$$

$$-a_{i3}x_1 + a_{i1}x_3 + yz_{i2} = b_{i2} \quad \dots\dots\dots (42)$$

$$a_{i2}x_1 - a_{i1}x_2 + z_{i2} = b_{i3} \quad \dots\dots\dots (43)$$

となる。式(42), (43)より z_{i2} を消去すると,

$$a_{i1}(x_3 + x_2y) - a_{i2}x_1y - a_{i3}x_1 + b_{i3}y = b_{i2} \quad \dots\dots\dots (44)$$

の非線形方程式を得る。しかし, 式(44)は式(32)の y_2 を y とすれば, 同じ式である。したがって, $k \geq 5$ であれば接触状態の判定と推定値 \bar{x}_1, \bar{y} が得られる。また, 式(38)より x_3 は x_2 を用いて表すことができる。

$$x_3 = \xi_1' - \xi_4' x_2 \quad \dots\dots\dots (45)$$

\bar{x}_1, \bar{y} と式(45)を式(41), (43)へ代入すると z_{i1}, z_{i2} は

$$\begin{bmatrix} z_{i1} \\ z_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{i1} + a_{i2}\xi_1' \\ b_{i3} + a_{i2}\xi_3' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{i3} + a_{i2}\xi_4' \\ -a_{i1} \end{bmatrix} x_2 \quad \dots\dots\dots (46)$$

となる。式(45), (46)において未知物理量 x_3, z_{i1}, z_{i2} は x_2 に依存する形で決まり, 接触線は次式で与えられる。

$$x = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ 0 \\ \xi_1' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -\bar{y} \end{bmatrix} x_2$$

4.3.3 線接触③の場合 式(4), (13)より, 線接触③では次の非線形方程式になる。

$$A_i x + \begin{bmatrix} y_1 & 1 & 0 \\ y_2 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} z_{i1} \\ z_{i2} \end{bmatrix} = b_i, \quad i=1, 2, \dots, k \quad \dots\dots\dots (47)$$

式(47)を成分で書き直すと

$$a_{i3}x_2 - a_{i2}x_3 + y_1z_{i1} + y_2z_{i2} = b_{i1} \quad \dots\dots\dots (48)$$

$$-a_{i3}x_1 + a_{i1}x_3 + z_{i1} = b_{i2} \quad \dots\dots\dots (49)$$

$$a_{i2}x_1 - a_{i1}x_2 + z_{i2} = b_{i3} \quad \dots\dots\dots (50)$$

となる。式(48)~(50)より z_{i1}, z_{i2} を消去すれば,

$$\begin{aligned} a_{i1}(-x_3y_1 + x_2y_2) - a_{i2}(x_3 + x_1y_2) \\ + a_{i3}(x_2 + x_1y_1) + b_{i2}y_1 + b_{i3}y_2 &= b_{i1} \end{aligned}$$

すなわち,

$$\begin{bmatrix} a_{i1} & -a_{i2} & a_{i3} & b_{i2} & b_{i3} \\ a_{21} & -a_{22} & a_{23} & b_{22} & b_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{k1} & -a_{k2} & a_{k3} & b_{k2} & b_{k3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -x_3y_1 + x_2y_2 \\ x_3 + x_1y_2 \\ x_2 + x_1y_1 \\ y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{i1} \\ b_{21} \\ \vdots \\ b_{k1} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (51)$$

が得られる。式(51)は

$$x_{i3} = [-x_3y_1 + x_2y_2 \quad x_3 + x_1y_2 \quad x_2 + x_1y_1 \quad y_1 \quad y_2]^T$$

を未知変数とする線形推定問題とみなすことができる。一般に $k \geq 5$ であれば推定値 \bar{x}_{i3} は決まる。式(51)を式(17)の形に変形するとき

$$\xi_1 + \xi_2\xi_4 - \xi_3\xi_5 = 0, \quad \xi_i = 0, \quad i \geq 6 \quad \dots\dots\dots (52)$$

