

# ロボットの接触状態の同定

—コンプライアンスを用いた場合の変位と計測力—

○山田貴孝 (名工大) 毛利哲也 (岐阜大) 川瀬康裕 (名工大)  
三村宣治 (新潟大) 舟橋康行 (名工大)

## Identification of contact conditions between a grasped object and external environment

- Relationship between displacement and force by using compliance -

○Takayoshi YAMADA\*, Tetsuya MOURI\*\*, Yasuhiro KAWASE\*,  
Nobuharu MIMURA\*\*\*, and Yasuyuki FUNAHASHI\*

\*: Nagoya Institute of Technology, \*\*: Gifu University, \*\*\*: Niigata University

**Abstract:** It is required to identify contact conditions between a grasped object and external environment prior to performing assembly tasks. The contact conditions mean contact position, contact force, and contact type. This paper discusses the case where a wrist compliancer between a hand and an arm is mounted. In this case, the contact type remains unchanged during an identification process. Both displacement and generated force at sensor coordinate frame are formulated. A stiffness matrix, which is provided from the relationship between the motion of the arm and the measured force, is utilized for classification of the contact type.

**Key Words:** Identification, Contact Conditions, Active Sensing, Compliance, Stiffness Matrix, Hand

### 1. はじめに

組立作業においては把持対象物と外部対象物との間で様々な接触が生じるため、接触状態を検出し、制御する必要がある。しかし、その検出の困難さのため、未だに自律的作業が可能なロボットの開発には至っていない。一方、人間は接触を伴う作業を手先の感覚から器用に遂行している。このような人間の技量をロボットで実現するために、接触状態の同定や接触の遷移の検出に関する研究が行われている。

著者らは接触の種類が未知の下で、点接触、ソフトフィンガ接触、線接触、面接触の4つの接触の種類を力覚情報のみで判別する手法を提案した<sup>(1),(2)</sup>。また、速度情報を用いて接触点位置の推定および接触の種類を判別を行なう手法も示した<sup>(3)</sup>。しかし、接触状態が未知の段階で、接触の種類を変えることなく力や変位をどのようにして発生させるかが問題となる。他方、菊植・吉川ら<sup>(4)</sup>は、力覚情報と位置情報の時間変化から機械インピーダンスを推定し、剛性行列を用いて拘束の方向や拘束の硬さを推定している。これは、作業をしながら大まかに推定する手法であるが、前述の4つの接触の種類を判別する

ものではない。

ところで、人間の場合には、手の柔軟性を有効に利用して、接触の種類を判別していると考えられる。例えば、把持対象物と外部環境との接触の種類が線接触の場合を考えてみる。対象物を接触線に沿う方向に変位させようとする、環境からの反力が大きく手に変形する。接触線と直交する方向に変位させようとする、反力が小さく対象物に変位する。このように、手の柔軟性により、接触の種類を変えることなく変位と力を効果的に発生させ、接触状態の同定の容易さを高めていると考えられる。

そこで、本論文では、この軟らかさを積極的に用いる。Fig. 1のように、ロボットハンドとロボットアームの間に弾性部を設定し、バネ剛性としてモデル化する。これにより、接触状態が未知の段階であっても、アームに任意の微小変位を加えると、接触の種類に応じてハンドに力と変位を同時に発生できる。力を計測すれば文献(1)に、変位を計測すれば文献(3)に利用できる。このように力と変位のセンサーフュージョンが可能となる。そこで、この力と変位を、接触点での力と変位の拘束条件が双対な関係にあることを用いて定式化する。さらに、アーム変位と計測力の関係から剛性行列を導出し、接触の種類を判別する。

### 2 問題の設定

#### 2.1. 記号

Fig. 2のように、把持対象物が外部環境に接触している状況を考える。以下に本論文で用いる記号を示す。

$\Sigma_b$ : 基準座標系

$\Sigma_m$ : マニピュレータ先端の座標系

$\Sigma_e$ : 外部環境に固定された接触点座標系

$\Sigma_o$ : センサ座標系 (対象物に相対的に固定)

