

## 接触モーメントのノイズを考慮した接触状態の同定法\*

毛利哲也\*<sup>1</sup>, 山田貴孝\*<sup>2</sup>  
三村宣治\*<sup>3</sup>, 舟橋康行\*<sup>2</sup>Identification of Contact Conditions from Contaminated Data  
of Contact MomentTetsuya MOURI, Takayoshi YAMADA,  
Nobuharu MIMURA and Yasuki FUNAHASHI\*<sup>4</sup>\*<sup>4</sup> Nagoya Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering,  
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya, Aichi, 466-8555 Japan

When a grasped object is in contact with external environment, it is required to identify contact conditions prior to performing assembly tasks. This paper discusses a method for identification of contact conditions by using an active force sensing method. This paper treats the practical case where sensing data are contaminated with noise. Contact types are characterized by a standard deviation of contact moments. The contact position is estimated by a least-squares method. The contact type can be judged by comparing the eigenvalues of a covariance matrix of estimated contact moment. We establish an efficient and analytical algorithm for identification of contact conditions. The algorithm can identify not only contact position and contact force, but also contact type.

**Key Words:** Robot Hand, Multi-Fingered Hand, Active Sensing, Contact Conditions, Parameter Identification, Contaminated Data, Covariance Matrix, Eigenvalue

## 1. 緒 言

今日、生産現場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、把持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、ロボットハンドを用いて箱を台の上に置くという単純な作業を考えてみる。この作業を実行する場合、箱の底面を台上に接触させなければならない。ところが、位置誤差を生じると、一般に底面とは異なる部分、すなわち箱の頂点やへりなどが接触する。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、それ以上作業を続行できない。これに対し、人間は手先の感覚(力覚)だけからでも接触状態を認識し、作業を進めることができる。つまり、接触する部分を頂点からへりへ、さらに底面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(接触点の位置、接触力、接触の種類)を検出・制御することが重要となる。

これまでに、力覚情報(力・モーメント)を利用した接触状態の検出・制御に関する研究が種々行われてきた。Bicchiら<sup>(1)</sup>は点接触とソフトフィンガ接触の接触点の位置および法線を同定する手法、Kaneko<sup>(2)</sup>はアクティブアンテナを用いた接触の位置の同定法をそれぞれ提案している。また、Salisbury<sup>(3)</sup>は複数回のセンシング動作(アクティブセンシング)を利用した接触点を推定する方法を提案し、形状が未知である対象物の接触点を検出する方法を北垣<sup>(4)</sup>、永田<sup>(5)</sup>、三村<sup>(6)</sup>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、接触の種類は考慮されていなかった。

著者ら<sup>(7)(8)</sup>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の位置の検出が可能であることを明らかにした。接触点で発生するモーメントの拘束条件を導入し接触の種類を考慮した定式化を行い、接触状態の同定法を提案した。また、文献(9)では計測データのモーメント成分のノイズを考慮し評価関数の大小関係から接触状態を同定し

\* 原稿受付 1999年10月20日。

\*<sup>1</sup> 正員, 名古屋工業大学大学院 (☎ 466-8555 名古屋市昭和区御器所町)。\*<sup>2</sup> 正員, 名古屋工業大学工学部。\*<sup>3</sup> 正員, 新潟大学工学部 (☎ 950-2181 新潟市五十嵐二の町8050)。

E-mail: funa@eine.mech.nitech.ac.jp

た。

本論文では、接触モーメントの共分散行列の固有値を用いた接触の種類判別法を考察する。なお、センシングデータのモーメント成分に観測ノイズ等が含まれる場合を取扱う。接触状態は六軸力覚センサから得る力覚情報をもとに同定する。2章では問題の設定をする。3章では線形モデルを用いて接触点の位置と接触モーメントを推定する。次に、推定した接触モーメントから得る共分散行列の固有値を用いた接触の種類判別法を提案する。4章では、接触の種類に応じてより正確な接触点の位置、接触モーメントを同定する。5, 6章では、数値例と実験を用いて提案する手法の有効性を確認する。

2. 問題の設定

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状態を同定する問題を考察する。

2.1 記号 図1に示すような記号を定義する。

- $c$ : 把握対象物と外部環境との間の接触点
- $o$ : ロボットハンドに装備されたセンサ原点
- $\Sigma_o$ : 点  $o$  に固定されたセンサ座標系
- $\Sigma_c$ : 点  $c$  に固定された接触点座標系であり、姿勢は座標系  $\Sigma_o$  と同じ

- $f_o, n_o$ : 座標系  $\Sigma_o$  から見た計測力・モーメント
- $f_c, n_c$ : 座標系  $\Sigma_c$  から見た接触力・モーメント
- $r_c$ : 座標系  $\Sigma_o$  から見た点  $c$  の位置ベクトル

2.2 仮定 問題の簡単化のため次の仮定を設ける。

- (A1) 対象物はロボットハンドにより完全に拘束され、自由に操ることができる。
- (A2) ロボットはセンサ原点  $o$  での力  $f_o$ 、モーメント  $n_o$  と位置の計測と制御が可能である。しかし、接触力  $f_c$ 、モーメント  $n_c$  は計測できない。