を満たせば, 未知の接触状態は線接触③であると判定

Table 1 Necessary number of active sensing motions

k	Point	Soft	Line	Plane
2	○	①	×	×
3	—	×	①	×
4	—	②	×	×
5	—	③	②	×
6	—	—	③	×

でき x_2, x_3 および z_{i1}, z_{i2} は自由パラメータ x_1 を用いて表される。

$$x_2 = \xi_3 - \xi_4 x_1$$

$$x_3 = \xi_2 - \xi_5 x_1$$

$$\begin{bmatrix} z_{i1} \\ z_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{i2} + a_{i1} \xi_2 \\ b_{i3} + a_{i1} \xi_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -a_{i3} - a_{i1} \xi_5 \\ a_{i2} + a_{i1} \xi_4 \end{bmatrix} x_1$$

また接触線は次式で与えられる。

$$x = \begin{bmatrix} 0 \\ \xi_3 \\ \xi_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ -\hat{y}_1 \\ -\hat{y}_2 \end{bmatrix} x_1$$

4・4 面接触の判定法 面接触の場合に得られる条件は式(4), (14)より

$$A_i x + [z_{i1} \ z_{i2} \ z_{i3}]^T = b_i, \quad i=1, 2, \dots, k \quad \dots\dots\dots(53)$$

ただし、式(53)で未知物理量は $x_1, x_2, x_3, z_{i1}, z_{i2}, z_{i3}$ の $3+3k$ 個となり、有効な方程式は $3k$ 個となる。未知物理量の数が方程式の数よりも常に3個多くなるので、センシングの回数を増やしても未知物理量を一意に決めることはできない。

4・5 接触状態の同定アルゴリズム 各接触状態を判別するために必要とするアクティブセンシングの回数 k は表1のようにまとめられる。なお、softの列の①は2回の計測によりソフトフィンガ接触①の接触状態が判別できることを意味する。また、×印は接触状態が判別できないことを意味する。

各接触状態の同定に要する計測回数および利用する判別式の関係から、次のような同定アルゴリズムを用いれば、各接触状態を効率よく判別できる。

- Step 1 センシングを2回行う。
- Step 2 if 式(18)を満たす
then 点接触と同定。
- Step 3 if 式(21)を満たす
then ソフトフィンガ接触①と同定。
- Step 4 センシングをさらに2回行う。
- Step 5 if 式(23)を満たす
then Step 6へ
else Step 7へ

- Step 6 if 式(27)を満たす
then ソフトフィンガ接触②と同定。
else 線接触①と同定。
- Step 7 センシングをさらに1回行う。
- Step 8 if 式(36)を満たす
then Step 9へ
else Step 10へ
- Step 9 if 式(35), (37)を満たす
then ソフトフィンガ接触③と同定。
else 線接触②と同定。
- Step 10 センシングをさらに1回行う。
- Step 11 if 式(52)を満たす
then 線接触③と同定。
else 面接触と同定。

このアルゴリズムであれば、ソフトフィンガ接触②と線接触①の接触状態を区別することができる。また、面接触では未知物理量を決定することはできないが、接触状態を同定することはできる。

5. 数 値 例

簡単な数値例を用いて、本アルゴリズムの妥当性を示す。以下の方法で数値例を与える。まず、接触点 x 、点 c での力 f_{ci} とモーメント n_{ci} の真値を与える。次に点 o での力 f_{oi} とモーメント b_i を式(1), (2)より求める。

この方法により与えられた数値例 f_{oi}, b_i のみから本アルゴリズムにより接触状態が正しく同定できるかを調べる。

(例1) 点接触を満たすデータとして各真値を次のように与える。

$$x = [1 \ -3 \ 2]^T, \\ f_{c1} = [1 \ 2 \ 1]^T, f_{c2} = [-3 \ 2 \ 5]^T, \\ n_{ci} = 0, \quad i=1, 2$$