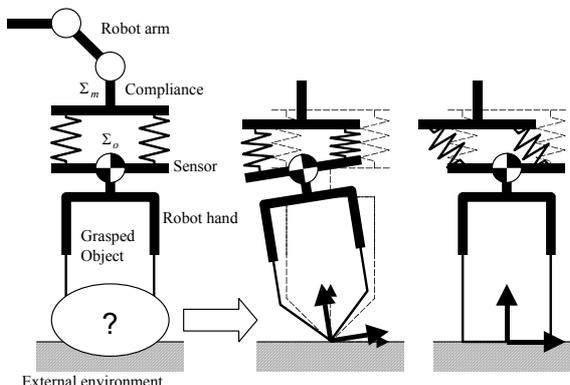


Fig.1: Difference of displacements

$\Sigma_c$ : 対象物側に固定された接触点座標系. ただし, この座標系の姿勢は座標系  $\Sigma_o$  と同じである.  
 $\Sigma_{c'}$ : 対象物側に固定された接触点座標系. ただし, 初期の姿勢は座標系  $\Sigma_e$  と同じであり, 各接触状態の特徴を示す.

${}^o r_c$ : 接触点位置

本論文では座標系  $\Sigma_m$  を新たに設定する. これ以外は文献(3)と同じである.

## 2.2. 仮定

問題の簡単化のため以下の仮定を設ける.

(A1) ロボットハンドとロボットアームの間には弾性部があり, そのスティフネス  $K_o$  はフルランクである.

(A2) 把持対象物はロボットハンドによって拘束されている.

(A3) アクティブセンシングにおいて接触状態の変化はなく, 接触点での滑りは発生しない.

(A4) 把持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, 面接触のいずれかで接触している.

ここで, 仮定(A1)が本論文の特徴である. アームに変位が生じると, 弾性部を介してハンドに変位と力が生じる. 仮定(A2)は把持対象物とハンドが相対的に固定されていることを意味する. 力覚センサは

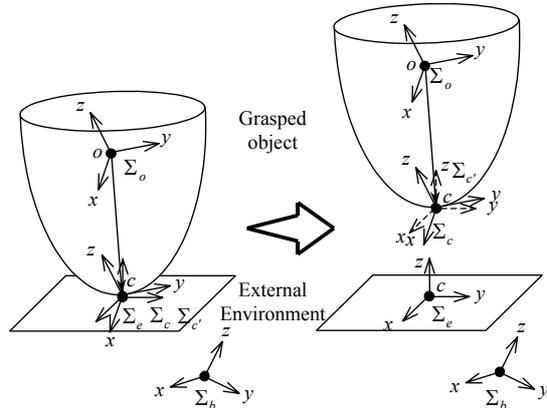


Fig.2: Coordinate frames

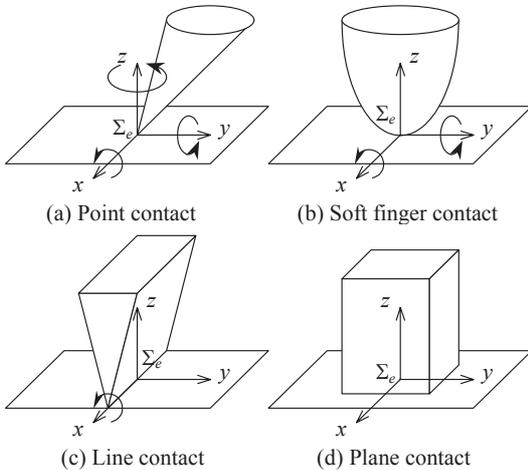


Fig. 3: Contact types

ハンド側に固定されているとする. これにより, 文献(1)の仮定を満たす. 仮定(A3)は接触点位置が動かないことを意味し, 仮定(A4)は接触点で摩擦錐内の任意の並進力が発生することを意味している. Mason<sup>(5)</sup>により定義された接触の種類を用いる.

## 2.3. 拘束条件

本論文で考える接触の種類は, 仮定(A4)で述べた4種類である. これらの特徴づけるため, Fig.3で示すような外部環境に対する法線を  $z$  軸とする特殊な座標系  $\Sigma_e$  を設定する. ただし線接触の場合, 接触線上に  $x$  軸が沿うように座標系を設定する. 座標系  $\Sigma_e$  から見た接触点での対象物の相対角速度  $\boldsymbol{\omega} = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$  と接触モーメント  $\boldsymbol{n} = [n_x, n_y, n_z]^T$  は接触の種類に応じて以下の拘束条件を持つ.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Point contact} \quad : n_x = n_y = n_z = 0 \\ \text{Soft finger contact} : n_x = n_y = 0, \omega_z = 0 \\ \text{Line contact} \quad : n_x = 0, \omega_y = \omega_z = 0 \\ \text{Plane contact} \quad : \omega_x = \omega_y = \omega_z = 0 \end{array} \right\} \quad (1)$$

角速度  $\boldsymbol{\omega}$  の拘束条件と接触モーメントの拘束条件は双対な関係にある. つまり, ある軸周りにモーメントが発生している時はその軸周りに角速度が発生せず, モーメントが発生していないときはその軸周りに角速度が発生する. 本論文では, 式(1)の角速度  $\boldsymbol{\omega}$  の拘束条件を微小角変位  $\delta\theta$  の拘束条件として用いる.