(A3) 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  $c$  では滑りが生じない。

(A4) 対象物と外部環境は点接触、ソフトフィンガ接触、線接触、または面接触を行う。ただし、接触状態は未知である。

(A5) センシング回数は十分に大きい。また、本論文はエルゴード仮説に基づく。

(A6) アクティブセンシングにより接触モーメントはランダムに発生する。

(A7) 観測ノイズはランダムに発生し計測モーメント  $n_o$  のみに含まれる。その分散は接触モーメントに比べ小さい。

仮定(A4)に挙げた接触の種類は図2に示す4とおりであり、接触自由度  $m$  によって分類される<sup>(10)</sup>。

- $m=0$ : 摩擦のある面接触
- $m=1$ : 摩擦のある線接触
- $m=2$ : 摩擦のあるソフトフィンガ接触
- $m=3$ : 摩擦のある点接触

仮定(A7)より計測モーメントに含まれるノイズを  $\epsilon$ 、その共分散行列を

$$\text{Cov}[\epsilon] := \text{diag}[\gamma_x^2, \gamma_y^2, \gamma_z^2], \dots \dots \dots (1)$$

その最大値、最小値を

$$\gamma_{\max} := \max\{\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z\}, \dots \dots \dots (2)$$

$$\gamma_{\min} := \min\{\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z\} \dots \dots \dots (3)$$

とする。ただし、 $\text{diag}[\bullet]$  は対角行列を表す。

2.3 接触モーメントの拘束条件 図2に示す四つの接触の種類を考えると、接触モーメントには接触自由度  $m$  によって常に零となる方向がある。例えば、点接触では接触モーメントは常に零であり、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

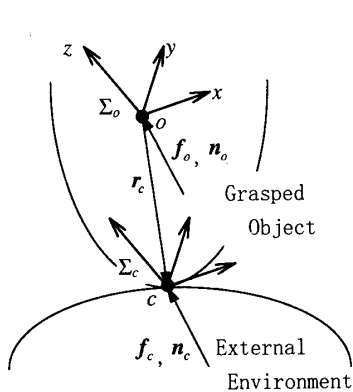


Fig. 1 Interaction between grasped object and external environment

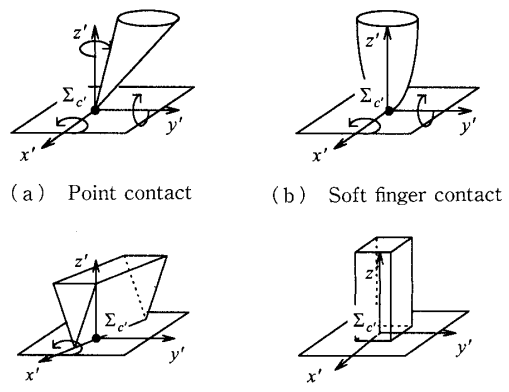


Fig. 2 Contact types

零である。この性質を最もよく表す座標系  $\Sigma_c$  を図2のようにとる。この  $\Sigma_c$  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  $\Sigma_c$  から見た接触モーメントを

$$\mathbf{n}'_c = [n'_{cx} \ n'_{cy} \ n'_{cz}]^T$$

と表すと、接触の種類に対応して次の成分が零になる<sup>(8)</sup>。

$$\left. \begin{array}{l} \text{Point contact} \quad : n'_{cx} = n'_{cy} = n'_{cz} = 0 \\ \text{Soft finger contact} : n'_{cx} = n'_{cy} = 0 \\ \text{Line contact} \quad : n'_{cx} = 0 \\ \text{Plane contact} \quad : \text{no constraint} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $\mathbf{n}_c$  は次式で表される。

$$\mathbf{n}_c = R\mathbf{n}'_c, \dots\dots\dots (5)$$

ただし、

$$R := [\mathbf{r}_x \ \mathbf{r}_y \ \mathbf{r}_z] \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \dots\dots\dots (6)$$

は、座標系  $\Sigma_c$  に対する  $\Sigma_c$  の姿勢を表す回転行列である。また、接触モーメント  $\mathbf{n}'_c$  の共分散行列を

$$\text{Cov}[\mathbf{n}'_c] := \text{diag}[\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2] \dots\dots\dots (7)$$

とする。式(4)より接触モーメントの標準偏差  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  は接触の種類に応じて次のような拘束を受ける。

$$\left. \begin{array}{l} \text{Point contact} \quad : \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 0 \\ \text{Soft finger contact} : \sigma_x = \sigma_y = 0 \\ \text{Line contact} \quad : \sigma_x = 0 \\ \text{Plane contact} \quad : \text{no constraint} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ただし  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  は未知量である。そして  $\sigma_{\bullet} \neq 0$  のときには、仮定(A7)より  $\sigma_{\bullet}^2 > \gamma_{\max}^2$  である。例えば、ソフトフィンガ接触の場合には  $\sigma_z^2 > \gamma_{\max}^2$  となる。