このとき次を得る。

$$b_1 = [-7 \ 1 \ 5]^T, \quad b_2 = [-19 \ -11 \ -7]^T$$

(例2) ソフトフィンガ接触③を満たすデータを与える。まず、接触面の法線ベクトルを

$$r_z = \frac{1}{\sqrt{6}}[-1 \ -2 \ 1]^T$$

また、

$$x = [-2 \ -1 \ 1]^T, \\ f_{c1} = [1 \ -1 \ 1]^T, f_{c2} = [-1 \ -2 \ 3]^T, \\ f_{c3} = [-3 \ 1 \ 5]^T, f_{c4} = [-2 \ 7 \ 3]^T, \\ f_{c5} = [3 \ 5 \ -4]^T, n_{c1} = [-1 \ -2 \ 1]^T, \\ n_{c2} = [2 \ 4 \ -2]^T, n_{c3} = [3 \ 6 \ -3]^T, \\ n_{c4} = [-4 \ -8 \ 4]^T, n_{c5} = [5 \ 10 \ -5]^T$$

Table 2 Numerical examples

Eq.	(18)	(21)	(23)	(27)	(36)	(35), (37)	(52)
ex. 1	○	—	—	—	—	—	—
ex. 2	×	×	×	—	○	○	—
ex. 3	×	×	○	×	—	—	—
ex. 4	×	×	×	—	×	—	×

6. 結 言

本論文では、把握対象物の形状、接触位置および接触状態が未知という状況においてこれらの未知接触パラメータを同定する問題を取扱った。文献(5)とは異なり各接触状態の拘束条件を端的に表現した。また、ソフトフィンガ接触および線接触では拘束条件の細分化により未知パラメータを減らすことができた。方程式が非線形となる場合にも各接触状態(面接触を除く)における未知物理量の同定問題を線形推定問題に変換した。このときの必要最小限のセンシング回数も明らかにした。また、各接触状態の同定に必要なセンシングの回数に関係なく接触状態同定のアルゴリズムを提案した。本手法では、接触状態と接触点の位置だけではなく、接触線の方向なども容易に計算することができる。このため、ロボットによる把持対象物の自動挿入および組立などの作業にも応用可能である。

次報では計測データにノイズ等の誤差が含まれている場合の接触状態の同定手法を取扱う。

最後に、本研究について熱心にご討論いただいた名古屋工業大学 山田貴孝博士に感謝の意を表する。

付 録

ソフトフィンガ接触のとき、 n_{ci} は式(5)、(6)より次のベクトルで与えられる。

$$n_{ci} = [r_{13} \ r_{23} \ r_{33}]^T n'_{ci}, \quad i=1, 2, \dots, k \dots (54)$$

未知パラメータは $r_{13}, r_{23}, r_{33}, n'_{ci}$ の $3+k$ 個である。 n_{ci} の重複表現を避けるため次の三とおりに分けて考える。

① $r_{23} = r_{33} = 0, r_{13} \neq 0$ の場合、 $z_i = r_{13} n'_{ci}$ とおけば式(54)より式(8)が得られる。

② $r_{33} = 0, r_{23} \neq 0$ の場合、 $y = r_{13}/r_{23}, z_i = r_{23} n'_{ci}$ とおけば式(54)より式(9)が得られる。

③ $r_{33} \neq 0$ の場合、 $y_1 = r_{13}/r_{33}, y_2 = r_{23}/r_{33}, z_i = r_{33} n'_{ci}$ とおけば式(54)より式(10)が得られる。

線接触のとき、 n_{ci} は次のベクトルで与えられる。

$$n_{ci} = \begin{bmatrix} r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} n'_{cyi} \\ n'_{czi} \end{bmatrix}, \quad i=1, 2, \dots, k$$

未知パラメータは $r_{12}, r_{13}, r_{22}, r_{23}, r_{32}, r_{33}, n'_{cyi}, n'_{czi}$ の $6+2k$ 個である。ソフトフィンガ接触と同じように変数をおき直すことで式(11)~(13)が得られる。

文 献

- (1) 永田和之・小笠原司・高瀬國克, 接触情報を用いたロボットの把握位置姿勢の推定, 計測制御学会論文集, 28-7 (1992), 783-789.