## 2.4. 同次変換行列と速度変換行列

座標系  $\Sigma_b$  に対する座標系  $\Sigma_o$  の同次変換行列を

$${}^b T_o(t_i) = \begin{bmatrix} {}^b R_o(t_i) & {}^b p_{b,o}(t_i) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

と表わす.  ${}^b p_{b,o}$ ,  ${}^b R_o$  はそれぞれ位置ベクトルと回転行列を示している.  ${}^b T_o$  に対応する速度変換行列を

$${}^b H_o = \begin{bmatrix} {}^b R_o & {}^b p_{b,o} \times {}^b R_o \\ 0 & {}^b R_o \end{bmatrix} \quad (3)$$

と表わす. 以下同様にして

$$\begin{aligned} {}^b T_e &= \begin{bmatrix} {}^b R_e & {}^b p_{b,e} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^e T_c(t_i) = \begin{bmatrix} {}^e R_c(t_i) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^c T_c &= \begin{bmatrix} {}^c R_c & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^c T_o = \begin{bmatrix} I_3 & -{}^o r_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^o T_m(t_i) &= \begin{bmatrix} {}^o R_m(t_i) & {}^o p_{o,m}(t_i) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

を設定する. 仮定(A3)を考慮しているが, 詳細は文献(3)を参照されたい.

## 3. 問題の定式化

### 3.1 接触点で生じるモーメント

センサ座標系  $\Sigma_o$  に対する  $\Sigma_m$  の同次変換行列は次の式で与えられる.

$${}^o T_m(t_i) = \{ {}^o T_c \} \{ {}^c T_c \} \{ {}^c T_e(t_i) \} \{ {}^e T_b \} \{ {}^b T_m(t_i) \} \quad (5)$$

$\Sigma_o$  で見た  $\Sigma_o$  に対する  $\Sigma_m$  の相対速度  ${}^o V_{o,m}$  は

$$\begin{aligned} {}^o\hat{V}_{o,m}(t_i) &= \{{}^o\dot{T}_m(t_i)\} \{{}^oT_m(t_i)\}^{-1} \\ &= \{{}^oT_m(t_i)\} \{{}^m\hat{V}_{b,m}(t_i)\} \{{}^oT_m(t_i)\}^{-1} \\ &\quad - \{{}^oT_e(t_i)\} \{{}^e\hat{V}_{e,c}(t_i)\} \{{}^oT_e(t_i)\}^{-1} \end{aligned} \quad (6)$$

となる<sup>(6)</sup>。したがって、アームの微小変位 ${}^m\delta X_{b,m}$ と接触点での微小変位 ${}^e\delta X_{e,c}$ により、センサ原点では次のひずみを生じる。

$$\begin{aligned} {}^o\delta X_{o,m}(t_i) &= \{{}^oH_m(t_i)\} \{{}^m\delta X_{b,m}(t_i)\} \\ &\quad - \{{}^oH_e(t_i)\} \{{}^e\delta X_{e,c}(t_i)\} \end{aligned} \quad (7)$$

接触点で滑りを生じないという仮定(A3)より、 ${}^e\delta X_{e,c}$ は次のように書ける。

$${}^e\delta X_{e,c}(t_i) = \begin{bmatrix} 0_3 \\ {}^e\delta\theta_{e,c}(t_i) \end{bmatrix} \quad (8)$$