### 3. 接触状態の同定

本章では、モーメント成分にノイズを含む計測データより接触状態(接触点の位置、接触力、接触の種類)を同定する手法を考察する。

**3.1 力の釣合い** 力とモーメントの釣合い方程式は次式となる。

$$\mathbf{f}_c = \mathbf{f}_o, \dots\dots\dots (9)$$

$$\mathbf{r}_c \times \mathbf{f}_c + \mathbf{n}_c = \mathbf{n}_o. \dots\dots\dots (10)$$

式(9)を式(10)へ代入すると次式を得る。

$$\mathbf{r}_c \times \mathbf{f}_o + \mathbf{n}_c = \mathbf{n}_o. \dots\dots\dots (11)$$

式(11)において、仮定(A2)より  $\mathbf{f}_o$ ,  $\mathbf{n}_o$  は既知(検出可能)物理量であり、 $\mathbf{n}_c$ ,  $\mathbf{r}_c$  は同定すべき未知物理量である。ここで既知・未知パラメータを明確にするた

め

$$\mathbf{a} := \mathbf{f}_o, \mathbf{b} := \mathbf{n}_o, \mathbf{x} := \mathbf{r}_c. \dots\dots\dots (12)$$

とおく。式(11)では方程式の数が未知パラメータの数より少ない。そこで、初期接触状態を変えずにアクティブセンシングを用いて接触力を変化させる<sup>(7)</sup>。仮定(A7)より実際の計測力  $\mathbf{b}$  にはノイズ  $\boldsymbol{\epsilon}$  が含まれているので、このときに得られる関係式は式(11), (12)より次式となる。

$$-\mathbf{a}_i \times \mathbf{x} + \mathbf{n}_{ci} = \mathbf{b}_i - \boldsymbol{\epsilon}_i, \quad i=1, 2, \dots, k, \dots\dots (13)$$

ただし、添字  $i$  は  $i$  回めのセンシングデータを意味する。

**3.2 偏差力** 点接触の場合、接触点の位置を推定するには初期接触状態からの偏差力・モーメントが用いられる<sup>(4)</sup>。しかし、本論文では点接触以外の接触の種類を考慮するため、平均値が零となる偏差力を次のように生成する。

まず、 $k$  回のアクティブセンシングを繰返したときの計測量  $\mathbf{a}_i$ ,  $\mathbf{b}_i$  の加算平均を計算する。

$$\mathbf{a}_0 := \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mathbf{a}_i, \mathbf{b}_0 := \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \mathbf{b}_i. \dots\dots\dots (14)$$

以下、添字 0 は加算平均を表す。次に、これらの加算平均から  $i$  回めのセンシングデータへの偏差ベクトルを

$$\bar{\mathbf{a}}_i := \mathbf{a}_i - \mathbf{a}_0, \bar{\mathbf{b}}_i := \mathbf{b}_i - \mathbf{b}_0 \dots\dots\dots (15)$$

とする。したがって、 $\bar{\mathbf{a}}_i$ ,  $\bar{\mathbf{b}}_i$  の加算平均は零になり、計測量  $\mathbf{a}_i$ ,  $\mathbf{b}_i$  に含まれるオフセットを補正できる。

式(13)~(15)より  $\bar{\mathbf{b}}_i$  は次式で表現できる。

$$\bar{\mathbf{b}}_i = \bar{\mathbf{A}}_i \mathbf{x} + \bar{\mathbf{n}}_{ci} + \bar{\boldsymbol{\epsilon}}_i. \dots\dots\dots (16)$$

ただし、

$$\bar{\mathbf{A}}_i := -[\bar{\mathbf{a}}_i \times], \bar{\mathbf{n}}_{ci} := \mathbf{n}_{ci} - \mathbf{n}_{c0}, \bar{\boldsymbol{\epsilon}}_i := \boldsymbol{\epsilon}_i - \boldsymbol{\epsilon}_o \dots\dots\dots (17)$$

とする。

2.2 節の仮定より接触モーメント  $\mathbf{n}_{ci}$ , 観測ノイズ  $\boldsymbol{\epsilon}_i$  はそれぞれ未知パラメータであり独立かつランダムに発生する。そこで、これらをまとめ

$$\bar{\mathbf{v}}_i := \bar{\mathbf{n}}_{ci} + \bar{\boldsymbol{\epsilon}}_i \dots\dots\dots (18)$$

とする。 $\bar{\mathbf{v}}_i$  の平均は零になる。

したがって、同定問題は、「 $\{\bar{\mathbf{A}}_i, \bar{\mathbf{b}}_i\}_{i=1}^k$  が与えられたときに  $\mathbf{x}$  と  $\{\bar{\mathbf{v}}_i\}_{i=1}^k$  を求める」という問題に帰着される。

**3.3 接触点位置の同定**  $\bar{\mathbf{v}}_i$  の分散を最小とする未知パラメータ  $\mathbf{x}$  を求めるため、評価関数を

$$J = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \|\bar{\mathbf{A}}_i \mathbf{x} - \bar{\mathbf{b}}_i\|^2 \dots\dots\dots (19)$$

とする。接触点位置の推定値は

$$\hat{x}(k) = \left( \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \bar{A}_i^T \bar{A}_i \right)^{-1} \left( \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \bar{A}_i^T \bar{b}_i \right) \quad \dots\dots\dots (20)$$