としたとき次を得る。

$$b_1 = [-1 \ 1 \ 4]^T, \quad b_2 = [1 \ 9 \ 1]^T, \\ b_3 = [-3 \ 13 \ -8]^T, \quad b_4 = [-14 \ -4 \ -12]^T, \\ b_5 = [4 \ 5 \ -12]^T$$

(例3) 線接触①を満たすデータを与える。

$$x = [1 \ 1 \ -1]^T, \\ f_{c1} = [1 \ 1 \ 1]^T, \quad f_{c2} = [-1 \ 2 \ 3]^T, \\ f_{c3} = [2 \ 4 \ 1]^T, \quad f_{c4} = [3 \ 4 \ -5]^T, \\ n_{c1} = [3 \ 0 \ 0]^T, \quad n_{c2} = [-1 \ 0 \ 0]^T, \\ n_{c3} = [5 \ 0 \ 0]^T, \quad n_{c4} = [-4 \ 0 \ 0]^T$$

としたとき次を得る。

$$b_1 = [5 \ -2 \ 0]^T, \quad b_2 = [4 \ -2 \ 3]^T, \\ b_3 = [10 \ -3 \ 2]^T, \quad b_4 = [-5 \ 2 \ 1]^T$$

(例4) 面接触を満たすデータとして各真値を次の

ように与える。

$$x = [2 \ -1 \ 3]^T, \\ f_{c1} = [1 \ -1 \ 2]^T, \quad f_{c2} = [2 \ 3 \ 5]^T, \\ f_{c3} = [-7 \ 2 \ 4]^T, \quad f_{c4} = [5 \ 1 \ -9]^T, \\ f_{c5} = [10 \ 3 \ 1]^T, \quad f_{c6} = [5 \ 4 \ -3]^T, \\ n_{c1} = [1 \ -1 \ 1]^T, \quad n_{c2} = [2 \ 1 \ 3]^T, \\ n_{c3} = [-3 \ 5 \ 6]^T, \quad n_{c4} = [5 \ -3 \ 9]^T, \\ n_{c5} = [4 \ 5 \ 10]^T, \quad n_{c6} = [7 \ 3 \ -6]^T$$

としたとき次を得る。

$$b_1 = [2 \ -2 \ 0]^T, \quad b_2 = [-12 \ -3 \ 11]^T, \\ b_3 = [-13 \ -24 \ 3]^T, \quad b_4 = [11 \ 30 \ 16]^T, \\ b_5 = [-6 \ 33 \ 26]^T, \quad b_6 = [-2 \ 24 \ 7]^T$$

以上のような例を本アルゴリズムで判定すると、表2のようになる。ここで×は判定条件式を満たさないことを意味し、○は満たすことを意味する。例1は式(18)を満たすため点接触、例2は式(23)まで満たさず式(35)~(37)を満たすためソフトフィンガ接触③、例3は式(23)を満たすが式(27)を満たさないため線接触①、例4はすべての条件式を満たさないため面接触と判定される。このように、本アルゴリズムは未知の接触状態を正しく同定することができた。したがって、本報で提案した接触状態の同定手法は妥当だと考えられる。

- (2) 北垣高成・小笠原司・末広尚士, 力覚センシングによる接触状態検出, 日本機械学会ロボメカ講演会予稿集, A (1991), 45-48.
- (3) 三村宣治・舟橋康行, 2次元平面内における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.
- (4) 舟橋康行・楯將博, アクティブセンシングを用いた包み込み把握の接触点同定, 機論, 61-589, C (1995), 163-169.
- (5) 三村宣治・舟橋康行, アクティブセンシングによる接触パラメータ同定, 機論, 60-579, C (1994), 230-235.
- (6) Mason, M. T. and Salisbury, J. K., *Robot Hands and the Mechanics of Manipulation*, (1985), 8, Cambridge, MA, MIT Press.
-