また、 ${}^e\delta X_{e,c}$ は接触の種類に応じて式(1)の拘束を受けることにも注意する。

アームは弾性装置を介して環境に力を加えるが、その反力によりセンサでの計測力 $\delta F_o$ は次の式で与えられる。

$$\delta F_o(t_i) = -\{K_o\} \{{}^o\delta X_{o,m}(t_i)\} \quad (9)$$

計測力と接触点で環境から受ける力 $\delta F_e$ の関係は

$$\delta F_o(t_i) = \{{}^eH_o(t_i)\}^T \{\delta F_e(t_i)\} \quad (10)$$

である。式(7), (9), (10)より

$$\begin{aligned} \delta F_e(t_i) &= \{{}^oH_e(t_i)\}^T \{K_o\} \{{}^oH_e(t_i)\} \{{}^e\delta X_{e,c}(t_i)\} \\ &\quad - \{{}^oH_e(t_i)\}^T \{K_o\} \{{}^oH_m(t_i)\} \{{}^m\delta X_{b,m}(t_i)\} \end{aligned} \quad (11)$$

を得る。ただし、

$${}^oH_e(t_i) = \begin{bmatrix} {}^cR_c & {}^o\mathbf{r}_c \times {}^cR_c \\ 0 & {}^cR_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^cR_e(t_i) & 0 \\ 0 & {}^cR_e(t_i) \end{bmatrix} \quad (12)$$

である。接触点で生じるモーメントは、式(8), (11), (12)より

$$\begin{aligned} \delta n_e(t_i) &= \{{}^cR_e(t_i)\}^T A \{{}^cR_e(t_i)\} \{{}^e\delta\theta_{e,c}(t_i)\} \\ &\quad - \{{}^cR_e(t_i)\}^T B \{{}^oH_m(t_i)\} \{{}^m\delta X_{b,m}(t_i)\} \end{aligned} \quad (13)$$

である。ただし

$$A = [-[\mathbf{r}_c \times] I_3] K_o \begin{bmatrix} \mathbf{r}_c \times \\ I_3 \end{bmatrix} \in R^{3 \times 3}, \quad (14)$$

$$B = [-[\mathbf{r}_c \times] I_3] K_o \in R^{3 \times 6} \quad (15)$$

とおいている。

### 3.2 接触の種類に応じた接触点で生じる変位

式(13)に含まれる $\delta n_e$ および ${}^e\delta\theta_{e,c}$ は、接触の種類に応じて式(1)の拘束を受ける。この拘束を利用して ${}^e\delta\theta_{e,c}$ を求める。

#### 3.2.1 点接触

点接触の場合には $\delta n_e = 0$ であるため、式(13)は

$$\begin{aligned} \{{}^cR_e(t_i)\}^T A \{{}^cR_e(t_i)\} \{{}^e\delta\theta_{e,c}(t_i)\} \\ - \{{}^cR_e(t_i)\}^T B \{{}^oH_m(t_i)\} \{{}^m\delta X_{b,m}(t_i)\} = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

と書ける。したがって

$${}^e\delta\theta_{e,c} = \{{}^cR_e(t_i)\}^{-1} A^{-1} B \{{}^oH_m(t_i)\} \{{}^m\delta X_{b,m}(t_i)\} \quad (17)$$

を得る。

#### 3.2.2 ソフトフィンガ接触

ソフトフィンガ接触の場合には $\delta n_{ex} = 0$ ,  $\delta n_{ey} = 0$ および ${}^e\delta\theta_{e,cz} = 0$ であるため、式(13)の第1行と第2行は次のように書ける。

$$[\mathbf{r}_x, \mathbf{r}_y]^T A [\mathbf{r}_x, \mathbf{r}_y] \begin{bmatrix} {}^e\delta\theta_{e,cx}(t_i) \\ {}^e\delta\theta_{e,cy}(t_i) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$- [\mathbf{r}_x, \mathbf{r}_y]^T B \{{}^oH_m(t_i)\} \{{}^m\delta X_{b,m}(t_i)\} = 0$$

ただし、 ${}^cR_e(t_i) = [\mathbf{r}_x, \mathbf{r}_y, \mathbf{r}_z]$ とおいている。したがって、

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} {}^e\delta\theta_{e,cx}(t_i) \\ {}^e\delta\theta_{e,cy}(t_i) \end{bmatrix} &= \{[\mathbf{r}_x, \mathbf{r}_y]^T A [\mathbf{r}_x, \mathbf{r}_y]\}^{-1} \\ &\quad \times [\mathbf{r}_x, \mathbf{r}_y]^T B \{{}^oH_m(t_i)\} \{{}^m\delta X_{b,m}(t_i)\} \end{aligned}$$

を得る。

#### 3.2.3 線接触

線接触の場合、 $\delta n_{ex} = 0$ および ${}^e\delta\theta_{e,cy} = 0$ ,  ${}^e\delta\theta_{e,cz} = 0$ であるため、式(13)の第1行より