と与えられる。また、式(16)、(18)より、ノイズを含む接触モーメント  $\hat{v}_i$  の推定値を

$$\hat{v}_i(k) := \bar{b}_i - A_i \hat{x}(k) \quad \dots\dots\dots (21)$$

とする。仮定(A5)より、推定値  $\hat{x}(k)$ 、 $\hat{v}_i(k)$  は

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \hat{x}(k) = x^*, \lim_{k \rightarrow \infty} \hat{v}_i(k) = v_i^* \quad \dots\dots\dots (22)$$

となり一致推定量になることが保証される。ただし、●\* は●の真値を表す。

**3・4 接触の種類判別** 本節では、ノイズを含む接触モーメントより得る共分散行列の固有値を用いた接触の種類判別法を提案する。

**3・4・1  $\hat{v}_i$  の空間平均** ノイズを含む接触モーメント  $\hat{v}_i$  の共分散行列を考える。

$$\begin{aligned} M &:= \text{Cov}[\hat{v}] = E[\hat{v}\hat{v}^T] \\ &= E[\bar{n}_c \bar{n}_c^T] + E[\bar{n}_c \bar{\epsilon}^T] \\ &\quad + E[\bar{\epsilon} \bar{n}_c^T] + E[\bar{\epsilon} \bar{\epsilon}^T] \quad \dots\dots\dots (23) \end{aligned}$$

ただし、 $E[\bullet]$  は  $\bullet$  の平均を表す。式(1)、(5)、(7)より、行列  $M$  は次式となる。

$$M = R \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z^2 \end{bmatrix} R^T + \begin{bmatrix} \gamma_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_z^2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (24)$$

ノイズ  $\epsilon_i$  が無い場合、その分散はすべて零になる。つまり

$$\gamma_x^2 = \gamma_y^2 = \gamma_z^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (25)$$

となる。したがって、式(8)、(25)より接触の種類と行列  $M$  の階数との関係は次のように表されるので、接触の種類を判別することができる。

$$\text{rank } M = \begin{cases} 0 & \text{for a point contact type,} \\ 1 & \text{for a soft finger contact type,} \\ 2 & \text{for a line contact type,} \\ 3 & \text{for a plane contact type.} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (26)$$

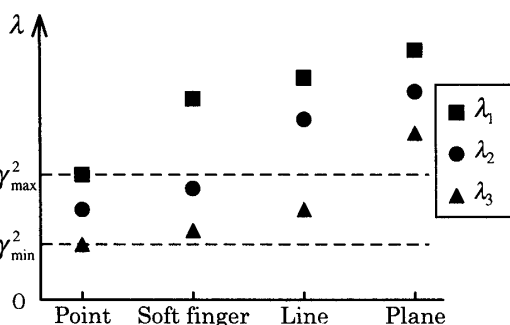


Fig. 3 Relation between contact types and eigenvalues

しかし、ノイズがある場合には行列  $M$  の階数は常に3となり、接触の種類は判別できない。そこで、行列  $M$  の固有値を用いて接触の種類を判別することを考える。Weylの定理<sup>(11)</sup>より行列  $M$  の固有値  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 (\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq 0)$  には次の関係が成立する。

$$\sigma_j^2 + \gamma_{\max}^2 \geq \lambda_j \geq \sigma_j^2 + \gamma_{\min}^2, \quad j=1, 2, 3. \quad \dots\dots\dots (27)$$

ただし、 $\sigma_j$  は  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  のうち  $j$  番めに大きな標準偏差を表す。ここで、式(8)、(27)より導出される接触の種類と固有値との関係を図3に示す。2・2節の仮定より  $\sigma, \gamma$  は未知量であるが図3より、あるしきい値  $\theta$  を  $\gamma_{\max}^2$  以上に設定できれば、接触の種類を判別できる。つまり、接触の種類と固有値との間には次のような関係が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} \theta &> \lambda_1 && \text{for a point contact type,} \\ \lambda_1 &> \theta > \lambda_2 && \text{for a soft finger contact type,} \\ \lambda_2 &> \theta > \lambda_3 && \text{for a line contact type,} \\ \lambda_3 &> \theta && \text{for a plane contact type.} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (28)$$

**3・4・2  $\hat{v}_i$  の時間平均** 実際のセンシングから得られる  $\hat{v}_i$  の時間平均から共分散行列  $M$  を推定する。次の行列を定義する。

$$N(k) := \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \hat{v}_i(k) \hat{v}_i(k)^T \in \mathbb{R}^{3 \times 3}. \quad \dots\dots\dots (29)$$

行列  $N(k)$  の特異値分解した結果を

$$N(k) = R' \begin{bmatrix} \mu_1(k) & 0 & 0 \\ 0 & \mu_2(k) & 0 \\ 0 & 0 & \mu_3(k) \end{bmatrix} R'^T, \quad \dots\dots\dots (30)$$

ただし、

$$R' := [r_1 \quad r_2 \quad r_3] \quad \dots\dots\dots (31)$$

とする。仮定(A5)のエルゴード仮説を考慮するとセンシング回数  $k$  が十分に大きい場合、

$$N(\infty) = M \quad \dots\dots\dots (32)$$

である。したがって、固有値  $\mu_1(\infty), \mu_2(\infty), \mu_3(\infty) (\mu_1(\infty) \geq \mu_2(\infty) \geq \mu_3(\infty) \geq 0)$  は行列  $M$  の固有値  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  にそれぞれ等しく、式(28)の関係を満たすので接触の種類を判別できる。そこで、センシング回数  $k$  が有限な場合で、式(28)の関係に基づき接触の種類を判別することにする。

実際の作業では、しきい値  $\theta$  は事前に行う力覚センサのキャリブレーションより設定できる。

**4. 未知パラメータの同定**

3章では、アクティブセンシングの回数  $k$  が十分に大きい場合に、推定した接触点の位置が一致推定量になることを、また接触の種類が判別可能なことを示し

た。本章ではセンシング回数が有限な場合について、式(4)の接触モーメントの拘束条件を考慮した未知パラメータのより正確な推定法を考察する。

**4・1 点接触の場合** 点接触の場合、式(4)、(5)、(16)より

$$\bar{\mathbf{b}}_i = \bar{\mathbf{A}}_i \mathbf{x} + \bar{\mathbf{e}}_i \quad \dots\dots\dots (33)$$

となる。そこで、 $\bar{\mathbf{e}}_i$ の分散を最小にする $\mathbf{x}$ を求めるための評価関数を

$$J_p = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \|\bar{\mathbf{A}}_i \mathbf{x} - \bar{\mathbf{b}}_i\|^2 \quad \dots\dots\dots (34)$$

とする。この評価関数 $J_p$ を最小とする推定値 $\hat{\mathbf{x}}$ は式(20)で与えられる。

**4・2 ソフトフィンガ接触の場合** ソフトフィンガ接触の場合には、式(4)、(5)より接触モーメントは

$$\mathbf{n}_{ci} = \mathbf{r}_z \mathbf{n}'_{czi} = [\gamma_{z1} \ \gamma_{z2} \ \gamma_{z3}]^T \mathbf{n}'_{czi} \quad \dots\dots\dots (35)$$

と拘束される。ただし、 $\mathbf{r}_z$ は接触点における単位法線ベクトルを示す。評価関数は

$$J_s = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left\| \bar{\mathbf{A}}_i \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \gamma_{z1} \\ \gamma_{z2} \\ \gamma_{z3} \end{bmatrix} \mathbf{n}'_{czi} - \bar{\mathbf{b}}_i \right\|^2 \quad \dots\dots\dots (36)$$

とする。ここで、 $\mathbf{r}_z$ の要素で絶対値の最大のものを $r_{z\max}$ とおくと、接触モーメントは次の3とおりで表記できる。

$$\mathbf{n}_{ci} = \begin{cases} [1 \ y_1 \ y_2]^T z_i & \text{for } r_{z\max} = r_{z1}, \\ [y_1 \ 1 \ y_2]^T z_i & \text{for } r_{z\max} = r_{z2}, \\ [y_1 \ y_2 \ 1]^T z_i & \text{for } r_{z\max} = r_{z3}, \end{cases} \quad \dots\dots\dots (37)$$

このことに注意すれば評価関数 $J_s$ は、例えば $r_{z\max} = r_{z1}$ の場合には

$$J_s = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left\| \bar{\mathbf{A}}_i \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 1 \\ y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} z_i - \bar{\mathbf{b}}_i \right\|^2 \quad \dots\dots\dots (38)$$

となる。 $J_s$ を最小とする未知パラメータ $\mathbf{x}$ 、 $y_1$ 、 $y_2$ 、 $\{z_i\}_{i=1}^k$ を同定するには、

$$\frac{\partial J_s}{\partial \mathbf{x}} = 0, \quad \frac{\partial J_s}{\partial y_1} = 0, \quad \frac{\partial J_s}{\partial y_2} = 0, \quad \frac{\partial J_s}{\partial z_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (39)$$

の非線形方程式を解く必要がある。しかし、著者らが効率よく未知パラメータを同定する手法を提案しているので利用する<sup>(9)</sup>。その手法は以下である。

Step 1: 3章の推定法より初期値を与える。

Step 2:  $\mathbf{x}$ 、 $y_1$ 、 $y_2$ を固定し、 $J_s$ を最小とする $z_i$ を同定する。

Step 3:  $z_i$ を固定し、 $J_s$ を最小とする $\hat{\mathbf{x}}$ 、 $\hat{y}_1$ 、 $\hat{y}_2$ を同定する。

以下 Step 2, 3 の計算をある収束条件を満たすまで繰返す。

実際には法線 $\mathbf{r}_z$ は未知であるが、式(30)より法線に近い固有ベクトル $\mathbf{r}_1$ を推定できる。それゆえ、 $\mathbf{r}_z = \mathbf{r}_1$ とし、評価関数 $J_s$ を選択する。

**4・3 線接触の場合** 線接触の場合には、式(4)、(5)より接触モーメントは

$$\mathbf{n}_{ci} = \begin{bmatrix} \gamma_{y1} & \gamma_{y2} & \gamma_{y3} \\ \gamma_{z1} & \gamma_{z2} & \gamma_{z3} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} n'_{cyi} \\ n'_{czi} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (40)$$