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_x^T A \mathbf{r}_x \{{}^e\delta\theta_{e,cx}(t_i)\} \\ - \mathbf{r}_x^T B \{{}^oH_m(t_i)\} \{{}^m\delta X_{b,m}(t_i)\} = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

を得る。したがって、

$${}^e\delta\theta_{e,cx}(t_i) = \{\mathbf{r}_x^T A \mathbf{r}_x\}^{-1} \mathbf{r}_x^T B \{{}^oH_m(t_i)\} \{{}^m\delta X_{b,m}(t_i)\},$$

である。

#### 3.2.4 面接触

面接触の場合、 ${}^e\delta\theta_{e,c} = 0$ である。

#### 3.2.5 接触点で生じる変位

以上をまとめると、ロボットアームの微小変位と接触点で生じる把持対象物の微小変位は次の形で与えられる。

$${}^e\delta X_{e,c}(t_i) = CB \{{}^oH_m(t_i)\} \{{}^m\delta X_{b,m}(t_i)\}, \quad (20)$$

ただし、点接触の場合には

$$C = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} \\ \{{}^cR_e(t_i)\}^T A^{-1} \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{6 \times 3} \quad (21)$$

ソフトフィンガ接触の場合には

$$C = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} \\ ([\mathbf{r}_x, \mathbf{r}_y]^T A [\mathbf{r}_x, \mathbf{r}_y])^{-1} [\mathbf{r}_x, \mathbf{r}_y]^T \\ 0_{1 \times 3} \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{6 \times 3} \quad (22)$$

線接触の場合には

$$C = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} \\ (\mathbf{r}_x^T A \mathbf{r}_x)^{-1} \mathbf{r}_x^T \\ 0_{2 \times 3} \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{6 \times 3} \quad (23)$$

面接触の場合には

$$C = 0_{6 \times 3} \quad (24)$$

である。なお、 ${}^e\delta X_{e,c}(t_i)$ は接触点での微小変位であるため、直接計測することはできない。

### 3.3 センサ座標系の変位

式(20)を用いて、ロボットアームの微小変位とセンサ座標系の微小変位の関係を求める。基準座標系

$\Sigma_b$  に対するセンサ座標系  $\Sigma_o$  の同次変換行列は次の式で与えられる。

$${}^bT_o(t_i) = \{{}^bT_e\} \{{}^eT_c(t_i)\} \{{}^cT_o\} \{{}^oT_o(t_i)\} \quad (25)$$

センサ原点で生じる速度  ${}^oV_{b,o}$  は

$$\begin{aligned} {}^o\hat{V}_{b,o}(t_i) &= \{{}^bT_o(t_i)\}^{-1} \{{}^b\hat{T}_o(t_i)\} \\ &= \{{}^oT_e(t_i)\} \{{}^e\hat{V}_{e,c}(t_i)\} \{{}^oT_o(t_i)\}^{-1} \end{aligned} \quad (26)$$

と表わされるため、微小変位は

$${}^o\delta X_{b,o}(t_i) = \{{}^oH_e(t_i)\} \{{}^e\delta X_{e,c}(t_i)\} \quad (27)$$

となる。式(20),(27)より次の式を得る。

$${}^o\delta X_{b,o}(t_i) = \{{}^oH_e(t_i)\} CB \{{}^oH_m(t_i)\} \{{}^m\delta X_{b,m}(t_i)\} \quad (28)$$

ロボットアームに任意の微小変位を発生させ、 ${}^o\delta X_{b,o}$  を計測すれば、文献(3)の手法により接触状態を同定できる。このとき、少なくとも6回のセンシング動作が必要である。

### 3.4 センサに生じる力

センサ原点において計測される力とモーメントは、式(10),(11),(20)より、次の式で与えられる。

$$\begin{aligned} \delta F_o(t_i) &= \{K_o\} \{{}^oH_e(t_i)\} CB \{{}^oH_m(t_i)\} \{{}^m\delta X_{b,m}(t_i)\} \\ &\quad - \{K_o\} \{{}^oH_m(t_i)\} \{{}^m\delta X_{b,m}(t_i)\} \end{aligned} \quad (29)$$