と拘束される。評価関数は、

$$J_i = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left\| \bar{\mathbf{A}}_i \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \gamma_{y1} & \gamma_{z1} \\ \gamma_{y2} & \gamma_{z2} \\ \gamma_{y3} & \gamma_{z3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n'_{cyi} \\ n'_{czi} \end{bmatrix} - \bar{\mathbf{b}}_i \right\|^2 \quad \dots\dots\dots (41)$$

とする。

ソフトフィンガ接触と同様に接触モーメントは次の3とおりで表記できる。

$$\mathbf{n}_{ci} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 1 & 0 & y_1 \\ 0 & 1 & y_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} z_{i1} \\ z_{i2} \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} 1 & y_1 & 0 \\ 0 & y_2 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} z_{i1} \\ z_{i2} \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} y_1 & 1 & 0 \\ y_2 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} z_{i1} \\ z_{i2} \end{bmatrix}. \end{cases} \quad \dots\dots\dots (42)$$

式(30)より接触線の方向 $\mathbf{r}_x$ は固有ベクトル $\mathbf{r}_3$ に近い。そこで、接触モーメントの表記を用いて評価関数 $J_i$ を効率よく計算し、ソフトフィンガ接触と同様の手順で未知パラメータを同定し直す<sup>(9)</sup>。

**4・4 面接触の場合** 面接触の場合、センシング回数を増やしても未知パラメータを一意に決定できない<sup>(8)</sup>。

**4・5 接触状態の同定アルゴリズム** 以上より、次のようなアルゴリズムを用いれば、接触状態を効率よく同定できる。

Step 1: アクティブセンシングを実行する。

Step 2: 式(15)より偏差力を生成する。

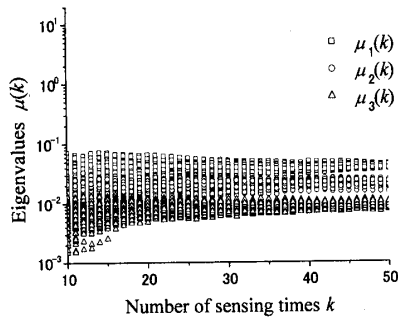
Step 3: 式(20)より接触の位置 $\hat{\mathbf{x}}$ を推定する。

Step 4: 式(21)より接触モーメント $\hat{\mathbf{v}}_i$ を推定する。

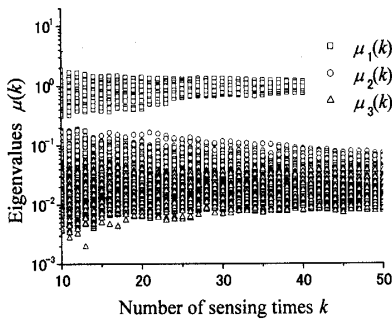
Step 5: 式(30)より行列 $N$ の固有値を計算し、式(28)より接触の種類を判別する。

Step 6: If ソフトフィンガ接触,  
then 4・2節より未知パラメータを同定し直す。

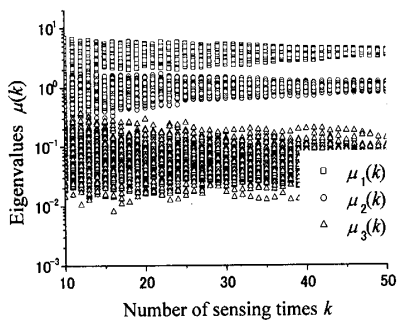
Step 7: If 線接触,  
then 4・3節より未知パラメータを同定し直す。