ロボットアームに任意の微小変位を発生させ、 $\delta F_o(t_i)$  を計測すれば、文献(1)の手法により接触状態を同定できる。

### 3.5 剛性行列を用いた接触の種類判別

式(29)は次のように表わすことができる。

$$\delta F_o(t_i) = K_a \{{}^m\delta X_{b,m}(t_i)\} \quad (30)$$

ただし、

$$K_a := K_o \{{}^oH_e(t_i)\} CB \{{}^oH_m(t_i)\} - K_o \{{}^oH_m(t_i)\}, \quad (31)$$

とおいている。ロボットアームに加える微小変位  ${}^m\delta X_{b,m}(t_i)$  とそれに応じた力  $\delta F_o(t_i)$  を計測すれば、接触の種類に応じた硬さを表わす剛性行列  $K_a$  が推定できる。この  $K_a$  を用いて接触の種類を判別することを考える。しかし、 $K_a$  では式(31)の右辺第2項の行列  $C$  に無関係の項の影響のため接触の種類を判別できない。そこで、弾性部の剛性行列  $K_o$  を予め計測しておけば、

$$K_{a,plane} := -K_o \{{}^oH_m(t_i)\} \quad (32)$$

が得られ、

$$K := K_a - K_{a,plane} = K_o \{{}^oH_e(t_i)\} CB \{{}^oH_m(t_i)\}$$

が計算できる。行列  $C$  が含まれているため、基準状態を中心にセンシングを行えば、行列  $K$  の階数は

$$\text{rank } K = \begin{cases} 3 & \text{for Point contact} \\ 2 & \text{for Soft finger contact} \\ 1 & \text{for Line contact} \\ 0 & \text{for Plane contact} \end{cases} \quad (33)$$

となり、 $K$  の階数により接触の種類を判別できる。

## 4 おわりに

本論文では、人間の手の柔軟性に着目し、ロボッ

トハンドとロボットアームの間に弾性部を設定して、接触状態が未知の段階であっても、接触の種類を変えることなく力と変位を同時に発生できるようにした。そして、次の結果を得た。

- (1) 接触点で生じる力と速度の拘束条件が双対な関係にあり、かつ接触の種類に応じて異なることを利用し、ロボットアームに微小変位を加えたときに生じる接触点での微小変位を導出した。
- (2) センサ座標系に生じる力と微小変位を明らかにした。力は文献(1)のデータとして、微小変位は文献(3)のデータとして用いることができる。
- (3) ロボットアームの微小変位とセンサで計測される力の関係を剛性行列として導出し、その階数により接触の種類を判別する手法を示した。

本論文の設定は、接触作業を行なう際に接触における衝撃を避けたり、過大な力を避けるために用いるRCCデバイスやリストコンプライアンスなどの弾性装置を手首部に取り付けた場合に相当する。これらは一般に弾性部の変位を計測できないため、式(28)の微小変位  ${}^o\delta X_{b,o}$  を直接計測できない。しかし、計測可能な装置を開発すれば、ハンド部の変位を直接計測できるため、文献(3)のような手法が可能となる。

本論文では、手首部に弾性を設定したが、ロボットアームの関節の弾性も考えられる。関節にバネ剛性を設定した多関節型多指ロボットハンドも考えられる。多指ハンドで把握した場合、仮定(A2)の条件を満たさないが、変位と力を同時に発生できるため、本論文の手法が応用できると考えられる。これについては今後の研究課題である。

### 参考文献

- (1) T. Mouri, T. Yamada, A. Iwai, N. Mimura, Y. Funahashi: Identification of Contact Conditions from Contaminated Data of Contact Force and Moment, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 1. p. 585-591 (2001).
- (2) 山田, 毛利, 岩井, 三村, 舟橋: 力覚情報を用いたロボットの接触状態の同定 -7 自由度ロボットアームを用いた実験による検証-, SICE SI2001 講演論文集, p273-274 (2001).
- (3) 毛利, 山田, 岩井, 三村, 舟橋: 速度情報を用いた接触状態の同定, 第20回日本ロボット学会学術講演会, 3E15 (2002)
- (4) 菊植, 吉川: インピーダンス知覚を用いた表面属性の認識, 第20回日本ロボット学会学術講演会, 1G22 (2002)
- (5) M. T. Mason and J. K. Salisbury: Robot Hands and the Mechanics of Manipulation, (1985), 9-23, Cambridge, MA, MIT Press.
- (6) R. M. Murray, Z. Li, S. S. Sastry: A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation, CRC Press, p19-69 (1994)