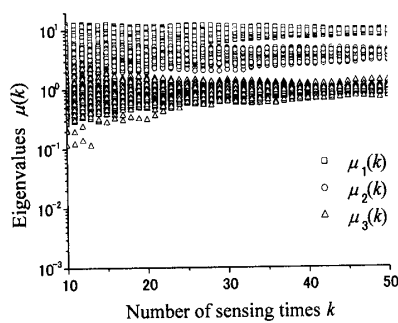
(a) Point contact



(b) Soft finger contact



(c) Line contact

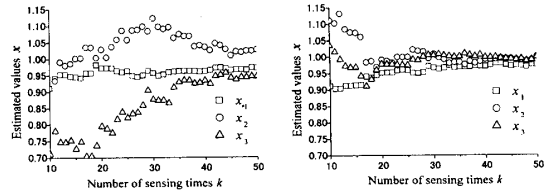


(d) Plane contact

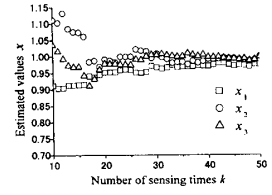
Fig. 4 Distribution of the eigenvalues

Step 8: Step 1へ

このアルゴリズムを用いれば、連続的に接触状態の推定もできる。また、面接触では、未知パラメータを同定することはできないが、接触の種類は判別できる。

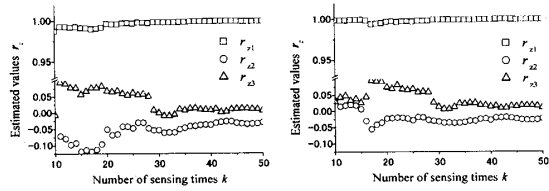


(a) Linear estimates

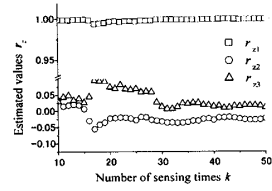


(b) Typed estimates

Fig. 5 Estimated contact position



(a) Linear estimates



(b) Typed estimates

Fig. 6 Estimated normal direction

### 5. 数 値 例

数値例により4章で提案した接触状態の同定アルゴリズムの有効性を示す。2・2節の仮定に基づき点接触、ソフトフィンガ接触、線接触、面接触のデータを作成し、ノイズを含む接触モーメントの共分散行列の固有値および接触点の位置と法線方向を計算する。ただし、

$$\mathbf{x} = [1.00, 1.00, 1.00]^T$$

$$\text{Cov}[\boldsymbol{\epsilon}] = \text{diag}[0.10^2, 0.15^2, 0.20^2]$$

$$\text{Cov}[\mathbf{n}_c] = \text{diag}[3.00^2, 2.00^2, 1.00^2]$$

とする。

図4は本アルゴリズムで計算した固有値  $\mu_1(k)$ ,  $\mu_2(k)$ ,  $\mu_3(k)$  の変化を示したものである。各接触状態について100回試行した。点接触では、すべての固有値はノイズの分散へと収束している。ソフトフィンガ接触では、 $\mu_1(k)$  は接触モーメント、 $\mu_2(k)$  と  $\mu_3(k)$  はノイズの分散へとそれぞれ収束している。線接触では、 $\mu_1(k)$  と  $\mu_2(k)$  は接触モーメント、 $\mu_3(k)$  はノイズの分散へとそれぞれ収束している。面接触では、すべての固有値は接触モーメントの分散へと収束している。以上の結果より、図3に示したように固有値が接触モーメントの分散かノイズの分散へと収束することが確認できる。また、図4と式(28)よりアクティブセンシングの回数  $k$  が20回以上であれば、しきい値を  $\theta = 0.30$  と設定でき、接触の種類を判別できる。したがって、センシング回数  $k$  が有限な場合にも行列  $N(k)$  の固有値より接触の種類を同定可能なことが確認できた。

図5, 6は, ソフトフィンガ接触の場合の接触点の推定値  $\hat{x}$  および接触点の法線方向  $\hat{r}_z$  をそれぞれ示す。ただし, 図5(a), 6(a)の linear estimates は式(20)の線形モデルによる推定値, 図5(b), 6(b)の typed estimates は4章で提案した接触の種類を判別後に再同定した推定値を表す。また, 法線の真値は  $r_z = [1, 0, 0]^T$  とする。linear estimates も typed estimates もアクティブセンシングの回数  $k$  の増加とともに真値へと収束する。しかし, typed estimates の方が linear estimates より真値に近いことから, 本方法の有効性が示された。

6. 実験

本章では, 提案した接触状態の同定法の有効性を実証するために行った実験について述べる。

6.1 実験装置 図7に実験装置を示す。6軸ロボットはプログラムにより6自由度の回転・並進運動ができる。また, 力覚センサはNITTA社の六軸力覚センサ(定格  $F_x, F_y: \pm 22.7 \text{ kgf}, F_z: \pm 45.4 \text{ kgf}, N_x, N_y, N_z: \pm 190.1 \text{ kgfcm}$ , 分解能  $F_x, F_y: 0.01108 \text{ kgf}, F_z: 0.02217 \text{ kgf}, N_x, N_y, N_z: 0.09282 \text{ kgfcm}$ )を用いる。センサはばねを介してロボットに装備され, そのデータはパーソナルコンピュータを使いタイマ A/D 変換ボードにより 5 Hz の一定間隔で取得する。把持対象物は滑りを防ぐために外部環境にはゴム板を使用した。

6.2 実験結果 既知の接触状態(点接触)を用い

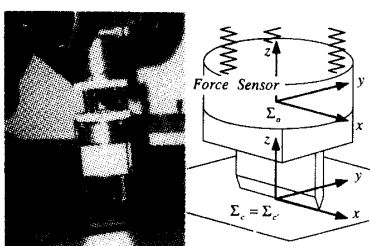


Fig. 7 Experiment device

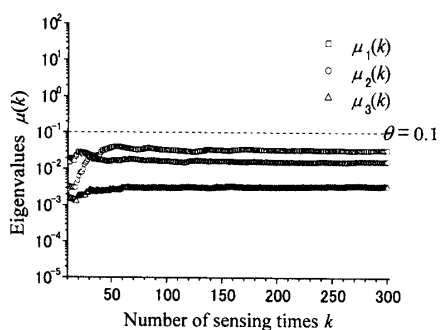


Fig. 8 Characteristic of Sensor

て調べたセンサ特性を図8に示す。行列  $N(k)$  の固有値は 0.030, 0.015, 0.003 に収束しているの、これらが計測モーメントのノイズの分散と推測される。そこで, 本論文では接触の種類を判別するためのしきい値を  $\theta = 0.1$  と設定する。

図7に示す線接触での実験結果を図9~11に示す。図9は行列  $N$  の固有値の分布を示す。しきい値  $\theta = 0.1$  より, 固有値  $\mu_1(k), \mu_2(k)$  は接触モーメントの分散,  $\mu_3(k)$  はノイズの分散として分離でき, 接触の種類を線接触と判別できる。

図10, 11は接触点の位置  $x$ , 接触線の方法  $r_x$  の推定値をそれぞれ示す。ただし, 接触点は接触線上で任意に与えられるので真値は

$$x^* = x_0^* + t r_x^* = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -6 \end{bmatrix} + t \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (43)$$

である。ただし,  $t$  は任意の値をとる。数値計算と同様に接触点の位置, 接触線の方法ともに linear esti-

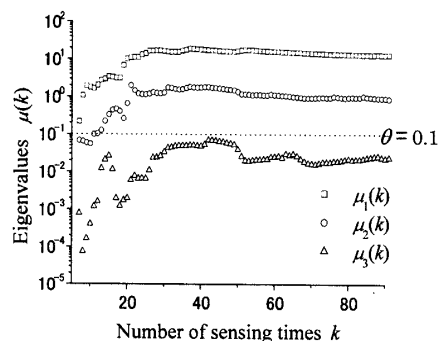


Fig. 9 Eigenvalues of  $N(k)$

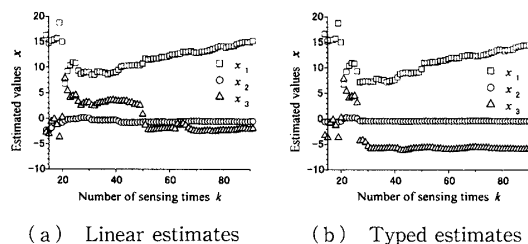


Fig. 10 Estimated contact position

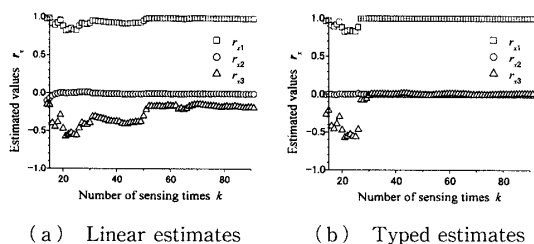


Fig. 11 Estimated direction of contact line

mates はアクティブセンシングの回数  $k$  の増加とともに真値へと収束する傾向が見られ, typed estimates はセンシング回数  $k=30$  を超える辺りからほぼ真値に収束していることが確認できる。

以上より, 本論文で提案する接触状態の同定法の有効性が示された。また, センシング回数  $k$  が少ない場合には接触状態をうまく同定できないが,  $k$  を多くすることで同定できるようになるので, 本手法におけるアクティブセンシングの重要性も明らかになった。

## 7. 結 言

本論文では計測データのモーメント成分のノイズを考慮し, 未知形状である対象物の接触状態を同定する問題を取扱った。まず, 点接触, ソフトフィンガ接触, 線接触, 面接触を接触モーメントの標準偏差を用いて特徴づけた。次に, アクティブセンシングから得た力覚情報より, 接触点の位置を線形の最小二乗法を用いて同定した。また, ノイズを含む接触モーメントを推定し, それから得る共分散行列の固定値を用いて接触の種類を判別するための方法を考察した。最後に, 接触の種類に応じてより正確な接触点位置・接触モーメントを同定する方法を提案し, 数値例と実験によりその有効性を確認した。

本手法では, ソフトフィンガ接触であれば接触点の法線, 線接触であれば接触線の方向も容易に推定することができる。また, 力覚情報のノイズを考慮しているので, ロボットによる把持対象物の自動挿入および

組立などの実作業にも応用可能である。

本研究について貴重なご助言をいただいた名古屋工業大学 大羽達志博士, 実験にご協力いただいた新潟大学大学院生 加藤元氏に感謝する。

## 文 献

- (1) Bicchi, A., Salisbury, J. K., Brock, D. L., Contact Sensing from Force Measurements, *Int J. Robotics Res.*, **12**-3, (1993), 249-262.
- (2) Kaneko, M., Active Antenna, *Proc. IEEE. Conf. Robotics Autom.*, (1994), 2665-2671.
- (3) Salisbury, J. K., Interpretation of Contact Geometries from Force Measurements, *Proc. 1st Int. Symp. Robotics Res.*, (1983), 565-577.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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), 3816-3821.
- (8) 三村宣治・舟橋康行・毛利哲也, 接触パラメータの同定アルゴリズム, 機論, **63**-610, C(1997), 2061-2068.
- (9) 山田貴孝・毛利哲也・三村宣治・舟橋康行, ノイズを考慮した接触パラメータの同定, 機論, **64**-618, C(1998), 584-589.
- (10) Mason, M. T. and Salisbury, J. K., *Robot Hands and the Mechanics of Manipulation*, (1985), 9-23, Cambridge, MA, MIT Press.
- (11) Horn, R. A. and John, C. R., *Topics in Matrix Analysis*, (1991), 170-181, Cambridge Univ. Press.